



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“ANÁLISIS DEL ESPESOR EN 7 CIRCUITOS QUE
OPERAN CON LA MISMA CLASE DE MATERIAL,
EN LÍNEAS DE PROCESO QUE SE UTILIZAN EN
REFINACIÓN”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

LUIS EDUARDO LIRA BLANCO



Ciudad Universitaria, CdMx, 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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: **Profesor: JUAN MARIO MORALES CABRERA**

VOCAL: **Profesor: MODESTO JAVIER CRUZ GOMEZ**

SECRETARIO: **Profesor: LETICIA VALLE ARIZMENDI**

1er. SUPLENTE: **Profesor: EDUARDO VIVALDO LIMA**

2° SUPLENTE: **Profesor: NESTOR NOE LOPEZ CASTILLO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: TORRE DE INGENIERIA,
PISO 4, ALA NORTE.**

ASESOR DEL TEMA:

Dr. M. Javier Cruz Gómez

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dr. Néstor Noé López Castillo

SUSTENTANTE:

Luis Eduardo Lira Blanco

Índice

1. Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Resumen	1
1.2 Entrada.....	2
1.3 Objetivo general.....	7
1.4 Objetivos particulares	7
1.5 Justificación	8
2. Capítulo 2. Marco teórico.....	10
2.1 Antecedentes históricos.....	10
2.2 Accidentes	13
2.3 Seguridad industrial.....	15
2.3.1 Campo de acción de la seguridad e higiene industrial.	17
2.3.2 Ventajas de la seguridad e higiene industrial.....	17
2.3.3 Legislación de higiene y seguridad industrial.....	17
2.3.4 Seguridad industrial en plantas de refinación.....	20
2.4 Integridad mecánica	21
2.5 Normatividad.....	23
2.6 Desgaste	23
2.6.1 Abrasión.....	24
2.6.2 Desgaste adhesivo.....	24
2.6.3 Fatiga superficial	24
2.6.4 Corrosión.....	24
2.7 Corrosión de tuberías	30
2.7.1 Formas de corrosión	31
2.8 Transporte de fluidos por tuberías.....	36
2.8.1 Flujo de fluidos.....	36

2.8.2	Fluidos homogéneos.....	37
2.8.3	Fluidos heterogéneos.....	45
2.9	Material.....	45
2.9.1	Selección de tuberías.....	46
2.9.2	A-53 Gr B	53
2.10	Sistema de medición y control de espesores en líneas y equipos (SIMECELE).....	56
2.10.1	¿Qué es el SIMECELE (Sistema de Medición y Control de Espesores en Líneas y Equipos)?	56
2.10.2	¿Para quién es el SIMECELE?.....	57
2.10.3	Actividades	58
2.11	Características en la inspección de tuberías de proceso y servicios auxiliares.....	59
2.11.1	Definiciones	59
2.11.2	Inspección técnica (medición ultrasónica de espesores de las líneas de proceso y equipos)	61
2.11.3	Posiciones de medición	64
2.11.4	Tipo de nivel	64
2.11.5	Unidades de control de líneas	69
2.11.6	Discriminación de valores de espesores no significativos	70
2.11.7	Velocidad de desgaste por punto (d)	70
3.	Capítulo 3. Recopilación de información	72
3.1	Recopilación de información.....	72
3.1.1	Material y clase	73
3.1.2	Circuitos y Unidades de Control.....	73
3.2	CIRCUITO 01. CARGA.....	76
3.2.1	Servicio: Mezcla de Gasóleos.....	76
3.2.2	Unidades de Control	77

3.2.3	UC-FCCI-101	78
3.2.4	Resumen Circuito.....	81
3.3	CIRCUITO 09. ACEITE CICLICO LIGERO	83
3.3.1	Servicio: Aceite cíclico ligero.....	83
3.3.2	Unidades de Control	84
3.3.3	Resumen Circuito.....	84
3.4	CIRCUITO 15. NAFTA.....	85
3.4.1	Servicio: Nafta.....	85
3.4.2	Unidades de Control	87
3.4.3	Resumen Circuito.....	88
3.5	CIRCUITO 31. PROPILENO.....	89
3.5.1	Servicio: Propileno	89
3.5.2	Unidades de Control	90
3.5.3	Resumen Circuito.....	90
3.6	CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO	91
3.6.1	Servicio: Gas LP lavado.....	91
3.6.2	Unidades de Control	92
3.6.3	Resumen Circuito.....	93
3.7	CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.....	94
3.7.1	Servicio: Agua amarga.....	94
3.7.2	Unidades de Control	95
3.7.3	Resumen Circuito.....	96
3.8	CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO	97
3.8.1	Servicio: Gas ácido	97
3.8.2	Unidades de Control	99

3.8.3	Resumen Circuito.....	100
4.	Capítulo 4. Resultados y análisis.....	102
4.1	CIRCUITO 01. CARGA, Servicio: Mezcla de Gasóleos.....	103
4.1.1	Procedimientos para la obtención de resultados.....	103
	Resumen de propiedades.....	110
4.1.2	Obtención de las condiciones de operación óptima.....	115
4.1.3	Condiciones de Operación.....	128
4.2	CIRCUITO 09. ACEITE CICLICO LIGERO, Servicio: Aceite cíclico ligero	131
4.2.1	Resumen de propiedades.....	131
4.2.2	Obtención de las condiciones de operación óptima.....	136
4.2.3	Condiciones de Operación.....	138
4.3	CIRCUITO 15. NAFTA, Servicio: Nafta	139
4.3.1	Resumen de propiedades.....	139
4.3.2	Obtención de las condiciones de operación óptima.....	145
4.3.3	Condiciones de Operación.....	147
4.4	CIRCUITO 31. PROPILENO, Servicio: Propileno.....	148
4.4.1	Resumen de propiedades.....	148
4.4.2	Obtención de las condiciones de operación óptima.....	153
4.5	CIRCUITO 35. LPG LAVADO, Servicio: LPG lavado	154
4.5.1	Resumen de propiedades.....	155
4.5.2	Obtención de las condiciones de operación óptima.....	159
4.5.3	Condiciones de Operación.....	160
4.6	CIRCUITO 42. AGUA AMARGA, Servicio: Agua amarga.....	161
4.6.1	Resumen de propiedades.....	162
4.6.2	Obtención de las condiciones de operación óptima.....	167

4.6.3	Condiciones de Operación.....	168
4.7	CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO, Servicio: Gas ácido.....	170
4.7.1	Resumen de propiedades.....	170
4.7.2	Obtención de las condiciones de operación óptima.....	175
4.8	Análisis general.....	177
4.8.1	Encontrar un factor en común en el desgaste de las líneas para los diferentes circuitos.....	177
4.8.2	Determinar para cada circuito, las condiciones de operación óptimas con relación a su velocidad de desgaste.....	179
4.8.3	Obtener el promedio de velocidad de desgaste del diámetro del mayor y menor deterioro para cada unidad de control que conforma al circuito.....	179
4.8.4	Establecer el porcentaje de posiciones que cuentan con una medición de espesor con respecto al total que se encuentra en el circuito.....	179
4.8.5	Obtener el promedio de velocidad de desgaste para cada circuito.....	180
4.8.6	Determinar el servicio con el mayor y menor desgaste con respecto a los demás.....	181
4.8.7	Establecer una base fundamentada del porqué de la disminución de espesor de las líneas en función de los datos recopilados y los resultados obtenidos, así como proporcionar una hipótesis para disminuir el efecto de este fenómeno.....	182
5.	Conclusiones.....	186
6.	Índice de ecuaciones.....	190
7.	Índice de gráficas.....	190
8.	Índice de tablas.....	191
9.	Índice de imágenes.....	195
10.	Índice de Figuras.....	196
11.	Trabajos citados.....	196
12.	Bibliografía.....	197

1. Capítulo1. Introducción

1.1 Resumen

La presente tesis de licenciatura presenta el análisis del espesor en 7 circuitos que manejan la misma clase de material para líneas que se utilizan en Refinación, basado principalmente en el hecho de que los fluidos que transitan por las líneas de proceso contienen diferentes propiedades que afectan la integridad física del material que las transporta, provocando el desgaste de pared de manera sub-homogénea para cada circuito. Además de las propiedades del fluido, las condiciones de operación también juegan un papel trascendental en función de la disminución del grosor en la línea. Es por eso que se decidió estudiar un solo material con capacidad de aumentar su libraje para condiciones con presiones altas.

La implementación de un Sistema de Medición y Control de Espesores de Líneas y Equipos (SIMECELE), provee una herramienta útil en el caso de mitigación de riesgos, ya que además de efectuar medidas preventivas, realiza un análisis detallado para cada unidad de control de un circuito determinado, el cual proporciona información cualitativa y cuantitativa por medio de un reporte. Y aunque este reporte contiene un análisis general completo, hay puntos particulares que esta tesis aborda y desglosa de manera ordenada para que el informe final complemente el reporte de la unidad de control, de tal forma que la presentación de éste trabajo sea representativa visual y numéricamente.

En cuanto al contenido del presente trabajo, este se desglosa en 5 capítulos. El primero orientado en la descripción y del planteamiento del por qué y para qué se realiza este documento. En el segundo capítulo se encauza a la parte teórica y conceptual que es necesaria para darle la suma importancia a las líneas de proceso y su entorno, además de mostrar la metodología que emplea el SIMECELE para las inspecciones técnicas de líneas y equipos. El tercer capítulo muestra, de manera general, la información recopilada para el posterior análisis. En el cuarto capítulo, haciendo uso de dicha información, se presentan los resultados obtenidos, asimismo, la elaboración de un análisis para cada circuito respectivamente y un análisis general, donde este último, muestre el cumplimiento de los objetivos, además nutrir los análisis realizados para cada circuito, ya que, se busca

proveer información que apoye el trabajo que realiza SIMECELE, en este caso, en cuestión de integridad mecánica, para conocer el comportamiento del desgaste y mitigar riesgos. Y por último, el quinto capítulo, donde se dan las conclusiones que se complementan con los objetivos y el previo análisis.

1.2 Entrada

Dentro de la industria, el campo de la seguridad y la salud en el trabajo crece a diario, ya sea en reputación o en exigencias, desde 3 puntos de vista diferentes: legal, administrativo y social.

Aunado a esto, el estado también participa y emite leyes que demandan acciones de higiene y seguridad, que garanticen la integridad del personal y de la misma planta. Asimismo hay clara evidencia de que un buen programa de seguridad e higiene en el trabajo reduce los costos y produce un significativo valor agregado a la empresa.

Los especialistas en seguridad industrial, son los encargados de evitar escenarios de daños y riesgos (económicos, personales y materiales). Debido a esto, se han de analizar las causas e implementar las precauciones necesarias con el objetivo de mitigar riesgos en beneficio mutuo (persona, empresa).

Ahora bien, en cuanto a los hidrocarburos y todo el contexto general que rodea el petróleo, es importante tratar un poco del aspecto histórico, y aunque no sea el tema principal, el tener la posibilidad de concebir la importancia de este recurso energético y algunas peculiaridades que han surgido con base a este, sería conveniente.

Por otra parte, uno de los problemas más graves causados por los avances de la tecnología y las plantas industriales, es la corrosión de los materiales como consecuencia de la agresividad atmosférica, incluyendo la destrucción de las estructuras metálicas, construcciones, metales y aleaciones, debido a que el 80% están expuestos a este medio. Además, la mayoría de los metales en contacto con el medio ambiente, forma un sistema termodinámicamente inestable. A excepción de los metales nobles, todos los demás reaccionan y se transforman en óxidos. Sin embargo, todos los metales pueden ser usados siempre que su velocidad de deterioro sea aceptablemente baja, augurando mayor seguridad y durabilidad.

Las pérdidas por corrosión están relacionadas directamente con el tipo de atmósfera donde se encuentran expuestos los materiales. Estas atmósferas pueden ser de tipo rural, urbana, marina como en el caso de la mayoría de las refinerías de la república mexicana y por ultimo industrial, que también tienen un poco de esta atmósfera las refinerías, ya que cuentan con un numero variado de plantas para diversos productos. Las pérdidas económicas son cuantiosas, sumando miles de millones de pesos.

El impacto económico por la corrosión no es un asunto menor, ya que además de estar directamente ligado con la seguridad industrial y la implementación de medidas de prevención y durabilidad de los materiales, es relevante presentar algunos números con el fin de sensibilizar el criterio, y poner en perspectiva el panorama financiero para este fenómeno. Por ejemplo, a continuación en la tabla 1.1, se presentan aproximaciones de los costos ocasionados a través de los años por la corrosión en diferentes partes del mundo.

Tabla 1.1 Aproximaciones a los costos de la corrosión.

Año	Ubicación	Costo (diferentes unidades e indicadores)
1922	Hadfield Steel, Mundo	£ 600 M
1940	Hudson, U.K.	£ 200 M
1949	Vernon, U.K.	£ 600 M
1949	Uhlig, U.S.A.	USD \$ 5,427 M
1969	Kolotykin, URSS.	USD \$ 6,900 M
1971	Hoar, U.K.	£ 1,365 M (3.5% PNB)
1975	BCL, U.S.A.	USD \$ 70,000 M (4.2% PNB)
1982	U.K	£ 4,00 M
1983	Sudáfrica	4.9 % PNB
1985	U.S.A.	USD \$ 167,000 M
1985	Turquía	5.09% PNB
1987	Kuwait	5.2% PNB
1988	País Vasco	USD \$ 130 M (3% PNB)
1994	Colombia	USD \$ 1,300 M (1.3% PIB)
1995	U.S.A.	USD \$ 300, 000 M (4.2% PNB)

Como se aprecia, desde principios del siglo pasado han sido cantidades de millones, y con el transcurso del tiempo, este costo se ha ido incrementando junto con la expansión de la cavilación y la exigencia industrial de los tiempos modernos.

Asimismo, las principales razones de los problemas de la corrosión se deben en su mayoría, con el 35.71%, a la falta de prevención, con el 26.19%, a la falta de difusión, y por último y de igual manera, con el 19.05%, a la minimización de costos y falta de conocimientos básicos.

En relación a nuestro país y la corrosión al desnudo para acero al carbón, gracias a la reunión del congreso técnico directivo de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo del V Centenario (CYTED-D), se puso en marcha la elaboración del Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica (MICAT), en donde la Ciudad de México (Urbana, Facultad de Química, UNAM), Cuernavaca (Urbana, Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE), San Luis Potosí (Urbana, Instituto de metalurgia, UASLP) y Acapulco (Marina-Urbana, Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE), fueron las estaciones de medición establecidas para la generación de información a dicho proyecto, encontrando que el promedio de la velocidad de corrosión disminuye conforme se aumenta la serie(composición), además de que la ciudad con una mayor velocidad de corrosión es San Luis Potosí, éstos valores se muestran en la tabla 1.2, donde además se observan los valores de dicha velocidad para las diferentes estaciones de medición en función de las series.

Tabla 1.2 Datos de corrosión del acero al carbono correspondiente a un año de exposición (Series 11,12 y 13), dos años de exposición (Serie 21), tres años de exposición (Serie 31) y cuatro años de exposición(Serie 41).

Identificación	Estación	Corrosión $\mu\text{m}/\text{año}$					
		Serie 11	Serie 12	Serie 13	Serie 21	Serie 31	Serie 41
M1	CDMX	15.4	8.6	5.1	9.2	6.6	-
M2	Cuernavaca	15.2	11.4	13.7	11.8	8.8	7.3
M3	San Luis Potosí	37.5	26.4	29.4	25.4	22.7	20.3
M4	Acapulco	22.6	24.8	18.8	13.6	10.1	10
	Promedio	22.67	17.8	16.75	15	12.05	12.53

También se observa que para un año de exposición, la Serie 13, de composición desconocida, presenta un promedio menor de velocidad de corrosión, siendo la serie 11, la más vulnerable de este grupo. Las series 31 y 41, muestran un promedio velocidad de corrosión parecida, siendo aún menor la que se expuso 3 años (Serie 31), a comparación con las muestras de 4 años, debido a que para la Ciudad de México no se cuenta con un valor establecido para la Serie 41. Con esta información, es inevitable considerar a la corrosión como un problema que se debe estudiar y controlar a través de la administración de la seguridad, ya que en la industria química, es un problema cotidiano que genera preocupación debido a que ataca a la mayoría de los metales, debilita la estructura, permite fisuras, oxidación, depósito de sólidos en poros. Problema que pone en riesgo a la producción y el transporte de sustancias, ocasionando un desgaste en la pared, que aumenta el riesgo de sufrir accidentes; ya sea por las propiedades del fluido transportado y almacenado, o por los agentes del medio ambiente que pueden reaccionar con este generando un accidente más a la estadística en plantas y sistemas con hidrocarburos.

Para aminorar deterioros y accidentes por los fenómenos comúnmente llamados corrosión y erosión, es prudente realizar actividades de mantenimiento a materiales (tuberías, accesorios y equipos). En la industria, una de las actividades de mantenimiento es la inspección y para realizarla es necesario identificar y dimensionar los daños mecánicos, desgaste y debilidad por la continua operación, así como el comportamiento de los fluidos en el proceso.

El entender que la medición de espesores es un factor crítico en la industria química y trascendente debido al alcance que este genera. Por ejemplo, al detectar oportunamente valores críticos en el desgaste de pared de una línea de proceso o un equipo, este podrá ser reemplazado sin sufrir pérdidas y generar un costo aun mayor debido a los daños creados en si, por la naturaleza del desgaste y el fluido. Al contrario, en caso de no llevar un seguimiento, el daño podría crear un accidente al personal, a la producción, a la planta misma y generar un tipo de reacción en cadena afectando también al entorno; ya sea por una simple fisura o fuga.

De tal modo que en el presente trabajo, se realizará un análisis más a detalle en cuanto al desgaste del espesor de los circuitos, pero también con el propósito de detectar y evaluar

oportunamente las disminuciones de espesor bajo los límites permisibles que puedan afectar la integridad física de líneas y equipos, para que se tomen las medidas necesarias, a fin de prevenir fallas y accidentes.

Debido a que SIMECELE no compara circuitos con lo que respecta a disminución de espesores, o se pone al margen del por qué para tal circuito o servicio, el comportamiento es tal, surge como iniciativa de hacerlo con los valores de velocidad de desgaste que se exportan de la base de datos de SIMECELE. En la tabla 1.3, se muestran los 7 circuitos seleccionados que utilizan la misma clase de material, ya que así permitirá tener un punto de comparación que ayudaran a que el análisis sea correcto.

Tabla 1.3 Circuitos seleccionados.

Circuito	Servicio	Material
01. CARGA	Mezcla de Gasóleos	A53 Gr. E-B
09. ACEITE CICLICO LIGERO	Aceite Cíclico Ligero	A53 Gr. E-B
15. NAFTA	Nafta	A53 Gr. E-B
31. PROPILENO	Propileno	A53 Gr. E-B
35. LPG LAVADO	Gas LP lavado	A53 Gr. E-B
42. AGUA AMARGA	Agua amarga	A53 Gr. E-B
44. GAS ÁCIDO	Gas ácido	A53 Gr. E-B

Donde posiblemente, los circuitos con una mayor velocidad de corrosión sean el de carga, por la composición del fluido al ser demasiado denso y con algunas partículas sólidas, y los circuitos de naturaleza agresiva como el 42 y 44. El material A53 Gr. B tipo E, es una clasificación del material de la ASTM (American Society for Testing Materials), donde el A53 es la clase de material, en este caso acero al carbón, el grado es señalado debido que varían las composiciones, para el grado B, en su mayoría aumenta el % de

composición de ciertos metales, lo cual se ve reflejado en una mayor estabilidad mecánica cuando se somete a tensiones y presiones a el material, y por último, el E, indica el tipo de soldadura, que en este caso indica que la tubería es soldada con resistencia eléctrica (ERW).

Además, también se busca descubrir comportamientos, encontrar factores en común del desgaste, analizar los diámetros, la posición de la línea en la medición en valores significantes que arroja la medición previamente y demás elementos. Por último, éste trabajo contribuirá significativamente con la seguridad, además de ayudar a visualizar el comportamiento de fluidos y sus condiciones de operación con un cierto tipo de clase de material, cosa que hasta el momento no se había comparado.

1.3 Objetivo general

Realizar el análisis del espesor en 7 circuitos que operan con la misma clase de material, en líneas de proceso que se utilizan en refinación, con el fin de tener una mejor comprensión de como es el comportamiento de la disminución del espesor de pared en función de las condiciones de operación a las que está sometido el fluido.

1.4 Objetivos particulares

- Encontrar un factor en común en el desgaste de las líneas para los diferentes circuitos.
- Determinar para cada circuito, las condiciones de operación óptimas con relación a su velocidad de desgaste.
- Obtener el promedio de velocidad de desgaste del diámetro del mayor y menor deterioro para cada unidad de control que conforma al circuito.
- Establecer el porcentaje de posiciones que cuentan con una medición de espesor con respecto al total que se encuentra en el circuito.
- Obtener el promedio de velocidad de desgaste para cada circuito
- Determinar el servicio con el mayor y menor desgaste con respecto a los demás.
- Establecer una base fundamentada del porqué de la disminución de espesor de las líneas en función de los datos recopilados y los resultados obtenidos, así como proporcionar una hipótesis para disminuir el efecto de este fenómeno.

1.5 Justificación

Es sabido que el desgaste es un fenómeno irreversible, que en la industria química, específicamente hablando del funcionar de la planta, afecta tanto líneas de proceso y equipos, como a recipientes de almacenamiento. Por tal motivo, el realizar inspecciones mecánicas con su respectivo análisis, nos hace adoptar un programa de integridad mecánica, el cual es parte de la administración de la seguridad la cual está orientada a garantizar la integridad general del trabajador, mediante un medio sin riesgos, así como proteger las instalaciones y el medio ambiente.

SIMECELE (Sistema de Medición y Control de Espesores en Líneas y Equipos), a grandes rasgos, está orientado a 2 puntos:

- Predecir, detectar y evaluar oportunamente las disminuciones de espesor debajo de los límites permisibles, que puedan afectar la integridad mecánica de las tuberías y equipos en general, para tomar las medidas necesarias a fin de prevenir la falla de los mismos.
- Efectuar la prevención técnica y administrativa, así como la detección de puntos críticos, mediante los valores que arrojan las inspecciones del espesor de pared al obtener la velocidad de desgaste por punto de calibración o medición.

Este trabajo surge por la necesidad de encontrar algún espacio en blanco dentro del análisis ya hecho por SIMECELE, que nos pudiera proveer información específica y con un grado de importancia relevante, además de crear una reflexión sobre los comportamientos de ciertos fluidos con alguna clase de material, así como encausarnos a indagar más allá de lo ya realizado por el SIMECELE, de tal forma que este complementa a lo ya realizado en los reportes de unidades de control, haciendo que la descripción sea más detallada y se tenga un mejor conocimiento sobre el comportamiento de la tubería-fluido en la unidad de control y a su vez del circuito, al contar con un rango mayor de elementos y datos que ayuden a dicho análisis.

Al poder obtener información relevante que no se haya realizado en SIMECELE, esta se podría tomar en cuenta en un futuro para aplicarla y aumentar la seguridad, confiabilidad y la calidad de operación de forma significativa.

Este trabajo, como ya se mencionó, aportará datos que complementarán la administración de la seguridad y la integridad mecánica, además de recopilar y filtrar la información correcta con la cual se pueda proyectar la conducta de los fluidos en función de las variables como son las condiciones de operación, operando con el mismo material, ya que con esta restricción, el estudio se delimita y puede hacerse un análisis más profundo e interesante sobre el fluido, además de poder efectuar una comparación prudente con los diferentes fluidos de los circuitos, la cual, hasta el momento, en los trabajos de tesis relacionados con SIMECELE, no se habían efectuado.

Así como poder recapitular información con relación a los antecedentes del petróleo y algunos accidentes ocasionadas por este recurso energético.

Básicamente, el sustento del trabajo es realizar nuevas actividades con información importada de mediciones, que complementen los resultados previamente elaborados, con el fin de expandir los horizontes del análisis, que en este caso, tratándose de líneas de refinerías, resultaría prudente realizarlos con esta nueva información y tener así un estudio aún más completo que augure seguridad y calidad de la que tanto se ha mencionado en líneas arriba.

2. Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Antecedentes históricos

La industria petrolera, desde su nacimiento en el siglo XIX, puso de manifiesto su potencial como fuente de acumulación de capitales. Apoyándose en su control, aún en la etapa que sus aplicaciones se limitaban a su empleo como iluminante y se levantó el imperio de Rockefeller: la Standard Oil (1).

Su valor en todos los sentidos aumentó ya en el siglo XX, cuando se empleaba como suministro en calderas, en transportes navales y ferroviarios, y a través de su alternativa como gasolinas en la naciente industria automotriz del mundo y principalmente de las potencias en ese entonces. Además hay que recordar que su uso militar hizo que evolucionara esta industria de forma exponencial para esos años. En el caso de nuestro país, desde 1918, se empezaron a utilizar las nuevas tecnologías de la época que facilitaron la exploración, debido a que empresas transnacionales como Exxon y Shell, entraron al mercado y desplazaron a las pequeñas empresas pioneras. La geología mexicana fue reconocida, ahora con sondeos de geofísica y otros recursos tecnológicos, que precisaron información rudimentaria adquirida desde el siglo XIX. Se confirmaron las posibilidades petrolíferas de áreas sedimentarias que por su antigüedad prometían posibilidades de ser propicias para la generación de hidrocarburos (1). En la segunda posguerra se descubrió lo que hoy Pemex llama, “Región marina suroeste de Campeche”, la cual en sus primeros campos descubiertos, estaba bajo el mando de importantes petroleros estadounidenses

Por esto, la industria petrolera tuvo que afrontar la necesidad de adoptar nuevas tecnologías y ampliar su alcance para generar una mayor producción, asimismo ampliar sus territorios de producción, principalmente en zonas costas afuera para facilitar la distribución-empleo. Esto creó perturbaciones de oferta, escasez y compras especulativas. Entonces quedó de manifiesto que los precios de este insumo fundamental podían desencadenar impactos inflacionarios a escala mundial, incidir en las balanzas de comercio y de pagos, así como alterar las tasas de crecimiento; en suma, afectar el funcionamiento del aparato económico internacional (1).

Y bien un recurso que reúne estas cualidades no podía dejarse en manos de la mayoría de los dueños, los países pobres, sin una estructura bien definida, sin identidad ni autoridad, heterogéneos y sometibles. De esta forma, los países o compañías que lo monopolizaron, por cuestiones estratégicas crearon el término de reserva secreta, que emplearon para tener absoluto control de este recurso, además de tener la facultad para maquillar las cifras de reservas a su conveniencia.

Para el año de 1996, las estadísticas de las reservas reportadas contenían cifras inverosímiles. Y en palabras del director en ese entonces de Pemex, el doctor Adrián Lajous, afirmaba que la cuantificación e interpretación de las reservas de hidrocarburos suponía diversos sesgos que en unos casos tienden a sobreestimarlas y en otros casos a subestimarlas. Su cálculo siempre ha sido influido en forma determinante por factores de carácter económico, estratégico e institucional (1). Asimismo, señaló que el marco jurídico también ha jugado un papel decisivo en función de las reservas, así como las competencias entre empresas y países productores.

En relación a la información divulgada sobre las reservas de México, es insuficiente y plantea dificultades en la consulta. En contraste con las investigaciones estadounidenses sobre las reservas de México que son cuantiosas. Los vecinos del Norte, desde comienzos de siglo, han formado expertos en yacimientos petroleros mexicanos, así como estudiar nuestros recursos. Esto es una clara evidencia del valor e importancia que en ellos genera el estar, a un paso arriba por lo menos, en los aspectos trascendentes para tener un país sólido e insuperable a la vez. Al mismo tiempo hay que hablar sobre los posibles pioneros de la exploración petrolera de México, los alemanes Karl Sapper, Emil Böese y Leo Waibel. El primero desarrolló su estudio principalmente en Centroamérica y el sureste mexicano por un lapso de tiempo de 44 años, según se estima por las referencias bibliográficas y se le conocía en esta región como el “espía alemán”. En 1894, Sapper publicó un primer informe sobre la geología de Chiapas y Tabasco, en el cual identificó rocas del periodo terciario para después complementarlo en 1906 con un trabajo que lleva por título “nota sobre la geología de Chiapas y Tabasco”. Por su parte, Böese publicó en 1905 un trabajo parecido al último mencionado por Sapper, en el cual identificó rocas calizas. Para 1910 encontró rocas chiapanecas del cretácico, las cuales son fantásticas

según los expertos en yacimientos, debido a la edad y que su presencia es una de las condiciones que permiten conjeturar la existencia de yacimientos de petróleo. Por último, Leo Waibel, que tuvo una investigación menos trascendente, pero es de los pioneros. Su estudio más importante es sobre la Sierra Madre.

Resulta evidente, que las muestras extraídas de suelo Mexicano fueron analizadas en Alemania. Con base a los resultados, Sapper decía que su opinión sobre la existencia de petróleo en la zona se basaba en que las capas subterráneas son terciarias. Aunque tenía claro que un trazo no era evidencia suficiente, principalmente por los movimientos telúricos que se generan en esa capa y que pueden crear canales de migración.

Las estadísticas del porfiriato empiezan a registrar la producción petrolera a partir de 1901. La producción en esos primeros diez años es, si la comparamos con cifras de los 90's, tan pequeña, que se puede decir que los mejores años del porfiriato, tanto los estadounidenses de la Huasteca Petroleum, como los ingleses de El Águila, producían en todo un año lo que hoy se produce en un día (1).



Imagen 2.1 Imagen de la petrolera “El águila” en México.

Desde la expropiación se cree que la sociedad mexicana recibe un informe anual sobre las reservas, pero las estadísticas oficiales en los primeros años fueron descontinuadas y los primeros datos aparecieron en 1943, y se han referido a conceptos diferentes, como el

curdo equivalente, con los cuales no es suficiente para estimar o comparar ya que esto resulta ambiguo. Aunque cabe resaltar que actualmente se tiene una transparencia por parte del gobierno y su nuevas reformas.

2.2 Accidentes

A continuación se recapitulan algunos acontecimientos que han causado impacto en cuestión ambiental, económica, social y en seguridad, en relación a la industria petrolera.

En la literatura, estos datos se encuentran fácilmente y, ya que no es el propósito de citar todos los accidentes, solo se repasarán brevemente algunos a nivel mundial, además, se podrá apreciar, que estos accidentes no son orientados a una causa en particular, pues contemplan 3 categorías (accidentes en plantas y sistemas con hidrocarburos, accidentes con gases de hidrocarburos y accidentes en aguas y con hidrocarburos).

- 1937. El escape de gas LP en una planta industrial petrolera localizada en New London, estado de Texas, produce una gran explosión y el posterior incendio deja más de 294 víctimas.
- 1978. En agosto en Donnelson Iowa, explotó un propano ducto debido a las tensiones sobre el material al haber bajado la tubería a otra posición, el hecho dejó 4 muertos y más de 10 heridos, al igual que destruidas 75 hectáreas de siembras y bosques.
- 1982. El derrame del tanque de Tocoa: el 19 de diciembre se presentó en Tocoa, una terminal petrolera cercana a Caracas, Venezuela, el mayor derrame por ebullición desbordante en un tanque de almacenamiento de petróleo y sus derivados, que haya ocurrido en la historia de la humanidad. Los muertos fueron más de 500 y las pérdidas económicas fueron superiores a 500 millones de dólares.
- 1984. La explosión de San Juanico: el 19 de noviembre se presentó la mayor explosión generada por un escape de gas licuado del petróleo o gas LP. Más de doce tanques esféricos y verticales que contenían gas licuado del petróleo y en casi toda una caravana de vagones tanques que se encontraban en el lugar. El número de personas muertas excede las 1500 y, por lo menos, 7000 sufrieron lesiones graves. las pérdidas de bienes y ambientales no fueron calculadas debido a su magnitud.

- 1985. La principal refinería de Nápoles estalló en llamas dejando más de 20 muertos y, por lo menos, 150 heridos graves, la mayoría de las lesiones fueron causadas por vidrios rotos que se destruyeron en la explosión. Además del fuego, se presentó un derrame de hidrocarburo que llegó hasta 30 kilómetros del lugar. 24 tanques fueron destruidos.
- 1989. En marzo, se presenta la tragedia marina ambiental de mayores proporciones durante todo el siglo XX, esta fue el derrame de Exxon Valdez. El acontecimiento ocurrido en la bahía Príncipe William, se derramaron más de 258,000 barriles de petróleo crudo y durante la emergencia se utilizaron más de 300 embarcaciones y más de 3400 personas participaron en los momentos críticos. Aún a finales de 1999, la empresa afectada seguía pagando indemnizaciones y siendo afectada por fallos judiciales en su contra.
- 1991. El 3 de noviembre se presenta el mayor desastre económico y ambiental de la industria petrolera al desarrollarse la guerra del golfo. Se incendian más de 749 pozos petroleros en Kuwait; el control total se logró después de 7 meses y no de dos años como se había previsto. Debido a este suceso se diseñaron sistemas avanzados y computarizados de control de incendios en cabezas de pozos.
- 1999. El 17 de agosto en Turquía, resultante de un sismo que ocurrió en ese país en una escala de 7.4 Richter, la principal refinería de ese país quedó totalmente destruida y la extinción de los diversos incendios generados en las plantas se logró en 6 días.
- 2000. En julio, un derrame de hidrocarburos generado en la refinería Getulio Vargas, del sur brasileño, superior a 40,000 toneladas de petróleo crudo contaminó toda la cuenca principal del gran río Iguazú.
- 2001. En agosto una explosión dejó más de 60 muertos en Corea, cuando explotó un grupo de cilindros que contenían gas LP.
- 2001. En septiembre, en la ciudad de Toulouse, Francia, una explosión en una refinería petrolera dejó más de 20 muertos y 200 heridos. Al parecer por una falla en las operaciones.

- 2009. El 22 de octubre en una explosión e incendio en las instalaciones petroleras Caribbean Petroleum de Puerto Rico quedaron destruidos 11 de los 40 tanques de la planta.

Por esta razón, la inspección y demás tareas empleadas para el control y prevención de riesgos son trascendentales desde cualquier óptica para toda industria, aunque en el presente trabajo se enfoca más a la petrolera. Además, si se cuenta con la más mínima sensibilidad, se creará conciencia al reflexionar sobre la implementación de la seguridad industrial, al tener tantos accidentes que afectan de forma directa e indirecta a nuestro entorno y repercuten ambientalmente, socialmente y, por supuesto, económicamente.

2.3 Seguridad industrial

A través de la historia, el hombre ha estado expuesto a constantes riesgos laborales, unos provocados por él mismo al crear satisfactores y otros que provienen de la naturaleza. Los principales riesgos están ligados a los accidentes, que impactan en la seguridad y, en la salud de los trabajadores, daños a instalaciones, que estos pueden dañar a regiones enteras y afectar de tal manera como se mencionó en el apartado anterior.

La seguridad industrial es el conjunto de actividades que forman parte de la administración, con el fin de proteger la integridad física, mental y social del trabajador y mantenerlo como elemento activo dentro de un medio sin riesgos; así como proteger el medio ambiente y las instalaciones de la empresa.

La administración de la seguridad deberá estar orientada en la mitigación de riesgos para el trabajador, el medio ambiente y las instalaciones; identificando actos, eventos, circunstancias y condiciones inseguras para establecer acciones y control del sistema.

Es necesario poner en contexto conceptos que se manejan en cuestión de la materia de higiene y seguridad industrial:

- Higiene: es la disciplina que estudia y determina las medidas para conservar y mejorar la salud, así como para prevenir las enfermedades.

- Higiene Industrial: conjunto de conocimientos técnicos dedicados a reconocer, evaluar y controlar aquellos factores del ambiente, psicológicos o tensionales que provienen del trabajo y que pueden causar enfermedades o deteriorar la salud.
- Seguridad en el Trabajo: conjunto de conocimientos técnicos y su aplicación para la reducción, control y eliminación de accidentes en el trabajo por medio de sus causas.
- Seguridad: conjunto de normas, obras y acciones, así como los instrumentos técnicos y legislativos requeridos para proteger la vida humana y la propiedad del hombre de la acción de fenómenos destructivos, tanto de los provocados por la naturaleza, como los originados por la actividad humana.
- Accidente de trabajo: es toda lesión orgánica o perturbación funcional inmediata o posterior, o la muerte producida repentinamente en ejercicio, o con motivo del trabajo, cualesquiera que sean el lugar y el tiempo en que se presente.
- Accidente: resultado de una serie de situaciones de peligro previas y que al producirse causan efectos negativos en el personal y, en el material o sistemas de producción.
- Enfermedad: alteración de la salud producida por un agente biológico, o algún factor físico, químico o ambiental que actúa lentamente, pero en forma continua o repetida.
- Enfermedad profesional: estado patológico que sobrevive por una causa repetida durante largo tiempo, como obligada consecuencia de la clase de trabajo que realiza la persona o del medio en que tiene que laborar y que produce en el organismo una lesión o perturbación funcional, permanente o transitoria, pudiendo ser originada por agentes químicos, físicos biológicos, de energía o psicológicos.
- Enfermedad de trabajo: es todo estado patológico derivado de la acción continuada de una causa que tenga su origen o motivo en el trabajo o en el medio ambiente en el que el trabajador se vea obligado a presentar sus servicios.
- Lesión: daño causado por una herida, golpe o enfermedad.
- Riesgo: es la exposición a una posibilidad de accidente.
- Salud: es un estado de bienestar completo: físico, mental y social y no sólo la consecuencia de enfermedad o de invalidez.

- Peligro: cualquier condición de la que se pueda esperar con certeza lesiones o daños a la propiedad y/o al medio ambiente y es inherente a las causas materiales (soluciones químicas) o equipos (aire comprimido, recipientes a presión, etc.), que están relacionadas directamente con una condición insegura.
- Riesgo de trabajo: son los accidentes y enfermedades a que están expuestos los trabajadores en ejercicio o con motivo del trabajo.

2.3.1 Campo de acción de la seguridad e higiene industrial.

Son los procedimientos, técnicas y elementos que se aplican en los centros de trabajo, para el reconocimiento, evaluación y control de los agentes nocivos que intervienen en los procesos y actividades de trabajo, con el objetivo de establecer medidas y acciones para la prevención de accidentes o enfermedades de trabajo, a fin de conservar la vida, salud e integridad física de los trabajadores, así como evitar cualquier posible deterioro al propio centro de trabajo (2)

2.3.2 Ventajas de la seguridad e higiene industrial

Al fomentar la seguridad se reducen riesgos, se le enseña al personal a ser precavido, se le vigila estrechamente, además de tener la parte de higiene en todos sus rubros conforme a la legislación que nos rige, el cual proporciona salud en el trabajo.

2.3.3 Legislación de higiene y seguridad industrial

En general, en toda empresa a través de sus divisiones y niveles jerárquicos, es necesario que conozcan lo básico sobre higiene y seguridad industrial, por esto, a continuación se enlistan los documentos correspondientes, con una breve descripción sobre el contenido que es relevante para el presente trabajo.

A. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

Artículo 123: del trabajo y la prevención social

Apartado "A", fracciones XIV y XV principalmente.

Apartado "B", fracción XI, en sus incisos a y b.

B. Ley Federal del Trabajo

Título IX

Referente a la legislación en relación a los riesgos de trabajo.

(Artículo 472 al 515)

C. Ley del IMSS

El artículo 48 de la Ley del Seguro Social determina que será el instituto el que hará la fijación del grado de riesgo, en atención a las malas medidas preventivas, condiciones de trabajo y demás características que influyen sobre el riesgo particular que existe en cada empresa.

D. Ley del ISSSTE

Artículo 3, secciones I,II,III,XII,XIII,XIV.

Estos hablan principalmente de los seguros que se proporcionan por enfermedades o accidentes de diferentes circunstancias.

E. Ley General de Salud

Esta ley reglamenta el derecho a la protección de la salud que tiene toda persona en los términos del artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

EL artículo 2°, se refiere a las finalidades del derecho a la protección de la salud. Tal como el bienestar físico y mental del hombre, para contribuir al ejercicio pleno de sus capacidades.

F. Secretaría de Salud

En materia de prevención y control de enfermedades y accidentes, corresponde al artículo 133, fracciones de la I a la IV.

G. Reglamento y Normas Generales de Seguridad e Higiene de la Secretaría del Trabajo y Prevención Social

Rige en todo el territorio nacional y tiene por objeto proveer en la esfera administrativa a la observancia de la Ley Federal del Trabajo en materia de seguridad e higiene, y de esta manera lograr disminuir los accidentes y enfermedades que se producen en los centros de trabajo.

La Secretaría de Trabajo y Previsión Social y las autoridades competentes de los estados y la capital del país, llevarán a cabo los estudios e investigaciones en los lugares de trabajo y los exámenes que estimen convenientes para los trabajadores, utilizando los equipos necesarios y los medios que la ciencia y la tecnología emplean para identificar y valorar las posibles causas de accidentes y enfermedades de trabajo. Todo esto para promover la expedición de las disposiciones correspondientes a establecer las medidas de seguridad e higiene.

H. Normas Oficiales Mexicanas

NOM-001-STPS-2008, Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo- Condiciones de seguridad.

NOM-002-STPS-2010, Condiciones de seguridad - Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.

NOM-005-STPS-1998, Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas.

NOM-010-STPS-1999, Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral.

NOM-014-STPS-2000, Exposición laboral a presiones ambientales anormales- Condiciones de seguridad e higiene.

NOM-015-STPS-2001, Condiciones térmicas elevadas o abatidas - Condiciones de seguridad e higiene.

NOM-018-STPS-2000, Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo.

NOM-019-STPS-2011, Constitución, integración, organización y funcionamiento de las comisiones de seguridad e higiene.

NOM-020-STPS-2011, Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas - Funcionamiento - Condiciones de Seguridad.

NOM-026-STPS-2008, Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías.

NOM-028-STPS-2012, Sistema para la administración del trabajo - Seguridad en los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas.

2.3.4 Seguridad industrial en plantas de refinación.

Actualmente, la industria petrolera ha concentrado su enfoque en la administración segura de procesos, como resultado de las consecuencias derivadas de accidentes catastróficos, causados por fallas en el control de equipos y tuberías o por el deterioro de los materiales con los cuales están construidos(as) (3). Como se ha apreciado con los accidentes ya anteriormente enlistados, esta industria, así como genera demasiada riqueza económica la contraparte toma un peso aún mayor ya que las pérdidas, por lo general, es más significativa.

En el país, la empresa paraestatal que se encarga de administrar las actividades referidas al petróleo es Petróleos Mexicanos (PEMEX), la cual implantó en Octubre de 1998 al 2005 el Sistema Integral para la Administración de la Seguridad y Protección Ambiental (SIASPA), debido a los recurrentes requerimientos de compañías aseguradoras y trasnacionales.

El SIASPA es un medio para dar cumplimiento a la política de seguridad industrial y protección ambiental de PEMEX, garantizando los más altos niveles de seguridad industrial y reduciendo al mínimo aceptable los impactos al medio ambiente, así como protección de la seguridad y salud de todos aquellos que participan de manera directa o indirecta en sus operaciones, tales como trabajadores, empleados, contratistas, visitantes y de las comunidades cercanas a los centros de trabajo, además de la protección a las mismas instalaciones (3).

En la actualidad, rige el Sistema para la Administración Integral de la Seguridad, Salud y la Protección Ambiental (SSPA), cuyo desarrollo empezó en el año 2006 y la cual se complementa y nutre con la experiencia ya acumulada por el SIASPA.

El sistema PEMEX-SSPA, está integrada por 3 áreas, de las cuales, el Subsistema de Administración de la Seguridad de los Procesos (SASP), es la única relevante en términos de documentar la inspección técnica.

Este subsistema se basa en la aplicación de las doce mejores Prácticas Internacionales en Seguridad, Salud y Protección Ambiental (MPI'S), y la aplicación del SASP, se justifica por la preocupación; y demanda una eficiente administración de la seguridad, derivado de los acontecimientos que tuvieron un gran impacto catastrófico, debido a fallas en el control de materiales o sustancias peligrosas.

2.4 Integridad mecánica

Toda tubería y equipo de proceso sufre un desgaste, originando daños mecánicos, este es mayor si se encuentra en servicio y/u operación, debido principalmente al fluido que circula. Otros factores que influyen en la integridad física de dichos componentes son las condiciones de operación y factores externos como las condiciones ambientales, ya sea si se encuentra bajo techo o al intemperie, este último menos estudiado debido a las condiciones climáticas heterogéneas.

La integridad mecánica se define como un conjunto de actividades interrelacionadas enfocadas para asegurar la confiabilidad de líneas y equipos críticos para que sea mantenida durante toda la vida de la instalación. Cubre desde la fase de diseño, fabricación, instalación, construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento, para garantizar que se cumplan las condiciones de funcionamiento requeridas, con el propósito de proteger a los trabajadores e instalaciones del centro de trabajo (4). Asimismo para reducir accidentes, asegurar la continuidad del proceso y cumplir con los estándares ambientales de contaminación atmosférica.

Los elementos que conforman la integridad mecánica son:

- Aseguramiento de la calidad de equipos.

- Procedimientos de mantenimiento.
- Capacitación de mantenimiento.
- Control de calidad de materiales y partes de repuesto.
- **Inspección y pruebas.**
- Reparaciones y modificaciones.
- Ingeniería de confiabilidad
- Auditorías.

Los elementos anteriores resultan ser un programa de integridad mecánica y cuando una planta lo adopta, habitualmente es reconocida y aceptada por sus buenas prácticas de ingeniería. Indudablemente un buen programa de integridad mecánica beneficia; al tiempo de asignar recursos, inclusive agiliza y facilita las tareas de mantenimiento por el personal. En este caso, al momento de hacer las inspecciones, se realiza de forma organizada, oportuna y correcta.

Las labores de inspección condicionan a una estructuración sistemática, la cual depende de un soporte legal, que sustente el registro, análisis y programación preventiva de espesores. En México, la seguridad en los centros de trabajo donde se realizan procesos con sustancias químicas queda sujeta a disposiciones implantadas por las normas oficiales mexicanas, elaboradas por la Secretaría de Trabajo y Prevención Social, que toma como las mejores prácticas, las contenidas en los códigos API.

La norma NOM-028-STPS-2004 (Organización del trabajo-Seguridad en los procesos de sustancias químicas), señala los puntos para conservar la seguridad de estos. Asimismo hay un apartado que se refiere a la integridad mecánica, en la cual se establecen los requerimientos y calidad de los dispositivos empleados en un proceso químico.

Nos dice que en cada centro de trabajo debería desarrollar y llevar a cabo los procedimientos escritos enfocados a mantener la integridad mecánica de los procesos y al mismo tiempo la documentación de todas las actividades que se realicen, junto con los resultados obtenidos, para revisar y corregir las imperfecciones observadas y detectadas.

Los requerimientos de integridad se aplican a tanques de almacenamiento, sistemas de bombeo y tuberías, incluyendo componentes como válvulas, programas de mantenimiento

preventivo, etc. Así como recomienda la forma en que debe de presentarse la documentación de los resultados de las inspecciones y pruebas, la cual es como la que se efectúa en SIMECELE.

2.5 Normatividad

Para el caso del SIMECELE, de donde se extrajeron los resultados para el presente trabajo, el método de inspección preventiva se basa en las siguientes guías:

- DG-SASIPA-IT-0204. Guía para el registro, análisis y programación de la medición preventiva de espesores.
- GPEI-IT-0201. Procedimiento de revisión de niplería de plantas en operación.
- GPEI-IT-4200. Procedimiento para el control de desgaste de niplería.
- DG-GPASI-IT-0903. Procedimiento para efectuar la revisión de la tornillería de tuberías y equipos en las instalaciones en operación de PEMEX-Refinación.
- GPASI-IT-0209. Procedimiento para efectuar la inspección de tuberías de proceso y servicios auxiliares en operación de las plantas de PEMEX-Refinación.

2.6 Desgaste

Este término involucra una disminución del espesor, en la vida útil de las tuberías, por lo que se debe hacer un estudio previo implementando un sistema de seguridad e integridad mecánica como ya se ha explicado.

Dicho desgaste implica una disminución en la medida estándar del espesor de la tubería, interna principalmente y externa, las cuales debe llevar un seguimiento conforme a los sistemas y/o programas ya mencionados.

El desgaste es un problema para la industria química y sus análisis suele ser complejo, ya que intervienen factores como: composición química, dureza, estructura, velocidad, rugosidad de la superficie, corrosión, distancia recorrida, etc.

El desgaste está definido como, “la pérdida de masa de la superficie de un material sólido por la interacción mecánica con otro cuerpo en contacto. Es específicamente la pérdida de material de una superficie, como resultado de una acción mecánica. La necesidad de una acción mecánica, en forma de contacto debido a un movimiento relativo, es una distinción importante entre desgaste mecánico y cualquier otro proceso con similares resultados”. Es

así como podemos señalar que el desgaste está relacionado con la interacción de superficies.

Hay 2 causas principalmente que influyen en el desgaste:

- Corrosión por causas ambientales y por el fluido que transporta.
- Desgaste ocasionado por la fricción al transportar el fluido, comúnmente llamado abrasión.

Estos 2 factores son más influyentes, cuando se cuentan con temperaturas y presiones elevadas, así como el régimen del flujo del fluido.

2.6.1 Abrasión

Es el más común en las industrias y se define como, “la acción de corte de un material duro y agudo a través de la superficie de un material más suave”. Tiende a formar ralladuras profundas cuando las partículas duras penetran en la superficie.

La abrasión es proporcional a la velocidad y cantidad de flujo, esto se fundamenta debido a que los mayores desgastes se han encontrado en tee’s, codos, injertos, y en general, en cualquier cambio de dirección del flujo.

2.6.2 Desgaste adhesivo

Este desgaste, también llamado por fricción o deslizante, es una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizante. Esto ocurre cuando dos superficies se deslizan, obvio, una sobre otra, bajo una presión determinada. El aspecto de la superficie desgastada será de ralladuras irregulares y superficiales.

2.6.3 Fatiga superficial

Se observa durante el deslizamiento repetido. Las partículas suspendidas entre dos superficies a una carga cíclica pueden causar fracturas superficiales y, por lo tanto, la destrucción de la superficie.

2.6.4 Corrosión

Es bien sabido que la corrosión es la causa general de destrucción en los materiales fabricados por el hombre y la naturaleza. Asimismo es un problema complejo, que no

puede ser resuelto por una simple tabla de referencia o unas tablas diseñadas para hacer una rápida selección del presunto material. La resistencia a la corrosión de un material varía, frecuentemente, de una forma radical con la temperatura y el grado de turbulencia, y estas condiciones nunca pueden ser anticipadas en una simple tabulación (5).

Aunque existen varias definiciones, los especialistas la definen como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora y, que incluso, puede afectar la integridad física y química de los objetos o estructuras. La corrosión metálica comprende la química y electroquímica.

La corrosión química se refiere al ataque por sistemas no electrolíticos, tales como gases, vapores a temperaturas que impidan su condensación sobre la superficie metálica o por líquidos no conductores de corriente eléctrica.

La corrosión electroquímica comprende la corrosión atmosférica en aire húmedo, la producida en suelos, y la provocada por medios electrolíticos (agua de mar, soluciones ácidas, sales y álcalis), y por sales fundidas.

Es en el sector químico, donde la corrosión encuentra su mayor auge, sin embargo, ha sido difícil reunir datos estadísticos sobre cuáles son los tipos o formas de corrosión que con más frecuencia han intervenido en estos casos. Empero, se puede suponer que la tendencia es prácticamente la misma que la existente en los casos usuales de corrosión en las plantas químicas. Un intento por cuantificar los tipos de corrosión, lo hicieron Gavelli y sus colaboradores en 1982, donde estudiaron 1,115 casos del banco de datos sobre corrosión del Instituto Guido Donegano. Con el fin de tener una idea de los tipos de corrosión que aquejan a este sector, sus resultados se muestran en la tabla 2.1, donde se observa que de los 12 casos de corrosión, los primeros 3 representan la causa principal de corrosión, sumando un 59 %.

Tabla 2.1 Cuantificación de los tipos de corrosión.

Tipo de corrosión	Porcentaje %
Corrosión bajo tensión	21
Corrosión uniforme	20
Corrosión - fatiga	18
Corrosión por picaduras	10
Corrosión - erosión	7
Corrosión en hendiduras	6
Corrosión a alta temperatura	6
Fluencia	4
Corrosión intergranulada	3
Fragilización por hidrogeno	1
Corrosión galvánica	1
Otros casos	3

Por otra parte, en lo referente a las causas de estos tipos de corrosión, las más comunes suelen ser los errores en la construcción y/o fabricación, especificación inadecuada de los materiales, diseño erróneo, funcionamiento incorrecto de la planta y un mantenimiento inadecuado.

2.6.4.1 Efectos de la corrosión sobre el medio ambiente

Debido a la gran variedad de industrias presentes en el sector químico, el impacto ambiental puede tener diferentes grados y características. Ahora bien, es evidente que su primera manifestación es la fuga de un gas o de un líquido y las consecuencias de esta fuga dependerán de las propiedades del fluido. Por ejemplo en la figura 2.1, presenta de manera concreta los escenarios ocasionados de una fuga debida a la corrosión.

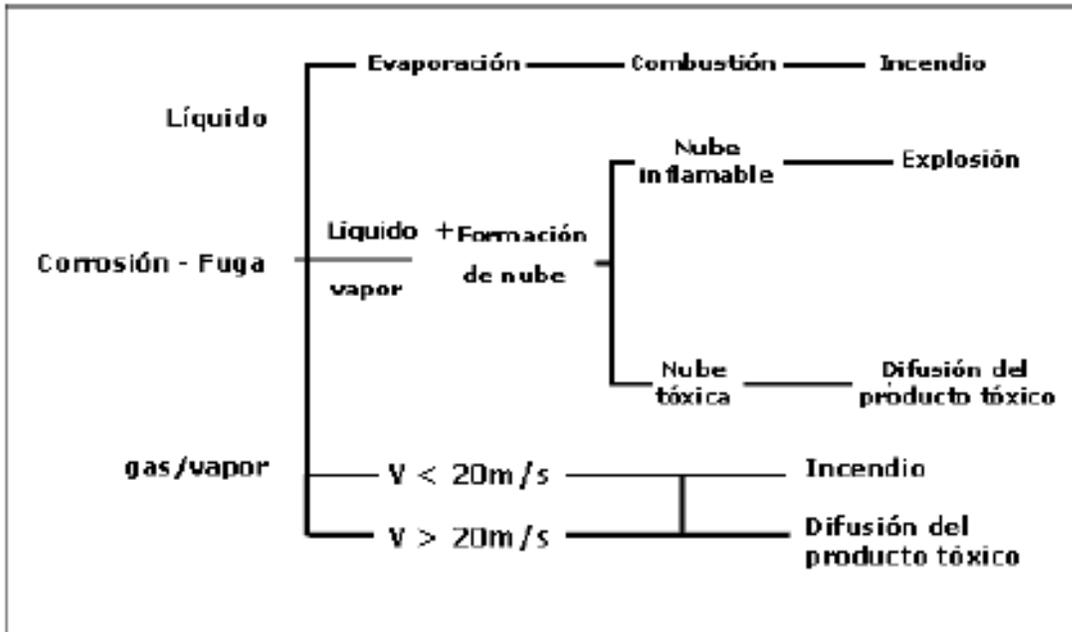


Figura 2.1 Efectos de la corrosión sobre el ambiente.

Las consecuencias finales, consisten en la fuga al ambiente de calor o productos de diversa toxicidad, además de provocar accidentes.

Por lo que es evidente la necesidad de tener impecables procedimientos y acciones de prevención contra la corrosión en aquellas plantas que, por el grado de peligrosidad de las materias primas y productos en los procesos, o por el almacenamiento de los mismos, sean propensos a ocasionar accidentes. Esta prevención en ocasiones suele estar presente desde el diseño inicial, pero se reduce cuando la planta experimenta modificaciones estructurales, así como de operación, que no son acordes con los requisitos de seguridad iniciales.

2.6.4.2 Electroquímica y corrosión

Una celda electroquímica está compuesta de un ánodo, un cátodo y un electrolito, donde el consumo de energía puede ser de dos maneras, por el mismo medio (celda galvánica) o por una fuente de corriente externa (celda electrolítica). Una celda de corrosión es una celda o pila galvánica en la cual las reacciones electroquímicas que tienen lugar conducen a la corrosión. La acción de estas celdas a menudo conduce a un ataque localizado, tal como picaduras o corrosión bajo tensión.

La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que indica siempre la existencia de una zona de oxidación (anódica), otra de reducción (catódica) y un electrolito. La corrosión más frecuente siempre es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas; el electrolito es, en caso de no estar enterrado o sumergido el metal, el agua condensada de la atmósfera, para lo que la humedad relativa deberá ser al menos de 70%.

2.6.4.3 Corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica es posible únicamente cuando la superficie metálica está humedecida, y por lo general, es la causa más frecuente de la destrucción de los metales y aleaciones.

En estas condiciones, el electrolito es una capa de humedad que va de ambos extremos, puede ser sumamente fina que no se perciba a simple vista, o ser perceptible en el metal con un espesor mayor a los 10 milímetros. La figura 2.2, muestra que la corrosión en espesores pequeños no existe (menores a los 10\AA), pues la resistencia óhmica de la capa del electrolito sobre la superficie metálica es muy grande y que al ir aumentando el espesor, se origina un incremento en la velocidad de corrosión debido a la disminución de dicha resistencia, llegando a un nivel máximo, que disminuye después con el aumento del espesor llegando a una zona de velocidad de corrosión constante, donde la difusión del oxígeno en la superficie es demasiado lenta, perdiendo importancia el factor óhmico y la polarización anódica.

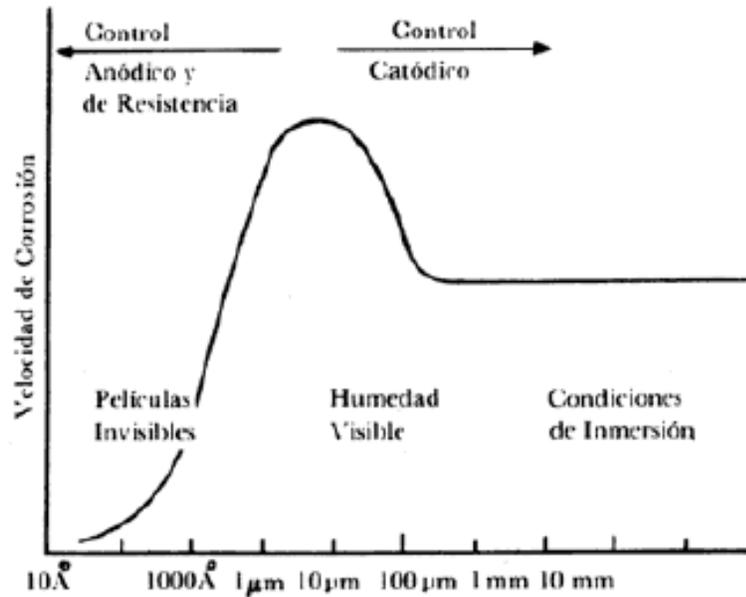


Figura 2.2 Influencia del espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión.

Los contaminantes gaseosos o sólidos incrementan el efecto corrosivo de los factores meteorológicos. Así, el proceso de corrosión depende fundamentalmente de la humedad relativa del aire y de los contaminantes presentes en el mismo.

La humedad relativa es importante en el grado de corrosión atmosférica. El hierro desnudo no se corroe en zonas urbanas ni industriales con una humedad relativa (HR) ambiente menor de 70%. La humedad crítica está asociada con la naturaleza higroscópica del sólido (capacidad de algunas sustancias de absorber humedad del medio circundante) contaminante presente, como la de los productos de corrosión. Sus valores oscilan entre el 50 y el 70% en el acero, cobre, níquel y zinc.

El proceso anódico se caracteriza por que el metal se disuelve en la capa del electrolito, en la cual la concentración se eleva hasta la precipitación de un compuesto poco soluble. En su contraparte, el proceso catódico, bajo la capa de humedad, la mayoría de los metales expuestos a la atmósfera se corroen por el proceso de reducción del oxígeno. Y en el caso de la resistencia óhmica entre las zonas anódica y catódica de las minúsculas pilas de corrosión que se distribuyen sobre el metal es grande cuando el espesor de la capa de humedad es pequeño.

La corrosión atmosférica puede ser clasificada en:

- 1) Corrosión seca: se produce en los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa (termodinámicamente inestables en el estado de reducción que se encuentran, por lo que tienden a oxidarse de manera natural).
- 2) Corrosión húmeda: requiere de la humedad atmosférica, y aumenta cuando la humedad excede de un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%.
- 3) Corrosión por mojado. Se origina cuando se expone el metal a la lluvia o a otras fuentes de agua.

2.6.4.4 Contaminación atmosférica

Esta se puede definir como la presencia en el aire de sustancias extrañas, ya sean gaseosas, sólidas o la combinación de ambas, en cantidad y durante un tiempo de permanencia que puede provocar efectos nocivos para la salud humana y un deterioro de los bienes de uso y del paisaje.

El cloruro de sodio (NaCl) y el dióxido de azufre (SO₂) son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. La correlación entre los niveles de concentración de estos contaminantes y la velocidad de corrosión es alta. El primero es un contaminante “natural” y llega a la atmósfera proveniente del mar (atmósfera marina). El SO₂ se encuentra en el aire, y es originado principalmente por la combustión de combustibles fósiles.

La acción conjunta de los factores de contaminación y los meteorológicos, determinan la intensidad y la naturaleza de los procesos corrosivos, y cuando actúan simultáneamente, aumentan sus efectos.

Por último, También es importante mencionar otros factores como las condiciones de exposición, la composición del metal y las propiedades del óxido formado, que combinados entre sí, influyen en los procesos de corrosión.

2.7 Corrosión de tuberías

Definiendo corrosión como “La destrucción gradual de un cuerpo metálico, causado por un ataque no provocado, de naturaleza química, mecánica o electroquímica, sino debido a la interacción de este con el medio ambiente en el que lo rodea”. Así que para la valoración

de integridad mecánica, es necesario identificar los tipos de corrosión comunes a los que se enfrenta la industria del transporte de hidrocarburos en refinerías y gas natural, que puede ser uniforme y localizada.

2.7.1 Formas de corrosión

La corrosión se presenta en las líneas de proceso en diferentes maneras, manifestándose principalmente en las formas mostradas en la figura 2.3, representando un riesgo debido a la disminución del espesor de pared y como consecuencia la disminución de la resistencia mecánica del mismo.

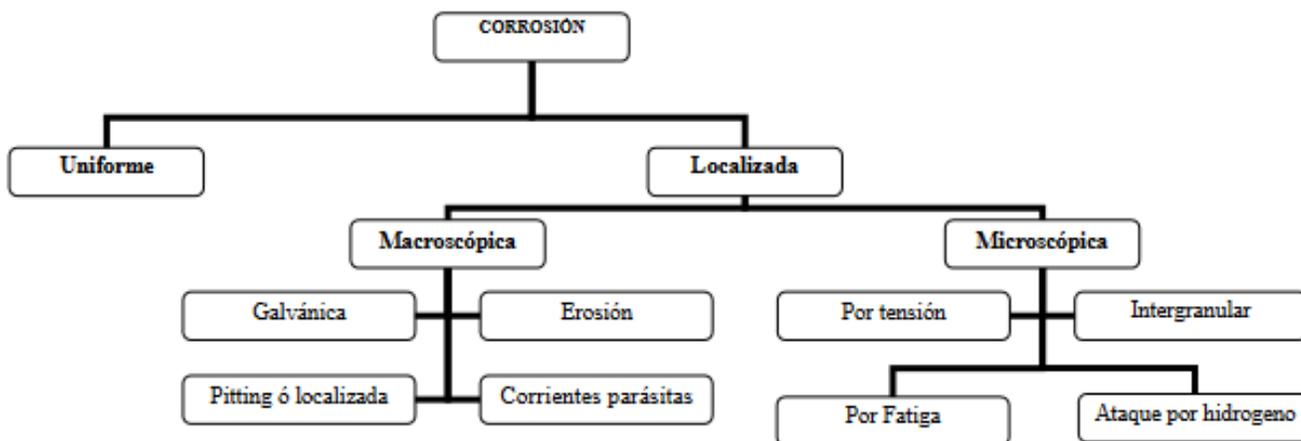


Figura 2.3 Formas de corrosión que afectan a las tuberías de proceso.

2.7.1.1 Corrosión uniforme

La corrosión uniforme puede ser descrita como un adelgazamiento progresivo y uniforme del componente metálico en toda la superficie del material, causando una pérdida general del material. Debido a la uniformidad, es relativamente fácil considerar un margen de corrosión que evitara fallas futuras.

Al considerar la existencia de corrosión uniforme, que rara vez aparece como única debido a factores geométricos, también se debe considerar la corrosión de manera desigual. La más frecuente de estas es el ataque en hendiduras, en el cual la corrosión se encuentra en los huecos, juntas y cabezas de tornillo y en dondequiera que exista una discontinuidad geométrica.

2.7.1.2 Corrosión localizada

El medio ambiente ataca de manera irregular a las estructuras metálicas, por lo que la corrosión se presenta en lugares delimitados, presentándose en lugares específicos. Este tipo de corrosión se origina por diferentes causas y se puede presentar de manera macroscópica o microscópica.

2.7.1.2.1 Corrosión macroscópica

Afecta al material de manera visible, siendo causada por diferentes principios, los tipos de corrosión macroscópica más comunes son:

2.7.1.2.1.1 Corrosión galvánica

Ésta se da cuando dos metales, o dos fases microestructurales, se encuentran en contacto entre sí, por medio de un electrolito, donde el metal que presenta un potencial de oxidación menor será oxidado (Ánodo), mientras que el que presenta el mayor potencial será reducido (Cátodo), así mismo esta propiedad se puede utilizar de dos maneras como medio de protección anticorrosiva denominadas “*Protección con ánodos galvánicos o de sacrificio*” y “*Protección catódica con corriente impresa*”.

2.7.1.2.1.2 Corrosión pitting (Picadura)

La corrosión por picadura es un tipo de corrosión altamente localizada que frecuentemente se observa en superficies con poca o ninguna corrosión general. Las picaduras ocurren como un proceso de disolución local anódica donde la pérdida de metal es aumentada por la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo grande. Las picaduras suelen ser de pequeño diámetro (décimas de milímetro) con acumulación de electrolitos. Las hendiduras se caracterizan por una limitación de la difusión de este modo, la solución que se encuentra dentro de ellas muy probablemente diferirá de la solución que inicialmente estuvo.

2.7.1.2.1.3 Corrosión por Erosión

Esta se presenta por el desgaste físico del material que es provocado por la velocidad de un fluido líquido o gaseoso y este se enfatiza más cuando el fluido lleva partículas sólidas.

En la tubería se presenta cuando existe un cambio de dirección de flujo, que normalmente se presenta con mayor énfasis en:

- 1) Codos: este es un cambio de dirección brusco lo cual afecta principalmente las paredes de este y las paredes inmediatas a la unión codo-tubería.
- 2) Reducciones: afecta principalmente el tramo de reducción y lo afecta según el caso: Reducción (Mayor a Menor), Reducción (Menor a mayor).
- 3) Bayonetas: Afecta principalmente la pared exterior al arco.

Este tipo de corrosión se disminuye al efectuar limpieza mecánica por el interior de la tubería para lo cual se auxilia de sondas de limpieza (“diablos de limpieza”), que a su vez elimina líquidos y sólidos, mejorando la eficiencia de flujo al disminuir el arrastre de líquidos.

2.7.1.2.1.4 Corrientes parásitas

También conocidas como corrientes vagabundas, son producidas por otras superficies metálicas con alta deficiencia de electrones, tal es el caso de estaciones de rieles de transporte, esta acción se ejemplifica en la imagen 2.2, donde se muestra perfectamente el flujo de electrones del ánodo hacia la zona deficiente de éstos, provocando el proceso de corrosión.

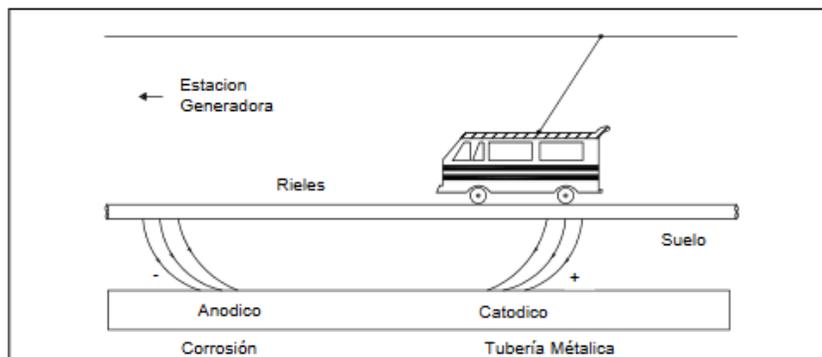


Imagen 2.2 Corrosión por corrientes parásitas.

2.7.1.2.2 Corrosión microscópica

Se caracteriza por que la cantidad de metal perdido es insignificante o nulo, sin embargo los efectos secundarios pueden ser grandes, ésta no es visible y requiere de procedimientos de inspección diferentes para su detección como lo son el ultrasonido, rayos X y líquidos penetrantes que pertenecen a pruebas no destructivas, así como

pruebas destructivas (hidráulicas, dureza y neumáticas), donde las más comunes se enuncian a continuación:

2.7.1.2.2.1 Corrosión bajo tensión (CBT)

Es un fenómeno que ocurre bajo la acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo, que se manifiesta en un material metálico, mediante una falla mecánica por agrietamiento. El origen de este fenómeno se encuentra en defectos internos y superficiales de un material metálico producidos por trabajos en frío, soldadura, tratamiento térmicos, o bien, ocurren durante una operación extrema durante el funcionamiento. Las fracturas pueden seguir caminos entre granos como en la imagen 2.3, que por lo regular presentan una tendencia a la ramificación.



Imagen 2.3 Corrosión por tensión.

2.7.1.2.2.2 Corrosión Fatiga

Corrosión que se manifiesta por fractura al soportar esfuerzos de tensión cíclicos, y se presenta con o en ausencia de medios corrosivos. La deformación cíclica que se produce conduce a la formación de grietas superficiales, que se propagan en ángulo recto con la dirección de la tensión principal. Estas fallas suelen ser habituales en estructuras sometidas a vibración continua, provocando que el material llegue al punto de falla muy por debajo de los esfuerzos que se pueden considerar permisibles en referencia a las bases de diseño. El punto de falla se puede localizar en un diagrama del esfuerzo (σ , relación de fuerza sobre área transversal), en función de la deformación unitaria (ϵ , producto de la fuerza aplicada, sobre el área transversal a la aplicación de dicha fuerza y por el módulo de elasticidad del material). La siguiente imagen 2.4, muestra un diagrama convencional y real del esfuerzo-deformación unitario para un material.

Este Diagrama es muy importante en la Ingeniería, ya que proporciona los medios para obtener datos sobre la resistencia a tensión o compresión de un material sin considerar el tamaño o forma geométrica del material.

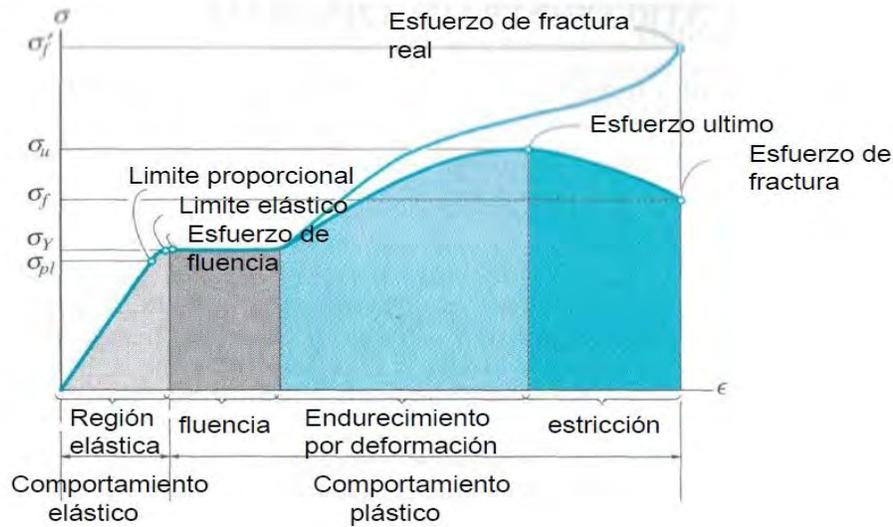


Imagen 2.4 Comportamiento elástico.

2.7.1.2.2.3 Intergranular

Ésta ocurre entre los límites de grano, que durante su solidificación no llegaron a encajar correctamente formando celdas vacías como lo muestra la imagen 2.5, provocando que se vuelva susceptible a una corrosión interna. Esta se puede detectar por un radiografiado industrial, debido a que el ataque ocurre inicialmente en la superficie, pasando a la celda vacía.

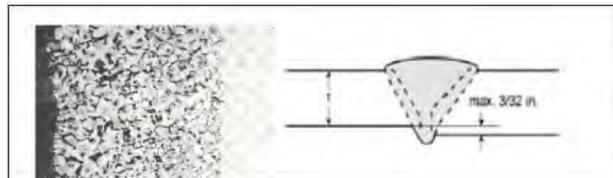


Imagen 2.5 Corrosión intergranular.

2.7.1.2.2.4 Ataque por hidrogeno

Es originado por la presencia de hidrógeno atómico adsorbido por el metal durante el proceso de refinación o de soldadura, que debido a la disociación del gas dentro del metal produce:

- a) El hidrógeno gaseoso que se forma en las superficies interiores, se encuentre a una presión elevada y por lo tanto, ejerza una fuerza expansiva (tracción).
- b) Los átomos de hidrógeno en los bordes de grano disminuyan las fuerzas de cohesión entre granos adyacentes. Su manifestación más frecuente es el agrietamiento de juntas soldadas y otros aceros endurecidos cuando quedan expuestos a ambientes con hidrógeno.

Además de generar una pérdida en la ductilidad (fragilización por hidrógeno) y fallas por rotura o formación de burbujas en el acero.

2.8 Transporte de fluidos por tuberías.

Todas las sustancias que pueden fluir y circular son conducidas y distribuidas principalmente por medio de tuberías. El flujo de materia, es un aspecto importante en tecnología y economía para la industria. Desde siempre, la tubería ha cumplido su importante función como sistema de transporte, tanto en el abastecimiento público de gas y agua, como en la distribución industrial de energía y fluidos dentro de la fábrica; ha contribuido, además, en el activo intercambio de fluidos muy variados entre grupos de fábricas con funcionamiento conjunto de la industria siderúrgica, minera y química (6).

La tubería resulta indispensable en un abastecimiento de cualquier distancia, además con el desarrollo de la industria y la creciente necesidad de energía, se le atribuye un papel cada vez más importante.

A continuación se verán aspectos básicos de la materia de flujo de fluidos, debido a que es otro factor a tomar en consideración para el desgaste, ya que algunos conceptos de esta materia están relacionados con las condiciones de operación, ya sea por el flujo, el régimen del flujo, o aspectos más físicos, como las propiedades del fluido y su dependencia con la temperatura y presión.

2.8.1 Flujo de fluidos

El transporte de fluidos puede presentarse en una o más fases. Al primer caso se le denomina flujo de fluidos homogéneos y el segundo es llamado flujo de fluidos heterogéneos.

Para el presente trabajo se hablará un poco de las características del primer caso, debido a que los fluidos a estudiar se presentan en una sola fase. Se abordarían los fluidos heterogéneos si tuviéramos el caso particular de transporte de catalizador en alguna unidad de control o servicio, pero no es el caso.

2.8.2 Fluidos homogéneos

Como ya se mencionó, los fluidos transportados se presentan normalmente en una sola fase, sin embargo, hay casos en que la homogeneidad se ve alterada por presencia de otras fases o estados de agregación, por ejemplo, gases o vapores en líquidos próximos al punto de ebullición. Para este caso, el fluido ha de ser considerado como mezcla heterogénea, con sus correspondientes leyes de flujo en tuberías, que cabe aclarar que si son rotundamente diferentes.

2.8.2.1 Características de los fluidos

Se tomará como base el Sistema Internacional de Unidades (SI), para describir algunas propiedades de los fluidos.

Los fluidos que son transportados por medio de tuberías son líquidos o gases, en primera instancia se hablará de los líquidos y posteriormente de los gases

2.8.2.1.1 Densidad

La masa referida al volumen es de las propiedades más importantes de los fluidos, designada como:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{kg}{m^3}$$

Ecuación 1

La densidad de los líquidos es totalmente independiente de la presión. La pequeña compresibilidad existe a presiones muy altas y, por lo tanto, no tiene importancia para el transporte por tuberías.

Es importante mencionar que la densidad del agua se comporta en principio de diferente manera que la de los aceites u otros hidrocarburos, ya que para estos la influencia de la temperatura es aún mayor. Es decir, la temperatura ejerce un efecto mayor en estos, haciendo que su valor descienda de forma más pronunciada.

La dependencia de la densidad de los gases respecto a la presión y temperatura está dada por la ley de los gases ideales en un principio, y esta es directamente proporcional a la presión e inversamente a la temperatura, pero ya que ésta generalmente no puede ser aceptada o empleada debido a las altas presiones a las que son sometidos los gases y estos se asemejan a los vapores debido a que se encuentra en la zona de saturación o próxima a esta, se debe introducir el término de compresibilidad K .

En ocasiones también se hace el uso de densidad relativa tanto para líquidos y gases, la primera es comúnmente referida al agua y los gases al aire. En el caso de tener mezcla de gases se aplica la regla de las mezclas, en el cual es necesario emplear los términos de densidad y volúmenes parciales de cada gas.

2.8.2.1.2 Viscosidad dinámica y cinemática

Es el factor de proporcionalidad en la ecuación de Newton, con la cual se caracteriza la propiedad del fluido de oponer resistencia al desplazamiento.

La viscosidad dinámica tiene unidades de Ns/m^2 . Sustituyendo el valor de la fuerza o Newton se obtiene kg / ms , pero se emplea en Poises con la unidad $1\text{P}=1\text{g}/\text{cm s}$, que generalmente es utilizado solo para viscosidad dinámica (η) por fines prácticos.

En el movimiento de los fluidos se utiliza además la viscosidad cinemática (ν) en m^2/s . aquí se emplea el término Stokes que tiene como unidades cm^2/s . Esta resulta de la división de la viscosidad dinámica entre la densidad.

La viscosidad de los líquidos disminuye con el aumento de temperatura al contrario de lo que ocurre con los gases. La influencia de la temperatura sobre la viscosidad es grande y diversa, además de, depender de la estructura molecular, en el caso de crudos de petróleo y aceites. Por ejemplo, el petróleo Texas, su viscosidad dinámica a 10°C aumenta 15 veces con respecto a la correspondiente a 60°C y en el petróleo pérsico hasta 60 veces. Algunos petróleos a temperaturas muy baja precipitan en parafinas y en este caso ya no sirve la ecuación de Newton para viscosidad, es decir la viscosidad ya no puede ser considerada constante.

Cabe resaltar que los valores de la imagen 2.6 son orientativos, ya que la influencia de la composición suele ser muy diversa. Como se aprecia los petróleos que se encuentran en la parte superior, tienen un mayor impacto en el valor de su viscosidad en función de la temperatura, por ejemplo, se observa que el de Rumania decrece a razón de 10% aproximadamente cada 10°C y que posee la misma densidad que el de México.

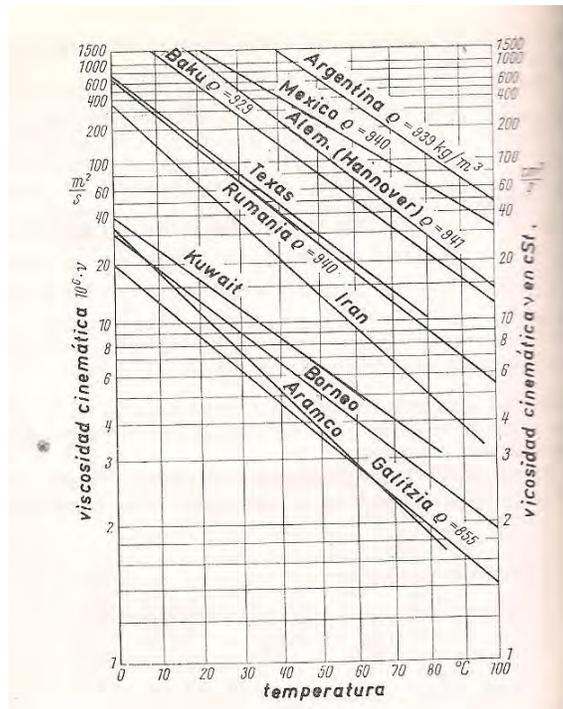


Imagen 2.6 Valores orientativos de la viscosidad cinemática de petróleos en función de la temperatura (densidad referida a 15°C).

Respecto a los gases, ya se había mencionado su comportamiento en función del aumento de temperatura, donde su viscosidad dinámica tiende a aumentar, y puede ser calculada a través de la relación de Sutherland.

$$\eta_t = \eta_n \sqrt{\frac{T}{273}} * \frac{1 + \frac{c}{273}}{1 + \frac{c}{T}}$$

Ecuación 2

Siendo:

η_t Viscosidad dinámica a 0°C.

η_n Viscosidad dinámica a t°C.

T temperatura en °K.

C Constante de erland.

La constante puede ser fácilmente encontrada en literatura de propiedades físicas y químicas de líquidos y gases.

La presión influye cuando tiene un valor alto, por ejemplo, la viscosidad dinámica del aire a 50 atmósferas aumenta en 7% aproximadamente con respecto a 1 atmósfera. Además hay que mencionar que esta viscosidad sirve para caracterizar el régimen de la corriente mediante el Reynolds.

Se ha demostrado que en gases es ventajoso utilizar exclusivamente la viscosidad dinámica, para realizar cálculos, totalmente independiente de la presión.

Y para terminar con viscosidad, el cálculo para una mezcla de gases no se puede realizar con una sencilla regla de mezclas, ya que esta es totalmente inaplicable, sobre todo si la mezcla contiene hidrógeno. Esta será determinada con la ecuación empírica de Herning-Zipperer, la cual tiene la estructura de la regla de las mezclas en combinación con la ecuación anteriormente plasmada de Sutherland. Con esta ecuación se obtiene una exactitud de $\pm 2\%$, y es utilizable también para altas temperaturas.

2.8.2.1.3 Ley de semejanza y número de Reynolds

Según la ley de semejanza, las corrientes son mecánicamente semejantes en tubos de diferentes diámetros, con diferentes velocidades y sustancias, si los números de Reynolds en dichas corrientes son de igual magnitud.

El número de Reynolds toma en cuenta como la velocidad característica, a la velocidad media del fluido, la longitud característica a diámetro del tubo, la densidad y la viscosidad del fluido mediante la siguiente relación:

$$Re = \frac{vd\rho}{\eta} \text{ o } Re = \frac{vd}{\nu}$$

Ecuación 3

En el cálculo de Re para líquidos, se utiliza preferentemente el segundo término de la ecuación 3 y para gases es conveniente aplicar el primer término donde se observan la densidad y viscosidad dinámica, puesto que la η solo depende de la temperatura, salvo en el caso de presiones muy elevadas como ya se había dicho.

El valor de Re es adimensional y el valor que resulte del cálculo determinará el tipo de régimen que se tenga en el flujo.

2.8.2.1.4 Régimen del fluido

De manera general, se puede determinar el régimen a través del cálculo del Reynolds, así que aquí, la parte importante es dar el intervalo en que existe cada régimen.

Para los propósitos ingenieriles se considera que el flujo en tuberías es laminar si el Re es menor de 2100 y turbulento si es mayor de 10000 (7). Por lo tanto, al valor intermedio entre estos 2 valores se le considera transitorio y este es irrelevante tanto para cálculos y estudios.

Flujo laminar

El perfil de velocidades formadas sobre la sección de tubo tiene la forma de una parábola, teniendo su velocidad máxima en el centro del diámetro. En la corriente laminar, exclusivamente actúan fuerzas de viscosidad, se presenta solamente en tubos muy estrechos o velocidades muy pequeñas o, en el caso de una conducción de fluidos muy viscosos.

Flujo turbulento

Aquí el perfil generado es aplanado, salvo sus extremidades, las cuales están cercanas a la pared de la tubería, en esa parte es importante señalar que las partículas se mueven en régimen laminar en capas muy finas según la teoría de la capa límite de Prandtl. Desde el valor máximo en el eje del tubo, la velocidad disminuye lentamente a medida que aumenta la distancia, y desciende rápidamente a 0 en la proximidad de la pared.

La idea de que en régimen turbulento existe una capa límite laminar que se mueve también a lo largo de la pared del tubo y de que no queda afectada por el movimiento turbillonario del núcleo central, ha resultado muy fructífera en todos los estudios físico-matemáticos de los fenómenos de flujo y ha desempeñado un importante papel en los ensayos posteriores sobre los coeficientes de rozamiento (6).

En tanto que en corriente laminar el perfil de velocidades siempre es una parábola uniforme, en la corriente turbulenta existe una dependencia de la distribución de velocidades con respecto al número de Reynolds. Mientras el Re aumente, el perfil es más plano y más uniformes son las velocidades en la sección de tubo.

En tubos muy rugosos, la influencia de Re sobre las distribuciones de velocidad, es pequeña, pero por otra parte, el perfil se hace más puntiagudo debido a la acción retardadora de la corriente por el rozamiento.

Se ha encontrado que la velocidad media, para flujos turbulentos, se encuentra a una distancia de la pared de 0.019d (diámetro), y es independiente de Re, así como de la rugosidad de la pared. Además, la delgada capa límite decrece significativamente con el aumento de Re, lo cual es importante para el coeficiente de rozamiento.

2.8.2.1.5 Ecuación de Bernoulli

Esta ecuación se aplica para fluidos compresibles (gases) e incompresibles, la cual es un balance de energías que pudiesen encontrarse en el sistema de estudio. Obviamente las restricciones están en función del sistema como tal, ya sea de su posición, accesorios, presión, velocidad constante, etc. y así ésta podrá ser más fácil de determinar, en función de las restricciones establecidas, para el fin que se busque. Por lo general se busca encontrar la potencia necesaria de la bomba para hacer circular el fluido o la energía perdida por fricción.

$$\Delta Z * g + \frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} = -\frac{P}{M} - \frac{\sum F}{M}$$

Ecuación 4

Siendo:

ΔZ Diferencia de altura del punto 1 al punto 2.

g Gravedad.

Δp Diferencia de presiones del estado 1 al 2.

ρ La densidad del fluido en estudio.

Δu^2 Diferencia de la velocidad que se maneja dentro de la tubería del punto 1 al 2.

P La potencia en caso de ser necesaria.

M El flujo o gasto másico.

$\sum F$ La suma de las fuerzas de fricción.

El primer término de la ecuación se refiere a la energía potencial, la cual se debe a la posición que guarda el cuerpo. Después se tiene la energía de presión, que se define como parte de la energía interna de un cuerpo que puede hacer trabajo, o también aquella energía que tiene un fluido debido a la presión que se encuentra. Posteriormente se encuentra la energía cinética, resultante de la velocidad con la que se mueve el cuerpo. Posterior del signo de igualdad encontramos al término de la potencia, en cual procede del balance de energía que se efectúa antes de llegar a la ecuación 4. La energía de fricción representa la energía perdida debido a la fricción cuando el fluido pasa a través de las diferentes partes de un sistema.

El teorema de Bernoulli puede ser definido de la siguiente manera, “a lo largo de cualquier línea de corriente, la suma de las alturas cinéticas, de presión o piezométricas y potencial es constante”.

Este teorema no es más que el principio de la conservación de la energía, ya que cada término de la ecuación representa una forma de energía, en la cual un aumento, por ejemplo, de energía cinética, solo puede realizarse a costa de la energía potencial.

En general, para fluidos incompresibles o líquidos, la velocidad que circula en un tramo de tubería varía con relación inversa al área o su diámetro al cuadrado, por lo tanto, mientras se aumente la sección transversal de la tubería a lo largo de la línea de proceso, la velocidad decaerá según la ecuación de continuidad, pero esta puede mantenerse para un tramo de tubería recta constante, y ahora la presión disminuirá de forma lineal.

Para los fluidos compresibles o gases, estos se expanden con disminución de la presión a lo largo de la tubería, se habla entonces de una conducción expansiva, al contrario de un fluido con volumen específico constante, entonces se deduce que su densidad es variable y disminuye. Aquí la velocidad suele aumentar mientras la densidad disminuya en el transcurso del transporte ya que esta es inversamente proporcional a la velocidad. Para el caso de un tramo de tubería constante con un gas a alta presión, es decir, no ideal y, además presentando rozamiento en las paredes, el comportamiento de la presión y la velocidad es totalmente diferente que en el caso de líquidos, decrece la presión de forma exponencial y la velocidad aumenta también de esta forma.

2.8.2.1.6 Coeficiente de rozamiento en la tubería

Hay diversas ecuaciones básicas para obtener el coeficiente de rozamiento (λ), pero estas carecen de una estructura clara y pierde en el plano información sobre interrelaciones físicas y diversos factores influyentes. Lo que se busca en este apartado, es simplemente resumir el comportamiento que se da en la tubería.

Para el régimen laminar, el obtener este coeficiente resulta el mismo para pared lisa y/o rugosa del tubo y este es inversamente proporcional al Reynolds, por esto se puede hacer la deducción de que la viscosidad del fluido, es la que da el significado del valor de este coeficiente.

Con respecto al régimen turbulento y una pared de tubo lisa, la deducción de la obtención de este coeficiente resulta más compleja; simplemente se indicará que el concepto de capa límite de Prandtl y los experimentos de Göttinger, se tiene una representación clara para ser comprendida por un técnico. Este coeficiente en estas condiciones disminuye más la zona de Reynolds transitorios que en turbulentos. En relación a una pared rugosa, resulta importante conocer que la rugosidad varía dependiendo del fabricante y la clase

del material. Asimismo, el coeficiente depende ahora del tamaño de los relieves (k) de rugosidad referidos al diámetro (d/k), el cual si este valor aumenta, quiere decir que el tamaño de los relieves disminuyen y por consiguiente el coeficiente de rozamiento también.

Para terminar de hablar de fluidos homogéneos, simplemente quisiera mencionar que también existe un fenómeno de derrame, es cuál se refiere a la cantidad de fluido por unidad de tiempo que puede salir de un orificio, este ya sea hecho por cuestiones de operación, o en su defecto, causado por la corrosión y originando fugas que podrían causar accidentes.

2.8.3 Fluidos heterogéneos

Principalmente se transportan partículas sólidas en una corriente de líquido o gas a través de una tubería y a esto se le denomina, fluido homogéneo. Este tiene la aplicación práctica en dragado de arena y grava, en silos cereales, en el transporte de escorias en las siderúrgicas y también en la explotación interior de minas.

2.9 Material

El empleo de tuberías ha prevalecido desde tiempos antes de cristo, se presupone que una gran cantidad de materiales han sido utilizados para emplearlos como tal y lograr satisfacer la necesidad para la cual se ocupa. Por ejemplo, tuberías de arcilla de 4000 años a.C. han sido encontradas en las ruinas de babilonia.

Como se sabe, la fabricación se ha tenido que ir reinventado por los requerimientos de los diversos procesos que existen en la industria, es así como de emplear madera y hierro fundido, se procedió a utilizar aleaciones y, en general, a cambiar la composición química del acero y diferentes materiales, para cumplir con los requerimientos que exige la industria moderna, y mantener la seguridad en la planta.

A finales del siglo XIX y principios del XX, las plantas de proceso habían adquirido ya un permanente incremento de presiones y temperaturas de operación, esto derivó la necesidad de tubería estandarizada que la Asociación Americana de Estándares, por sus siglas en inglés ASA, cubrió satisfactoriamente en un principio.

Las normas de tuberías aprobadas por ASA, comprenden la mayoría de las normas americanas que rigen el diseño de sistemas de tuberías, las dimensiones y clasificación de tuberías, dimensiones y accesorios. La mayoría de estos estándares están apadrinados por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), la Asociación Americana de Obras Hidráulicas (AWWA), y la sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM) (5).

2.9.1 Selección de tuberías

Las principales variables en la selección de tuberías son: temperatura, presión, corrosión y costo. El primer factor a tomar en consideración es la corrosión, la cual como ya se mencionó, varía de forma radical con la temperatura y el grado de turbulencia, es por esta razón que las tablas resultan un criterio insuficiente y se recomienda consultar a una persona especializada en ese tipo de problemas.

Después de la selección, basándose en el aspecto corrosivo, se debe hacer en función de la temperatura, presión y costo.

Como se aprecia en la imagen 2.7, para el material acero al carbono, ya sea soldado o sin costura con especificación ASTM A-53 sin importar grado A o B, que más adelante lo abordaremos, el costo tiene la relación más pequeña para estos materiales, aunque también es importante resaltar que esta relación es la misma comparada con tuberías no metalizadas.

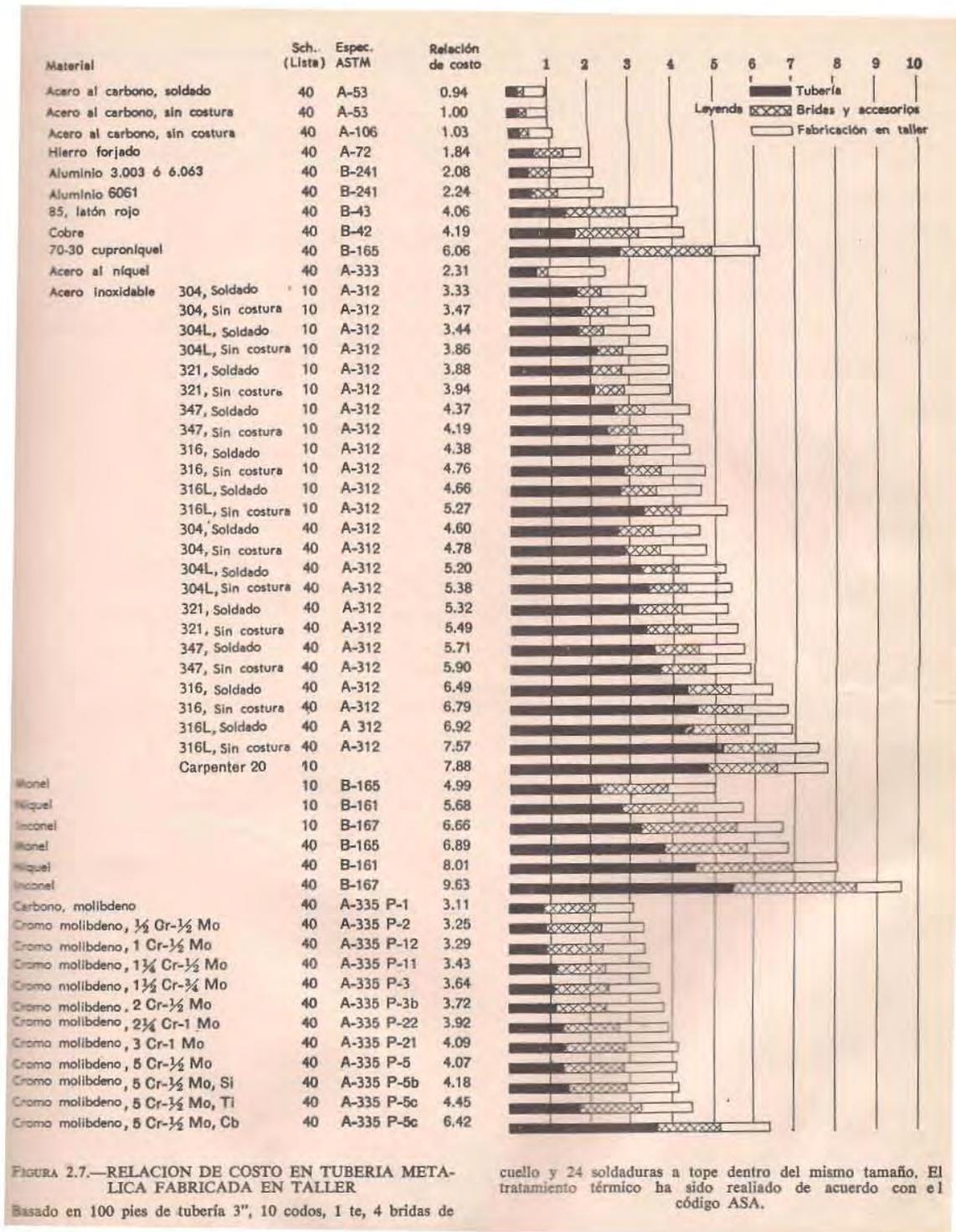


Imagen 2.7 Relación de costo en tubería metálica fabricada en taller.

En relación al material ASTM A.335-P5 o P3, el cual también es empleado en los circuitos de la refinería, se observa que la relación es notablemente superior en costo y, que sus valores triplican al de nuestra clase en estudio.

El material de tubería no metálica que tiene una relación en costo más cercano es el cloruro de polivinilo (PVC) con 1.79, y el segundo más caro es acero al carbón recubierto de vidrio.

La capacidad de una tubería para resistir unas condiciones de presión y temperatura, varían con el material, y es particularmente marcada a altas temperaturas. Esta variación está directamente ligada con la fatiga admisible (S), o coeficiente de trabajo. De esta manera, una medida de la economía relativa de un material es su fatiga admisible a cada temperatura, dividida por el costo relativo. Este índice, es la cantidad de fatiga admisible S, que se puede adquirir por la unidad monetaria: dólar, peso, euro, etc.

A continuación se presentan las tablas 2.2, 2.3, 2.4; la primera enfocada a la comparación de propiedades que tienen los diversos materiales, la segunda, también es comparativa, pero ahora de fatigas admisibles y, la tercera, la cual muestra valores de fatigas admisibles de otros materiales, manteniendo la presión constante y un rango de temperaturas que se utilizan en las plantas de proceso. Cabe aclarar que en estas tablas está incluido el material, ASTM A-53 Gr. A. Este material tiene una composición un tanto similar al Gr B y, este último encuentra presente en los circuitos y es parte de nuestro estudio, por lo cual, también resulta demostrativo y sustancial analizar estas tablas.

Se puede apreciar con lo que se representa en la tabla 2.2, es que el peso del A-53 Grado A, es mucho mayor comparado con los materiales no metálicos, que no tiene valor aplicable a la resistencia a flexión como los demás metales, que tiene el 3er lugar referente a la resistencia a compresión, tiene el mayor número de elasticidad en libras por pulgada de tubería, que su coeficiente de dilatación es el mayor con respecto a la temperatura, no es inflamable, que la longitud máxima es de 20 pies o 6 metros, y los diámetros estándar de fabricación es de ¼" a 24", para valores más altos, es necesario un pedido especial o ir directamente a los almacenes especializados.

En la tabla 2.3, se destaca que su valor de resistencia a la tracción, lo cual es el máximo esfuerzo aplicado a la tubería para moverlo hacia el origen de donde proviene el esfuerzo antes de romperse, está solamente por detrás del acero inoxidable al igual que la fatiga tangencial, su presión admisible a 23 °C, es 1,820 libras por pulgada cuadrada, que

transportando este valor a las unidades que se manejan en el SIMECELE son 127.96 kgf/cm² o con un valor más familiar son 123.84 atmósferas, y por último, a la temperatura máxima de operación que son 1000 °F o 537.79 °C, la presión máxima de operación es 19.97 kilogramos fuerza por centímetro cuadrado o 19.33 atm. Con estos valores se estima que el material resiste elevadas temperaturas y presiones, la cuales están en el rango de condiciones de operación de los circuitos a estudiar.

Y por último en la tabla 2.4, respecto a la elección del material de la tubería, se debe seleccionar aquella que tenga el valor más alto de fatiga admisible o coeficiente de trabajo S, en este caso en función de la temperatura y, se encontró que el material más económico es el A.53 Grado B sin costura, para un rango de temperaturas de 20 a 900 °F o -6.67 °C a 482.22 °C, para 950 °C es el A.335 grado P12 sin costura, a 1000 °F es el mismo material pero grado 11, de 1050 °F a 1150°F, es el A 213 tipo 347 sin costura y de 1200 °F a 1500 °F es el A 213 tipo 316 sin costura.

Tabla 2.2 Comparación de propiedades físicas y mecánicas para varios materiales utilizados en tuberías a 23°C.

	Peso específico	Resistencia a flexión lb/ft ²	Resistencia a compresión lb/ft ²	Módulo de elasticidad 10 ⁶ lb/ft ²	Resistencia mod. p.e. lb/ft ²	Temperatura de operación recomendada 124 lb/ft ²	Máxima de operación recomendada 124 lb/ft ²	Coeficiente de dilatación 10 ⁻⁶ in/in/°F	Conductividad térmica		Longitud mínima estándar, pie	Diámetros nominales estándar, in
									Btu/ft ² /hr/ft	% in		
Poliéster (tipo I y II)	0.910-0.940	1,700-2,700	.....	0.2-0.6	Más de 15	100-120	126	6-14	1.8-2.3	0.9-1.1	25	1/2-6
Poliéster (tipo III)	0.941-0.985	3,700-6,600	.....	0.6-1.7	1.2-12	120-125	150	6-9	2.3-3.2	0.9-1.1	300	1/2-6
Bulkado acetato de celulosa (hecho sulfonado)	1.2	3,700-6,200	3,700-6,300	1.2-1.4	1.0-3.0	140-155	140	6-10	1.1-2.2	1.3	20	1/2-6
Acrílico-butadieno-estireno (ABE tipo I)	1.04-1.07	7,500-8,000	3,000-7,000	1.8-3.0	4.0-9.0	185-190	170	3.0-6.0	1.0	1.0-1.3	20	1/2-12
Acrílico-butadieno-estireno (ABE tipo II)	1.06-1.08	12,000	10,000	3.5-4.0	4-6	200-225	180	3.8-5.6	1.0-1.8	1.3	20	1/2-12
Cloruro de vinilideno (PVC)	1.7	4,000-7,000	7,500-8,300	0.4-0.8	0.3-1.0	130-150	150	7-11	0.8-0.9	Autoextinguible	10	1/2-6
Cloruro de polivinilo (PVC tipo I)	1.35-1.43C	12,000-17,000	8,000-11,000	4.0-3.4	0.6-0.9	160-180(C)	150	2.9-6.7	0.8-1.2	Autoextinguible	20	1/4-12
Cloruro de polivinilo (PVC tipo II)	1.35-1.45	3-30C 11,500	8,000	2.5-3.5	0.1-8	150-155	140	6-14	1.3	Autoextinguible	20	1/4-12
Amianto (fibroso (Hw/ff))	1.7	6,500	10,000-14,000	8.7	0.48	.....	165	1.1-1.8	3.0	No inflamable	10	1/4-12
Poliéster (reforzada con vidrio)	1.3-2.0	Hasta 65,000	Hasta 40,000	Hasta 30	Más de 10	.....	200	1.2-4	1.5	Autoextinguible a combustión lenta	20	1-2
Epoxi (reforzada con vidrio)	1.7-2.2	Hasta 80,000	Hasta 60,000	Hasta 30	Más de 10	.....	300	0.7-0.9	0.9-2.5	Autoextinguible a combustión lenta	20	2-8
Acero al carbono (A53 Grado A)	7.8	.....	48,000	300	Excelente	.....	1,000	6.67	360	No inflamable	20	1/4-24
Acero inoxidable (18/8)	8.0	.....	75,000	280	Excelente	.....	1,500	0.93	110	No inflamable	20	1/4-24
Cobre (sin soldadura recocido)	8.9	.....	30,000	170	Excelente	.....	400	0.95	2700	No inflamable	.....	1/8-12
Aluminio (recocido 3003)	2.7	.....	14,000	100	Excelente	.....	400	1.3	1320	No inflamable	.....	1/8-10
Vidrio borosilicato	2.2	1,600	180,000-180,000	58	Baja	.....	450	0.18	8.0	No inflamable	10	1-6
Grado impermeable (variedad)	1.9	4,700	9,000	23	Baja	.....	340	0.24	1020	No inflamable	9	1-10
Cemento duro (Buna N)	1.1-1.5	11,000	7,000-12,000	3.0	0.3-0.4	275	225	2.6-4.0	1.0	Combustión lenta	10	1/4-6

NOTAS:
 Los puntos indican propiedades no aplicable.
 El blanco indica falta de datos.
 Para los plásticos se han dado el módulo de flexión, para otros metales, el módulo de elasticidad (Young).
 a) Longitudes rectas para 3", 4", 6", 8", tamaños menores en rollos hasta 400 pies.
 b) Longitudes rectas para 3", 4", 6", 8", tamaños menores en rollos hasta 400 pies.
 c) Tubería extruida hecha de resina. Montación Vija, tiene un peso específico de 1.51 y una temperatura de operación de 175-277° F.

Tabla 2.3 Comparación de fatigas admisibles, presiones y temperaturas (Base tubería 2" "pulgadas").

Material	Esp. (in) de tubería	Diámetro exterior, in.	Diámetro interior, in.	Espesor de pared, in.	Resistencia a la tracción (larga duración), a 73.4° F.		Fatiga tensil (larga duración), a 73.4° F.		Presión de trabajo nominal, a 73.4° F.		Temperatura máxima de operación recomendada, °F	
					lb/in ²	kg/cm ²	lb/in ²	kg/cm ²	lb/in ²	kg/cm ²	Alta	Baja
Poliétileno (tipo y II)	Sch. 40	2.375	2.067	0.154	1,400-1,900	335	50	24	120			
Poliétileno (tipo III)	Sch. 40	2.375	2.067	0.154	2,350-3,100	600	75	29	130			
Butileno (Tercera burlante)	S.W.P.	2.250	2.000	0.125	3,000-4,500	700a	95	30	140			
Acrílico-butadieno-estireno, polímero (ABS tipo I)	Clase, 100 lbs.	2.375	2.067	0.154	3,000-4,000	1,000a	75	40	170			
Acrílico-butadieno-estireno, polímero (ABS tipo II)	Sch. 80	2.250	2.100	0.075	7,500-8,500	1,400	100	25	180			
Cloruro de vinilideno (sastre)	Sch. 40	2.375	1.959	0.218	4,000-7,000	800	125	30	130			
Cloruro de polivinilo (PVC tipo I)	Sch. 40	2.375	2.067	0.154	6,400-9,000	1,000a	175	97	130			
Cloruro de polivinilo (PVC tipo II)	---	2.375	2.067	0.154	5,500-6,500	1,000a	156	25	140			
Ambiano fenólico (Haverz 31)	---	3.000	2.000	0.500	2,250-4,500		130	100	265			
Vidrio-éster (vidrio espiral)	---	2.180	1.950	0.125	29,000-38,000a		900	500	200			
Vidrio epoxi fundido (Korcast 2-700)	---	2.375	1.895	0.240	30,000-35,000a		700	330	300			
Vidrio epoxi laminado (bondstrand)	Sch. 40	2.375	2.205	0.085	40,000-8,000a		350	275	220			
Acero al carbono (A53, Gr. A, sin costura)	Sch. 40	2.375	2.067	0.154	48,000	16,000b	1,850c	284c	1,000			
Acero inoxidable (tipo 304, sin costura)	Sch. 40	2.375	2.067	0.154	75,000	18,700b	2,340c	85c	1,300			
Cobre (sin costura, recocido)	Sch. 40	2.375	2.067	0.154	30,000	6,700b	765c	284c	400			
Aluminio (recocido 3003)	Sch. 40	2.375	2.067	0.154	14,000	3,350b	382c	250c	400			
Vidrio borosilicato	---	2.344	2.000	0.172	10,000		50	30	400			
Grafito impregnado (Korcast)	---	2.750	2.000	0.375	2,500		75	75	340			
Caucho duro (Buna N)	Shc. 120	2.375	1.875	0.250	6,500-7,200	1,400	50	50	225			

NOTAS:

- a) Valores recomendados por la División de Tuberías Tempestivas de SPI.
- b) Código Americano de tubería a presión (ASA 8-31).
- c) Calculado a partir de la fórmula de Barlow (ASA 8-31 Par. 31.4e). Sin tolerancia de corrosión.
- d) El primer número es la resistencia axial a tracción; el segundo, la resistencia tangencial de rotura.

2.9.2 A-53 Gr B

Tubos para la conducción de fluidos y gases, de uso frecuente en petroquímica, pesca, minería e industria en general.

Además la tubería bajo esta especificación se suministra sin costura y soldada con acabado superficial negro y galvanizado en los diferentes diámetros.

2.9.2.1 Tipos y grados.

Tipo F: Soldada a tope en alto horno, soldadura continua grado A.

Tipo E: Soldada con resistencia eléctrica (ERW), Grados A y B.

Tipo S: Sin costura, Grados A y B.

2.9.2.2 Uso

La tubería A-53, está destinada a aplicaciones mecánicas, de presión y también es aceptable para usos ordinarios en la conducción de vapor, agua, gas, y las líneas de aire. Este tipo de tubería es apta para ser soldada, así como para operaciones de formado tales como enrollado, plegado, y abridamiento.

2.9.2.3 Composición química acero A-53

A continuación, en la tabla 2.5, se presentan los valores de la composición química del material, para los diferentes tipos y grados que existen en el mercado.

Tabla 2.5 Composición química.

Composición %	tipo S sin costura (S)		Tipo E Soldada con Resistencia Eléctrica (EWR)		Tipo F Soldada a tope (BW)
	Grado A	Grado B	Grado A	Grado B	Grado A
Carbono, máx.	0.25	0.3	0.25	0.3	0.3
Manganeso, máx.	0.95	1.2	0.95	1.2	1.2
Fósforo, máx.	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Azufre, máx.	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Cobre, máx.	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4
Níquel, máx.	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cromo, máx.	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Molibdeno, máx.	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Vanadio, máx.	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

El carbono es el elemento de aleación más efectivo, eficiente y de bajo costo, además, es el responsable de dar la dureza y se sabe que al aumentar la concentración de este, aumenta la resistencia del acero.

El Manganeso está presente en casi todas las aleaciones de acero y es formador de austenita (ordenamiento específico de los átomos de hierro y carbono), además, se usa para desoxidar y aumentar su capacidad de endurecimiento.

El Fósforo se considera un elemento perjudicial en los aceros, casi una impureza, al igual que el Azufre, ya que reduce la ductilidad y la resistencia al impacto. Sin embargo, en algunos tipos de aceros se agrega deliberadamente para aumentar su resistencia a la tensión.

El Azufre, como ya se mencionó anteriormente también se considera como un elemento perjudicial en las aleaciones de acero. Sin embargo, en ocasiones se agrega hasta 0.25% de azufre para aumentar la ductilidad. Los aceros altos en azufre son difíciles de soldar y pueden causar porosidad en las soldaduras. Este metal se combina con el hierro para formar sulfuro de hierro (FeS), el cual forma, a su vez, una aleación eutéctica de bajo punto de fusión. Cuando el acero se forja o lamina a altas temperaturas, se hace frágil debido a la fusión del eutéctico sulfuro de hierro, que impide la cohesión de los granos permitiendo que se desarrollen grietas. En presencia de manganeso, el azufre tiende a formar sulfuro de manganeso (MnS), en vez de sulfuro de hierro. El MnS suele permanecer como inclusiones bien distribuidas por toda la estructura. Así pues, la presencia del Mn es un inhibidor del efecto que produce el S.

El Cobre aumenta la resistencia a la corrosión de aceros al carbono.

El níquel es el principal formador de austenita, que aumenta la tenacidad y resistencia al impacto. El níquel se utiliza mucho en los aceros inoxidable, para aumentar la resistencia a la corrosión y además, ofrece propiedades únicas para soldar.

El Cromo es un formador de ferrita, aumentando la profundidad del endurecimiento. Así mismo, aumenta la resistencia a altas temperaturas y evita la corrosión. El Cromo es un elemento principal de aleación en aceros inoxidable, y debido a su capacidad de formar carburos, se utiliza en revestimientos o recubrimientos duros de gran resistencia al desgaste, como émbolos, ejes, etc.

El Molibdeno también es un elemento habitual, ya que aumenta mucho la profundidad de endurecimiento del acero, así como su resistencia al impacto. El Molibdeno es el elemento más efectivo para mejorar la resistencia del acero a las bajas temperaturas, reduciendo, además, la pérdida de resistencia por templado. Los aceros inoxidable austeníticos (forma de ordenamiento distinta de los átomos de hierro y carbono), contienen Molibdeno para mejorar la resistencia a la corrosión.

El Vanadio facilita la formación de grano pequeño y reduce la pérdida de resistencia durante el templado, aumentando por lo tanto la capacidad de endurecimiento. Así mismo, es un formador de carburos que imparten resistencia al desgaste en aceros para herramientas, herramientas de corte, etc.

2.9.2.4 Propiedades mecánicas

Ahora bien, como se aprecia en la tabla anterior, la composición no sufre un cambio significativo numéricamente y, únicamente ocurre en 2 elementos (carbono y manganeso); en el carbono, al aumentar su concentración, directamente aumenta la resistencia del material, y en relación al manganeso, se emplea principalmente para que reaccione con el azufre, formando sulfuro de manganeso, haciendo que el material sea más difícil de forjar, al mismo tiempo que aumenta el número de deformación plástica del acero. En seguida, en la tabla 2.6, se observara que este pequeño cambio da como resultado un interesante incremento en las propiedades mecánicas.

Tabla 2.6 Propiedades mecánicas.

	Grado A	Grado B
Resistencia a la tracción, min:	48,000 psi [330 MPa]	60,000 psi [415 MPa]
Fluencia, min:	30,000psi [205 MPa]	35,000psi [240 MPa]

Siendo:

Psi libra fuerza por pulgada cuadrada.

MPa mega pascales o 10^6 pascales.

2.10 Sistema de medición y control de espesores en líneas y equipos (SIMECELE)

2.10.1 ¿Qué es el SIMECELE (Sistema de Medición y Control de Espesores en Líneas y Equipos)?

Es un sistema que aprovecha las tecnologías computacionales para mejorar la administración y el control de la información, así como en las actividades relacionadas con la Integridad Mecánica de los equipos, en las instalaciones de proceso de PEMEX Refinación. El SIMECELE ha sido desarrollado con base en la metodología propuesta por las distintas normas de inspección técnica de PEMEX-Refinación (DG-SASIPA-IT-204, GPEI-IT-0201, GPEI-IT-4200, DG-GPASI-IT-0903, DG-GPASI-IT-0209, DG-ASIPA-IT-00008).

Consiste en una serie de módulos de software para la generación y consulta de la información relacionada con la inspección técnica; así como para la administración y control del trabajo de inspección. Estos sistemas están en mejora continua, para aplicar la experiencia y el buen criterio del personal del centro de trabajo facilitando el trabajo diario y ayudando a identificar los posibles errores.

El sistema también incluye una aplicación capaz de capturar los datos obtenidos directamente en campo a través de un medidor ultrasónico de espesores, facilitando la identificación de los puntos que se están midiendo y también el análisis de los datos de dicha toma, respecto al historial. Esto permite identificar las anomalías en el momento de la medición y disminuye el error humano en la toma de las mediciones por recaptura, dictado de valores y/o mala identificación del punto medido.

La implementación de este sistema en los centros de trabajo, impacta en la mejora de las prácticas de la administración de la integridad mecánica en las instalaciones, tales como:

Disponibilidad de la información a través de la tecnología del proceso en la intranet.

Información actualizada y disponible de los expedientes de inspección técnica de líneas y equipos de proceso.

- 1) Actualización rápida y sencilla de los diagramas isométricos de inspección.

Control y administración del trabajo de inspección, que mejorará la eficacia en el trabajo cotidiano de medición de espesores en líneas y equipos.

La imagen 2.8, resume el proceso de SIMECELE, iniciando con la identificación circuito, posteriormente se realiza el diagrama de inspección técnica de la unidad de control del circuito, para que se proceda a capturar estructuras con sus respectivos diámetros y tipo de nivel según el diagrama, previamente corregido mediante los levantamientos realizados en campo. Posteriormente se elaboran los empates de los niveles, y ya que están actualizados, se capturan las calibraciones con los niveles que en realidad le corresponden, para que una vez concluido este paso, el programa se encargue de la generación de análisis, gráficas y reportes de la unidad de control.



Imagen 2.8 Proceso con SIMECELE.

2.10.2 ¿Para quién es el SIMECELE?

Es para todo personal involucrado en tareas tales como:

- 1) Inspección técnica.
- 2) Evaluación de la integridad mecánica.

3) Análisis de la medición de espesores en líneas y equipos.

Además, el SIMECELE es una herramienta de trabajo diario para todo el personal que conforma a la SIPA (Seguridad Industrial y Protección Ambiental) dentro de PEMEX Refinación, desde el personal que realiza las mediciones de espesores hasta los jefes de seguridad del centro de trabajo.

El SIMECELE está centrado en colaborar con el suministro de información confiable y rápida para el personal de mantenimiento. Este concepto de administración de la información del SIMECELE está dirigido también a los ejecutivos de las diferentes unidades corporativas de PEMEX Refinación, para monitorear los avances en los programas de inspección técnica de espesores y ser la fuente de información para la toma de decisiones.

2.10.3 Actividades

Complementando lo descrito sobre la imagen 2.8, son 10 actividades en general, y estas se muestran en la tabla 2.7 y, básicamente éste es el trabajo realizado, como se aprecia, las actividades más demoradas son las referentes a los diagramas de inspección técnica o como se les suele llamar, isométricos, además de observarse que aquí no hay alguna actividad orientada al análisis de espesores, también debido a que es una tarea realizada por los técnicos que están en el grupo de trabajo.

Tabla 2.7 Actividades generales.

No.	Actividad	% estimado por actividad
1	Recopilación de información (DFP, DTI, expedientes de unidades de control existentes, especificación de materiales de la planta).	5
2	Identificación de censo de circuitos de acuerdo al DFP.	5
3	Identificación y censo de unidades de control de acuerdo a los DTI'S.	10
4	Actualización en campo de isométricos para inspección.	20
5	Digitalización en AutoCAD de los isométricos (diagramas de inspección técnica) actualizados en el formato homologado del SIMECELE (plantilla).	30
6	Correlación de niveles en isométricos o diagramas de inspección técnica actualizados con los expedientes donde se tienen historial de mediciones.	10

No.	Actividad	% estimado por actividad
7	Captura de especificaciones de materiales de la planta (Licenciador/ clases de material).	2
8	Captura de estructura de la ubicación de la planta en SIMECELE, con base en los censos realizados y servicios de la planta (Centro de trabajo/ sector-Región /Planta-Terminal/Circuito/ Unidad de control).	8
9	Captura de inspecciones en la UC (historial de inspección o nueva inspección).	5
10	Revisión y validación de censo e inspecciones capturadas.	5
		100%

Asimismo, se lleva a cabo la creación del censo de circuitos y posteriormente el censo de unidades de control, la cual contiene información descriptiva, llevando así la información extraída y generada de forma organizada, y optimizando la consulta, la cual se hace más sencilla.

2.11 Características en la inspección de tuberías de proceso y servicios auxiliares.

2.11.1 Definiciones

El objetivo de SIMECELE es, predecir, detectar y evaluar oportunamente las disminuciones de espesor debajo de los límites permisibles, que puedan afectar la integridad mecánica de las tuberías y equipos en general, para tomar las medidas necesarias a fin de prevenir la falla de los mismos (8). Así que antes de entrar en particularidades en los siguientes capítulos, abordaremos los conceptos que involucra implícitamente este objetivo, tales como límite de retiro, velocidad de desgaste, unidad de control, etc. Con el fin de homogenizar o normalizar el lenguaje y evitar confusiones.

1. Circuito: “Conjunto de líneas y equipos que manejen un fluido de la misma composición, pudiendo variar en sus diferentes partes las condiciones de operación.”
 - Línea: Es el conjunto de tramos de tubería y accesorios (tee, codo, reducción, válvula, etc.) que manejan el mismo fluido a las mismas condiciones de operación.
 - Equipos: Son todos aquellos dispositivos (recipientes, cambiadores, tanques de almacenamiento, bombas, etc.) que conjuntamente con las líneas integran los circuitos.

2. Unidad de control: Se define como secciones de circuito que tiene una velocidad de corrosión más o menos homogénea tal como de 0 a 8 mpa, de 8 a 15 mpa, de 15>mpa.

Siendo mpa milésima de pulgada al año.

3. Medición de espesor de pared: Actividad en la cual se mide el espesor de pared por medios ultrasónicos, radiográficos, electromagnéticos, mecánicos o la combinación de ellos.

4. Nivel de medición: Es el conjunto de posiciones de medición de espesores de pared que se deben efectuar en un mismo sitio de una tubería o equipo, por ejemplo, las cuatro mediciones que se hacen en una tubería, las mediciones que se hacen en un recipiente o cambiador alrededor de una boquilla (4 o más), etc., lo anterior de acuerdo con los dibujos que se mostrarán más adelante.

5. Periodicidad de medición de espesores: Se considera como tal al tiempo que transcurre entre una fecha de medición y la siguiente consecutiva, la cual depende del análisis de la velocidad de desgaste (1 año mínimo, 5 años máximo).

6. Velocidad de desgaste (Velocidad de corrosión): Es la rapidez con la cual disminuye el espesor de la pared. Ordinariamente, se calcula comparando los espesores obtenidos en mediciones efectuadas en dos fechas consecutivas con mínimo de un año de diferencia.

7. Velocidad de desgaste crítica: Es la velocidad de desgaste que excede 15 milésimas de pulgada por año (15 mpa), puntual o promedio.

8. Límite de retiro: Es el espesor con el cual deben retirarse los tramos de tubería y equipos de acuerdo con sus condiciones de diseño.

Símbolos y abreviaturas.

Dprom.- Velocidad de desgaste promedio.

Dmax.- Velocidad máxima ajustada.

VUE.- Vida Útil Estimada.

FPME.- Fecha de Próxima Medición.

FRP.- Fecha de Retiro Probable.

SASIPA.- Subdirección de Auditoría en Seguridad Industrial y Protección Ambiental.

END.- Ensayos No Destructivos.

SIMECELE.- Sistema de medición y control de espesores en líneas y equipos.

Antes de continuar con las características de las posiciones de medición, es conveniente poner en contexto algunas particularidades en el entorno de las mediciones de espesor, tales como el procedimiento, el personal calificado y el equipo utilizado, así como su confiabilidad.

2.11.2 Inspección técnica (medición ultrasónica de espesores de las líneas de proceso y equipos)

Conforme a la norma NFR-032-PEMEX-2012 (Sistemas de Tubería en Plantas Industriales – Diseño y Especificaciones de Materiales), el procedimiento genérico de inspección técnica publicado en el 2011 y al artículo publicado en el simposio de metrología “Consideraciones en la estimación de incertidumbre en la calibración y medición con medidores de espesores por ultrasonido” por el Centro Nacional de Metrología (CENAM) en el 2010, a continuación se expondrán los aspectos generales.

2.11.2.1 Requisitos y procedimiento

Los equipos a utilizar deben tener calibración y certificación reciente.

Los técnicos que realicen la inspección deben estar calificados y certificados (vigentes), en las siguientes técnicas de ensayos no destructivos: inspección visual nivel II, ultrasonido nivel II. Esta certificación es conforme a la “Practica recomendada No. SNT-TC-1A, Calificación y certificación en exámenes no destructivos” o a la norma “Norma Oficial Mexicana NOM-B.482-1991, Capacitación, Calificación y Certificación del personal en ensayos no destructivos”, donde además el técnico, debe contar con experiencia y una formación académica relacionada con la aplicación de esta inspección.

Presentar un reporte del resultado de las inspecciones y calibraciones debiendo contener planos de los circuitos inspeccionados y calibrados.

Los isométricos serán actualizados en campo de acuerdo a las modificaciones que se han hecho en los circuitos de tubería.

Los reportes de medición de espesores deberán de realizarse en el software SIMECELE, UltraPipe o equivalente.

Las pruebas no destructivas que se realizan son: la inspeccion visual, medicion de espesores.

2.11.2.2 Instrumento

El equipo usado para la inspección ultrasónica de espesores debe cumplir con especificaciones según ASME sección V (Pruebas no Destructivas, ASME, sección V,

Artículo 4. Métodos de Examen Ultrasonico Para la Inspección en servicio, Requisitos de instrumentos, 1 de junio 2000), y las especificadas por el material de fabricación. Los Medidores de Espesores por Ultrasonido (MEU), en la actualidad son ampliamente utilizados en la industria pues permiten determinar en campo el espesor de la pared de, por ejemplo, una tubería que conduce vapor. En este caso, como en muchos otros, los componentes están sujetos a corrosión, abrasión y fatiga y es imprescindible saber de cuánto ha sido la pérdida de espesor de la pared para prevenir que el componente falle. Se hace evidente la dificultad y el trastorno que implica detener el proceso para desmontar la tubería e inspeccionarla. El MEU permite medir el espesor en forma sencilla e inmediata sin necesidad de desmontar nada.

El principio de medición es muy sencillo y dada la forma en que se transfieren las ondas en la materia y el efecto de eco que presenta (Método del pulso-eco), un equipo de ultrasonido lo que mide principalmente es el tiempo que tarda una onda ultrasónica en viajar a través de la pieza a inspeccionar o dicho en otras palabras, mide el tiempo de vuelo de una señal acústica que viaja a través de la pared que deseamos medir y se refleja en la interface o frontera de esta, y ya que se conoce la velocidad de propagación del dispositivo, es sencillo conocer el espesor del punto de medición mediante la siguiente ecuación.

$$e = \frac{c * t}{2}$$

Ecuación 5 Espesor de la medición.

Dónde:

e= espesor a medir (mensurando); las unidades que pueden ser asignadas son milímetros (mm) y pulgadas (in), estas se pueden presentar como 0.0 a 0.00 mm y de 0.00 a 0.000 in, que representa también la resolución de medición.

c= velocidad de propagación del sonido en el material a medir; las unidades son asignadas desde la configuración de unidades de medición y son correspondientes a in/s para in y mm/s para mm, sin embargo puede ser personalizado a combinar

t= tiempo de vuelo medido (segundos).

Y el producto dividido entre 2 es resultado de la ida y vuelta de la onda.

2.11.2.2.1 Incertidumbre de un ME U

Previamente, antes del conocimiento de la incertidumbre, se realiza una calibración conforme a la norma ASTM E 797, utilizando bloques patrones escalonados, donde se sabe que el error de medición es ± 0.01 mm. Con este valor en cuenta, es posible dar a conocer la incertidumbre estándar en la calibración de un MEU, ya sea en condiciones de laboratorio o para la medición en campo. Este último de mayor interés, debido a que las inspecciones se realizan en campo y es necesario conocer que tan confiables son los valores proporcionados para la captura en SIMECELE.

Para el caso de aplicaciones en ambientes industriales, según el artículo del CENAM, la incertidumbre está fuertemente influenciada por el espesor a medir, obteniéndose valores desde 0.04 mm y hasta 0.26 mm en un intervalo de espesores de 1 mm y hasta 10 mm, con temperatura del material de 150 °C y temperatura ambiente de 40 °C.

Para el caso de mediciones en campo, la única fuente de incertidumbre a la velocidad del sonido. Mejorar este valor es más complicado, ya que la variabilidad en la producción de materiales hace que dicha velocidad tenga una gama de valores muy amplia. Si se utilizará como referencia las tablas de fabricantes, la incertidumbre de medición será mucho mayor que si se utiliza un trozo del material a medir para ajustar la velocidad, por ejemplo, si se mide con un calibrador una brida en las tuberías, una oreja o parte del faldón de los recipientes a presión, etc., y con esta referencia se ajusta la velocidad del sonido, permitiría reducir hasta en un 70% la incertidumbre de medición en campo, esto debido a que en lugar de que se ajuste la velocidad a la temperatura ambiente y se mida a la temperatura de operación, se estaría ajustando la velocidad del sonido a una temperatura más cercana a la de operación.

2.11.2.2.2 Eliminación de errores de medición:

La inspección por reporte generado, permite identificar lecturas de espesor erróneas dado que este asocia la posición de medición, con el diámetro nominal, espesor de retiro y el último espesor, por lo que el nuevo espesor medido no deberá ser mayor a el último o menor a el espesor de retiro (con tolerancia de ± 0.004 pulgadas), si se presenta

cualquiera de los dos casos debe realizarse otra medición y en caso de repetirse por dos o más ocasiones, debe efectuarse la observación pertinente para su manejo adecuado de reforzamiento por encamisado para el segundo caso o bien, para hacer examinar la base de datos y corroborar que el espesor anterior se realizó adecuadamente.

2.11.3 Posiciones de medición

A continuación, se mostrarán mediante la tabla 2.8, las posiciones de medición para líneas, con el fin de orientarnos con respecto a la información recopilada, y los resultados que ésta proveerá.

Es importante aclarar que, aunque la dirección sea, sur-norte, se toma como norte-sur ya que tiene la misma orientación, además de que el norte es la referencia principal en relación a las posiciones y referencia dentro de los levantamientos y, el diagrama de inspección técnica, y este criterio se aplica para los demás pares de combinaciones; oriente-poniente, arriba-abajo, fuera-dentro.

Tabla 2.8 Nomenclatura de las posiciones.

Nombre de la posición	Nombre alternativo	Notación con letras	Notación numérica
Norte	-	N	1
Sur	-	S	2
Oriente	Este	O	3
Poniente	Oeste	P	4
Arriba	-	A	5
Abajo	-	B	6
Codo	Fuera	C	7
Garganta	Dentro	G	8
Obstrucción	-	X	0

2.11.4 Tipo de nivel

En cuanto a los niveles en las líneas, estos son un arreglo de 4 posiciones, los cuales están en función de la orientación que se observe en el diagrama de inspección técnica y no de la dirección del flujo, es decir, si se percibe una línea inclinada con orientación, oriente-poniente o viceversa según sea la dirección del flujo, se tomara como una línea, norte-sur-arriba-abajo, al momento de realizarle inspección, así como al instante de cargar la estructura de la unidad de control a la que pertenece.

Con esta homologación de criterios, se simplifica las tareas involucradas con respecto a las posiciones de medición, ya que al no tomarlo en cuenta, se tendría el doble de combinaciones de tipos de niveles, que de cierta manera y sin saber la dirección del flujo resultan ser el mismo caso, teniendo la mismas orientación y los mismos puntos de medición

2.11.4.1 Líneas

Como se ejemplifica en la imagen 2.9, para tuberías, hay 3 tipos de niveles, y es importante aclarar que para la posición vertical y horizontal se manejan las mismas posiciones a la hora de hacer la captura de la estructura de la unidad de control. Otro aspecto por aclarar, es que en campo, algunas líneas tienen desviaciones con respecto a nuestros puntos de orientación, por lo tanto se dibujan tal y como se observan en campo, anotando las 2 direcciones implicadas, por ejemplo, una línea que va en dirección al norte y, en cierto codo, se presente una desviación, arriba-norte, entonces se plasmara en el diagrama de inspección técnica esta desviación por medio de un achurado, el cual represente, por medio de una sombra con dirección, la orientación que predomina en esta desviación de la línea.

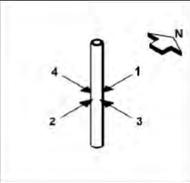
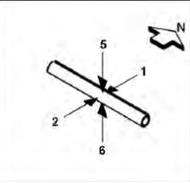
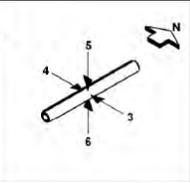
Dibujo			
Notación con letras	N,S,O,P	N,S,A,B	O,P,A,B
Notación con números	1,2,3,4	1,2,5,6	3,4,5,6

Imagen 2.9 Niveles de líneas.

2.11.4.2 Tees

En primera instancia, este accesorio se utiliza para repartir el flujo, para mantenerlo igual o en su defecto aumentándolo con la disminución del diámetro.

Si este accesorio se encuentra en posición horizontal o vertical, la obstrucción o mejor dicho, la posición que no podrá ser medida será cualquiera de estas: norte, sur, oriente, poniente, tal y como se ejemplifica en la imagen 2.10.

Dibujo				
Notación con letras	N,X,O,P	X,S,O,P	N,S,X,P	N,S,O,X
Notación con números	1,0,3,4	0,2,3,4	1,2,0,4	1,2,3,0

Imagen 2.10 Niveles para tees verticales y horizontales.

En el caso de que este accesorio tenga la orientación de oriente-poniente o viceversa, como lo muestra la imagen 2.11, la obstrucción tendrá 2 nuevas posiciones; arriba y abajo. Las cuales sustituirán, en este caso, las posiciones oriente y poniente, ya que es imposible realizarle medición de espesor, debido a la misma orientación de la tee.

Dibujo				
Notación con letras	N,X,A,B	X,S,A,B	N,S,X,B	N,S,A,X
Notación con números	1,0,5,6	0,2,5,6	1,2,0,6	1,2,5,0

Imagen 2.11 Niveles para tees, orientación: oriente-poniente, poniente-oriente.

La imagen 2.12, nos dice que para la orientación, norte-sur, sur-norte, estas posiciones ahora serán sustituidas por las mismas 2 mencionadas en el caso anterior, debido a la misma razón de la orientación y sobre la realización de la medición de espesor

Dibujo				
Notación con letras	O,X,A,B	X,P,A,B	O,P,X,B	O,P,A,X
Notación con números	3,0,5,6	0,4,5,6	3,4,0,6	3,4,5,0

Imagen 2.12 Niveles para tees, orientación: norte-sur, sur-norte.

2.11.4.3 Codos

Son accesorios de forma curva que se utilizan para cambiar la dirección del flujo de las líneas tantos grados como lo especifiquen los planos o dibujos de tuberías. En SIMECELE hay 6 tipos de niveles para codos, cada una con 4 orientaciones diferentes que comparten los mismos puntos de medición de espesor.

A continuación, en la imagen 2.13, se ejemplifica el nivel para un codo con orientación: oriente-poniente, arriba-abajo. El cual, por consiguiente, puede ser empleado de 4 diversas maneras, y así cumplir con las restricciones ya establecidas en función de la orientación.

Dibujo				
Notación con letras	N,S,C,G	N,S,C,G	N,S,C,G	N,S,C,G
Notación con números	1,2,7,8	1,2,7,8	1,2,7,8	1,2,7,8

Imagen 2.13 Nivel para codo, orientación: oriente-poniente, arriba-abajo.

Respecto a la imagen 2.14, el codo tiene una orientación: norte-sur, arriba-abajo. Dado a este arreglo, las primeras 2 posiciones de medición del caso anterior son sustituidas y, se obtiene el siguiente tipo de nivel: oriente, poniente, fuera, dentro.

Dibujo				
Notación con letras	O,P,C,G	O,P,C,G	O,P,C,G	O,P,C,G
Notación con números	3,4,7,8	3,4,7,8	3,4,7,8	3,4,7,8

Imagen 2.14 Nivel para codo, orientación: norte-sur, arriba-abajo.

La imagen 2.15, nos presenta un codo con orientación: norte-sur, oriente-poniente. Esta orientación es resultado de un aumento del ángulo en el accesorio. Por consiguiente, nuevamente las primeras 2 posiciones de medición se ven reemplazadas, teniendo como resultado un tipo de nivel: arriba, abajo, fuera, dentro.

Dibujo				
Notación con letras	A,B,C,G	A,B,C,G	A,B,C,G	A,B,C,G
Notación con números	5,6,7,8	5,6,7,8	5,6,7,8	5,6,7,8

Imagen 2.15 Nivel para codo, orientación: norte-sur, oriente-poniente.

Ahora bien, referente a la imagen 2.16, la cual es un compilado de las anteriores, en relación al tipo de nivel en el codo. En esta imagen se observa que en cada tipo de nivel, existe una obstrucción, la cual no tiene fundamento a simple vista, pero en un codo, con diámetro igual o menor a 2 pulgadas, estos son reforzados, haciendo que la parte de la garganta sea inaccesible al momento de realizar la inspección y por ende ser tomado como una posición con obstrucción.

Dibujo				
Notación con letras	N,S,C,X	N,S,C,X	N,S,C,X	N,S,C,X
Notación con números	1,2,7,0	1,2,7,0	1,2,7,0	1,2,7,0
Dibujo				
Notación con letras	O,P,C,X	O,P,C,X	O,P,C,X	O,P,C,X
Notación con números	3,4,7,0	3,4,7,0	3,4,7,0	3,4,7,0
Dibujo				
Notación con letras	A,B,C,X	A,B,C,X	A,B,C,X	A,B,C,X
Notación con números	5,6,7,0	5,6,7,0	5,6,7,0	5,6,7,0

Imagen 2.16 Niveles para codos reforzados.

2.11.5 Unidades de control de líneas

Como ya se mencionó, en el caso de tuberías, a grandes rasgos, la unidad de control es la línea de proceso de un equipo a otro, pudiendo variar sus diámetros a lo largo de esta, más no las condiciones de operación.

En la imagen 2.17, se ejemplifica como es un diagrama de inspección técnica, de una unidad de control de una línea. Los tags o etiquetas de los equipos, están orientados según como se encuentren los equipos en el plot plant, además siempre se tiene como referencia el norte, también se puede apreciar la tabla de especificaciones de la unidad, así como los niveles de medición para la tubería, niplería y tornillería.

En este caso, los niveles de tubería, como el que está marcado con un círculo en la imagen 2.17, son el objeto de nuestro estudio y, las características de estos, para poder identificarlos, son los siguientes; Después de cada soldadura, en un injerto, en los codos,

en una reducción, en una unión de la “T”, en una unión de los filtros, después de un medidor de flujo y de una brida.

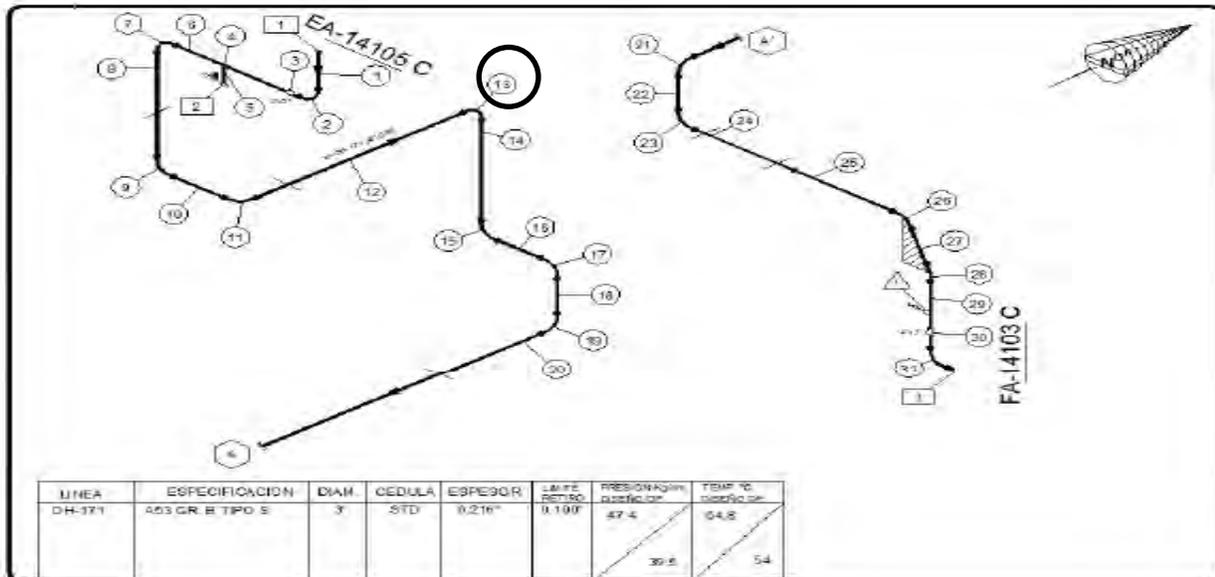


Imagen 2.17 Ejemplo de niveles de medición de tuberías en un diagrama de inspección técnica.

2.11.6 Discriminación de valores de espesores no significativos

Cuando exista un engrosamiento con respecto a la medición anterior y este engrosamiento sea menor al 5% del espesor anterior.

- Se considera como cero “0” la velocidad de desgaste por punto.

Cuando exista un engrosamiento con respecto a la medición anterior y este engrosamiento sea mayor al 5% del espesor anterior.

- La velocidad de desgaste de este punto será inválida, es decir, no tendrá valor y no se tomará en cuenta para el análisis de los datos.

2.11.7 Velocidad de desgaste por punto (d)

Criterios

- Para que sea aceptable el cálculo, debe haber transcurrido cuando menos un año entre pareja de fechas de medición.

- En el análisis, se consideran todas las parejas de valores de espesor, incluyendo aquellas cuyas diferencias sean cero, ya sea por engrosamiento o por que no exista desgaste.

Cálculo:

- Obtener las diferencias entre los valores obtenidos en las dos fechas consideradas, en cada una de las posiciones de medición de cada uno de los puntos de control.
- La velocidad de desgaste por punto debe calcularse de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$d = \frac{ei - ef}{ff - fi} = \frac{\text{espesor obtenido en la fecha fi} - \text{espesor obtenido en la fecha ff}}{\text{fecha de la medición mas reciente} - \text{fecha de medición anterior}}$$

$$d = \frac{\text{mils} - \text{mils}}{\text{años} - \text{años}} = \frac{\text{milésimas de pulgada}}{\text{años}} = \text{mpa} = \text{milésimas de pulgadas por año}$$

Ecuación 6

3. Capítulo 3. Recopilación de información

3.1 Recopilación de información

Para extraer la información de interés, se realizó un filtro en el censo de unidades de control (material), con el fin de ubicar las unidades de control de los diversos circuitos que emplean éste material.

Como se aprecia en la tabla 3.1, la columna correspondiente al material, presentan el filtro ya mencionado, plataforma de este trabajo. Asimismo se puede apreciar algunos aspectos fundamentales y de los cuales se hará uso, como los niveles de tuberías para seleccionar que unidad de control será tomada en cuenta, el servicio y las condiciones de operación.

Tabla 3.1 Censo de Unidades de Control.

Círculo UNAM	UC FINAL	UC FINAL	Servicio	Forrado	CLASE	Material	Niveles de Tuberías	Niveles de niplería	Niveles de tornillería	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)
01. CARGA	UC-FCCI-101	UC-FCCI-101	Red de Gasó	SI	1P3	A53 Gr. B	97	10	31	65	2.5
01. CARGA	UC-FCCI-102	UC-FCCI-102	Red de Gasó	SI	1P3	A53 Gr. B	34	2	18	187	1.4
01. CARGA	UC-FCCI-103	UC-FCCI-103	Red de Gasó	SI	3P3	A53 Gr. B	88	17	26	182	17.0
01. CARGA	UC-FCCI-104	UC-FCCI-104	Red de Gasó	SI	3P3	A53 Gr. B	21	2	8	182	17.0
01. CARGA	UC-FCCI-105	UC-FCCI-105	Red de Gasó	SI	3P3	A53 Gr. B	23	2	8	252	17.0
01. CARGA	UC-FCCI-106	UC-FCCI-107	Red de Gasó	SI	3P3	A53 Gr. B	40	3	12	288	17.0
01. CARGA	UC-FCCI-110	UC-FCCI-112	Red de Gasó	SI	1P3	A53 Gr. B	38	2	5	187	1.4
01. CARGA	UC-FCCI-111	UC-FCCI-113	Red de Gasó	SI	1P3	A53 Gr. B	24	7	5	187	4.9

Posteriormente, se ubicaron los servicios que cumplieran con dichas restricciones, y al encontrarlos, en relación a las unidades de control que contasen con las mismas condiciones de operación, se seleccionaron aquellas unidades que poseyeran más elementos, puntos o niveles de medición de tuberías, así como excluir aquellas unidades de control que poseían únicamente una inspección, esto con el fin de hacer más

confiables los resultados, al mismo tiempo de tener un circuito con un rango amplio en relación a sus condiciones de operación.

3.1.1 Material y clase

Conforme al censo de Unidades de Control, se tienen 6 diferentes de materiales, y a su vez, 16 clases. Esto nos indica que hay una gran heterogeneidad de las tuberías empleadas en los circuitos, debido a que su utilidad varía dependiendo del fluido transportado y las condiciones a las que será sometida.

Está claro que cada material de tubería esta estandarizado y contiene propiedades físicas y químicas determinadas por el porcentaje de composición que se le da al ser fabricadas.

En el presente trabajo se trabajará con el material A53 Gr. B tipo E y las clases 1P3, 3P3 y 1P5, tal y como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Tabla de Material

CLASE	Material	Libraje #
1P3	A53 Gr. E-B	150
1P5	A53 Gr E-B	300
3P3	A53 Gr. E-B	300

La clase, como se mencionó anteriormente, se clasifica de esta manera ya que aumenta el libraje o en otras palabras, se fabrica para soportar mayor fuerza por unidad de área, y a esto se le llama esfuerzo.

3.1.2 Circuitos y Unidades de Control

Como se ha venido mencionado, se estudiarán 7 circuitos. Cada uno de ellos con 3 o más unidades de control, para poder tener y observar un comportamiento demostrativo del mismo.

La tabla 3.3, muestra los circuitos seleccionados, además de observar el servicio que maneja. Es importante considerar el fluido que transporta, ya que con esta información se podrá realizar un análisis aún más completo en relación a la disminución del espesor de pared.

Tabla 3.3 Circuitos seleccionados.

Circuito	Servicio
01. CARGA	Mezcla de Gasóleos
09. ACEITE CICLICO LIGERO	Aceite Cíclico Ligero
15. NAFTA	Nafta
31. PROPILENO	Propileno
35. LPG LAVADO	Gas LP lavado
42. AGUA AMARGA	Agua amarga
44. GAS ÁCIDO	Gas ácido

Además en esta tabla, se aprecia el número de circuito correspondiente, el cual es importante para lograr identificarlos de forma rápida y poder importar las mediciones realizadas, para posteriormente proceder con la parte de los cálculos y el análisis.

Referente a SIMECELE, lo que se hizo fue consultar la información de unidades de control de los circuitos ya seleccionados.

El primer paso, ubicándose en la imagen 3.1, muestra la pestaña que se despliega al momento de elegir cualquier circuito, situarse en la unidad de control y, seleccionar la opción de calibraciones, la cual contiene los valores de espesor de pared, además de estar en orden conforme al diagrama de inspección técnica, la cual es la guía de los niveles de medición con su respectivo valor. Esta información que aparece en forma de tabla se exporta a Excel fácilmente y solo con cambiarle el formato de origen, es posible ser manipulada para los fines ya establecidos.

Calibraciones de la unidad de control UC-ALK-124
Calibración global

Exportar tabla a Excel Agregar calibración Excluir calibración

Niveles críticos: Niveles normales Todos los niveles Niveles no medidos: (37 Niveles)

Inspección de tubería	Inspección visual de tubería	Nivel	Descripción	may-2000 Inspector de Calibraciones Nivel 1 (d/CN1)		sep-2001 ALMA ROJAS (AR)		jun-2001 ALMA ROJAS		
				Espesor (mils)	Velocidad de Desgaste (mpa)	Espesor (mils)	Velocidad de Desgaste (mpa)	Espesor (mils)	Velocidad de Desgaste (mpa)	
Inspección de niplaría	Inspección de niplaría	1	Espesor original: 237	Norte	230		225	3.74	215	2.67
			Límite de retiro: 120	Sur	220		225		220	0.00
			Espesor máximo: 267	Oriente	230		230	0.00	225	1.33
Inspección de tornillería	Inspección de tornillería	1	[Nivel 1] Diámetro: 4"	Poniente	230		230	0.00	220	0.00
			Espesor original: 237	Oriente	230		250	Engrosamiento	250	Engrosamiento
			Límite de retiro: 120	Poniente	240		260	Engrosamiento	240	0.00
Notas de campo	Notas de campo	2	Espesor original: 237	Dentro (Gar)	260		285	Engrosamiento	285	Engrosamiento
			Límite de retiro: 120	Fuera (Cod)	220		225	Engrosamiento	225	Engrosamiento
			Espesor máximo: 267	Oriente	230		305	Engrosamiento	300	Engrosamiento
Análisis	Análisis	2	[Nivel 2] Diámetro: 4"	Poniente	230		300	Engrosamiento	300	Engrosamiento
			Espesor original: 237	Arriba	230		310	Engrosamiento	305	Engrosamiento
			Límite de retiro: 120	Abajo	230		300	Engrosamiento	285	Engrosamiento
Análisis gráfico	Análisis gráfico	3	Espesor original: 237	Oriente	220		265	Engrosamiento	275	Engrosamiento
			Límite de retiro: 120	Poniente	240		280	Engrosamiento	280	Engrosamiento
			Espesor máximo: 267	Dentro (Gar)	260		330	Engrosamiento	330	Engrosamiento
Análisis	Análisis	4	[Nivel 4] Diámetro: 4"	Fuera (Cod)	210		245	Engrosamiento	245	Engrosamiento
			Espesor original: 237	Noite	220		225	Engrosamiento	255	Engrosamiento
			Límite de retiro: 120							

Imagen 3.1 Calibraciones de la Unidad de control para exportar a Excel.

Esta información exportada, como tal, ya contiene todos los elementos necesarios para proceder a la parte de obtención de resultados, pero como se aprecia en la columna de datos; el diámetro, espesor nominal, límite de retiro y la línea, se encuentran juntos y resulta inconveniente trabajar con ellos en ese formato.

Para fines de practicidad, se exporta de otra pestaña de SIMECELE dicha información, ubicada como, características de la unidad de control UC-XXX-XX. Además, con éste nuevo documento exportado, se corrobora la información contenida en el censo de unidades de control. En la imagen 3.2, solo se observan las características generales de la unidad de control que muestra dicha pestaña.

Características de la unidad de control UC-ALK-023	
Características generales de la unidad de control.	
Características	
Especificación	Descripción de la Unidad de Control: De EA-218 A/B a FA-209
Niveles de tubería	Ubicación: / Área/Sector 5 / Planta Alquilación, ALK / Circuito 07, Propano de Domos de DA-204
Arreglos de Niplería	Tipo de Unidad: Unidad de Control de Línea
Bridas (tornillería)	No. de niveles de tubería: 40
Isométricos	No. de niveles de niplería: 3
	No. de niveles de tornillería: 18
	Presión de Operación (Kgf/cm ²): 280
	Temperatura de Operación (°C): 43 °C
	Índice de Riesgo: N.D.
	Línea Forrada: No
	Toma de mediciones: En operación.

Imagen 3.2 Características de la unidad de control

Esta información, en conjunto, es básicamente la descripción de la unidad de control, la cual permitirá proceder con la generación de los resultados. Además cabe aclarar nuevamente, que solo se manipulará la información referente a los niveles de tuberías.

A continuación, se abordará cada circuito seleccionado, presentando la información recopilada y resumiendo las características generales que lo describen para el posterior análisis.

3.2 CIRCUITO 01. CARGA

3.2.1 Servicio: Mezcla de Gasóleos

3.2.1.1 Gasóleo:

Mezcla de hidrocarburos líquidos, que en su mayoría el gas-oil o gasóleo, se obtiene por la destilación a presión atmosférica del petróleo bruto (gas-oil atmosférico), de la cual se obtienen los productos ligeros, pero también puede contener productos derivados de la destilación al vacío del residuo atmosférico (gas-oil vacuum) y los que proceden del craqueo de fracciones más pesadas (gas-oil de craqueo). Su denominación aceite de gas proviene de la aplicación que de él se hizo en un principio para producir el antiguo gas del alumbrado.

Dependiendo de la naturaleza del crudo, los gasóleos van a tener diferentes porcentajes de componentes aromáticos, parafínicos, querosenos, naftas, etc. Los procesos de refinación van a servir para eliminar algunos de los componentes que no interesan.

3.2.1.2 Mezcla de Gasóleos en el proceso

La carga a la planta, es una mezcla de gasóleos que se producen en la planta de alto vacío. Estos gasóleos se reciben en el tanque de balance de carga a control de nivel. Por un lado, se reciben gasóleos calientes (90°C) provenientes de la planta de alto vacío y por otro, se recibe carga del tanque de almacenamiento de gasóleos, que entra un poco más fría (66° C). Para conocer la cantidad de carga total, se tienen 2 registradores de flujo, el primero para medir la carga del almacenamiento y, el segundo para conocer el total de carga fresca que está entrando al proceso.

Del tanque de carga, ésta es bombeada mediante una bomba principal y en su defecto por la de relevo. Y en esta etapa, se emplean intercambiadores de calor y un calentador a fuego directo para proporcionarle la temperatura que requiere al entrar al reactor. En el sistema de intercambiadores de calor, la carga adquiere calor del aceite decantado, del aceite cíclico pesado y finalmente, de la recirculación de fondos de la fraccionadora. Ya con la alimentación precalentada, en la parte inferior del reactor, ésta entra en contacto por pocos segundos con el catalizador caliente proveniente del regenerador, ocurriendo la reacción de craqueo, generándose hidrocarburos más livianos y coque que se deposita en el catalizador. Posteriormente, se separa al catalizador de los productos, haciéndolos fluir hacia unos ciclones del propio reactor. Los productos de la reacción (hidrocarburos y vapor de agua) son enviados a la fraccionadora principal, a través de la línea de transferencia. El catalizador agotado (con coque depositado) fluye hacia el agotador, para ser despojado con vapor de agua de los hidrocarburos que hayan quedado retenidos. Del agotador, el catalizador fluye hacia el regenerador, donde ocurre la combustión del coque depositado. Ya limpio de coque, el catalizador regenerado fluye nuevamente hacia el reactor, donde se vuelve a poner en contacto con carga caliente. El gas producto de la combustión es enviado hacia el enfriador de gases de combustión, para generar vapor de alta presión. El reactor, la cámara de separación, el agotador y el regenerador, están integrados en un solo equipo denominado “convertidor”.

3.2.2 Unidades de Control

La tabla 3.4, contiene las 5 unidades de control seleccionadas para este circuito, el cual tiene como servicio la mezcla de gasóleos.

Tabla 3.4 Unidades de control del CIRCUITO 01. CARGA

No.	UC FINAL	Servicio	Forrado	CLASE	Material	Niveles de Tuberías	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)
1	UC-FCCI-101	Mezcla de Gasóleos	SI	1P3	A53 Gr. B	97	65	2.5
2	UC-FCCI-102	Mezcla de Gasóleos	SI	1P3	A53 Gr. B	34	187	1.4
4	UC-FCCI-104	Mezcla de Gasóleos	SI	3P3	A53 Gr. B	21	182	17.0
7	UC-FCCI-107	Mezcla de Gasóleos	SI	3P3	A53 Gr. B	40	288	17.0
13	UC-FCCI-113	Mezcla de Gasóleos	SI	1P3	A53 Gr. B	24	187	4.9

Se puede apreciar, que en su conjunto, este circuito cuenta con un número significativo de niveles de tubería, teniendo como promedio de 43.2, esperando así, tener un rango amplio de posiciones con medición de espesor.

Para cada circuito que a continuación se presente, se mostrará una tabla similar, en las cuales se omitieron aspectos como; los niveles de niplería y tornillería. Ya que aquí, esos puntos no son de estudio.

3.2.2.1 Rango de condiciones

Rango de temperatura de operación °C: (65 – 288).

Rango de presión de operación Kg/cm²: (1.4 – 17).

Se observa que el rango es amplio en los 2 puntos, a pesar de que tenemos presiones repetidas. Para cada circuito se mostrará el intervalo, y se tendrán diferentes condiciones, ya sea que el intervalo sea estrecho, que las temperaturas o las presiones se repitan más de 1 vez, pero cabe aclarar que ningún circuito repetirá la misma temperatura y presión con otra unidad de control en el mismo circuito.

3.2.3 UC-FCCI-101

Debido a que la información recopilada es bastante. Se procederá a mostrar con esta unidad de control, lo que se exporto, y el tratamiento de la información elaborado para todas la unidades de control de los circuitos seleccionados. Esta unidad de control es de las más representativas, ya que contiene 97 niveles para la medición que se realiza en 4 posiciones, por lo que tendríamos 388 posibles valores de medición de espesor y velocidad de desgaste.

3.2.3.1 Características y propiedades de la unidad de control

En la tabla 3.5, se muestra las características y propiedades extraídas de la unidad. Las primeras, del censo y las segundas, de la exportación de la información del SIMECELE. Como se aprecia en la tabla, se cuenta con 5 diámetros diferentes, los cuales están en función del flujo transportado, además del equipo o accesorio con el cual conecta para continuar con el proceso. Respecto a la cédula, es la propiedad característica de las

tuberías respecto al espesor y ésta dependerá del uso que se le vaya a dar a la tubería. Las cédulas, 40 y 80, son las más utilizadas en la industria, la primera principalmente para tuberías que transportan agua y la segunda para sistemas de alta presión. Referente al espesor nominal y límite de retiro, éstos van ligados directamente con la cédula y el diámetro.

Tabla 3.5 Características y propiedades de la UC-FCCI-101

No.	UC FINAL	Servicio	Forrado	CLASE	Material	Niveles de Tuberías	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)
1	UC-FCCI-101	Mezcla de Gasóleos	SI	1P3	A53 Gr. B	97	65	2.5

1P3					
Diámetros	4"	6"	8"	10"	12"
Cédula	40	40	40	40	20
Espesor nominal (mils)	237	280	322	365	250
Límite de retiro (mils)	120	150	180	190	190

Generalizando, por medio de lo observado en los 7 circuitos, se puede dar a conocer una regla general aplicada para el material. A medida que aumente el diámetro, disminuirá la cédula empleada, al contrario del espesor nominal y el límite de retiro, en los cuales, su valor crece conjuntamente con el diámetro de forma limitada. Limitada por el tamaño del diámetro, ya que con 12" en adelante, permanece fija la cédula 20 y, el valor del espesor nominal descende, el cual ira aumentando nuevamente. No así, el caso del límite de retiro, el cual permanece fijo desde las 10".

En lo sucesivo, lo que se mostrará, serán todos los diámetros que contiene el circuito. Aquí se muestra así, con el fin de que se comprenda que cada unidad de control fue abordada de manera individual, para sustraer el contenido relevante que complementa y ayuda a describir mejor a cada circuito.

3.2.3.2 Velocidad de desgaste calculado por SIMECELE

Teniendo los aspectos generales de la unidad de control, hace falta ir a lo particular, en busca de resultados buscados para el circuito a la que pertenece.

Habiendo organizado la información extraída, esta debió ser tratada al darle el formato presentado en la tabla 3.6, la cual despliega los valores y la información necesaria para la obtención de resultados. Este formato se realizó para cada unidad de control presente en un circuito, ya que agiliza el procedimiento de realizar filtros y puntualizar características, además de facilitar la manipulación de la información.

Tabla 3.6 Comparativo de inspecciones de UC-FCCI-101

Nivel	Nivel	Posición	Diámetro	Tipo de nivel	Cédula	Espesor nominal (mils)	Límite de retiro (mils)	Material	jun-99	abr-07	
									Espesor [mils]	Espesor [mils]	Velocidad de Desgaste [mpa]
1	1.1	Oriente	12"	CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente	20	250	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	334	342	0
	1.2	Poniente							380	409	-
	1.3	Dentro (Garganta)							410	409	0.13
	1.4	Fuera (Codo)							360	349	1.4
2	2.1	Oriente	12"	TuOPAB 3. Tubería horizontal paralela al eje Norte-Sur	20	250	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	259	296	-
	2.2	Poniente							280	314	-
	2.3	Arriba							279	299	-
	2.4	Abajo							294	291	0.38
3	3.1	Norte	4"	TuNSOP 1. Tubería vertical	40	237	120	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	363	369	0
	3.2	Sur							352	356	0
	3.3	Oriente							349	337	7.98
	3.4	Poniente							355	363	0
4	4.1	Oriente	12"	TeOPXB 21. T horizontal con salida hacia Arriba	20	250	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	259	276	-
	4.2	Poniente							270	286	-
	4.3	Obstrucción									-
	4.4	Abajo							261	272	0
95	95.1	Norte	12"	CoNSDF 5. Codo en el plano perpendicular al eje Norte-Sur	20	250	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	385	417	-
	95.2	Sur							358	359	0
	95.3	Dentro (Garganta)							350	321	3.7
	95.4	Fuera (Codo)							372	391	-
96	96.1	Norte	12"	ReNSOP 7. Reducción vertical	20	250	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	446	407	4.98
	96.2	Sur							449	387	7.92
	96.3	Oriente							548	435	14.43
	96.4	Poniente							478	389	11.37
97	97.1	Norte	8"	TuNSOP 1. Tubería vertical	40	322	180	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel		344	-
	97.2	Sur								340	-
	97.3	Oriente								343	-
	97.4	Poniente								354	-

Como es de esperarse, el plasmar todas estas tablas, para cada unidad de control, resultaría un trabajo cargado de información recopilada e irrelevante, ya que el objetivo no es proporcionar información compilada.

Así que en futuras páginas, este apartado, se dará por hecho que esta tabla fue realizada con el fin de organizar la información y de generar resultados que en el siguiente capítulo se presentarán.

3.2.4 Resumen Circuito

En este apartado, se mostraran los detalles generales con respecto a las posiciones presentes en todo el circuito, ya que éstas, presentan las siguientes 4 condiciones:

- a) Posiciones con obstrucción, b) Posiciones sin valor o -, c) Posiciones con valor de 0, d) Posiciones con velocidad de desgaste.

Se debe retomar lo que se aclaró en segundo capítulo, en el apartado; “Discriminación de valores de espesores no significativos.”

Cuando exista un engrosamiento con respecto a la medición anterior y este engrosamiento sea menor al 5% del espesor anterior, se considera como cero “0” la velocidad de desgaste por punto.

Cuando exista un engrosamiento con respecto a la medición anterior y este engrosamiento sea mayor al 5% del espesor anterior, la velocidad de desgaste de este punto será inválida, es decir, no tendrá valor (-) y no se tomará en cuenta para el análisis de los datos.

Con esto presente, se muestra la tabla 3.7, correspondientes al resumen general de las posiciones de este circuito. La tabla presenta el conteo de elementos y su respectivo porcentaje para cada unidad de control, en función de las condiciones anteriormente mencionadas. El gráfico en forma de pastel, ya exhibe los porcentajes calculados del total de las posiciones que cumplen alguna condición.

Tabla 3.7 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 01. CARGA, en correspondencia a sus unidades de control.

UC FINAL	UC-FCCI-101	UC-FCCI-102	UC-FCCI-104	UC-FCCI-107	UC-FCCI-113	Total	
Total de posiciones	388	136	84	160	96	864	100%
Posiciones con obstrucción	12	4	4	6	1	27	3.13%
Posiciones con -	156	16	19	59	11	261	30.21%
Posiciones con valor de 0	105	10	9	63	18	205	23.73%
Posiciones con velocidad de desgaste	115	106	52	32	66	371	42.94%
% total de posiciones	44.91%	15.74%	9.72%	18.52%	11.11%	100%	
% posiciones con obstrucción	44.44%	14.81%	14.81%	22.22%	3.70%	100%	
% posiciones con -	59.77%	6.13%	7.28%	22.61%	4.21%	100%	
% posiciones con valor de 0	51.22%	4.88%	4.39%	30.73%	8.78%	100%	
% posiciones con velocidad de desgaste	31.00%	28.57%	14.02%	8.63%	17.79%	100%	

Se puede observar que la UC-FCCI-101, es la que contribuye con más posiciones en los 5 rubros estipulados, esto no implica que sea la unidad de control con mayor representación, ya que la comparación de total de posiciones contra posiciones con velocidad de desgaste que tiene, es desproporcional. La unidad con la mejor representación, con posiciones que tienen velocidad de desgaste es la 102.

A pesar de que las posiciones con velocidad de desgaste no sean más de la mitad de la total de posiciones, se cuenta con un vasto número de elementos para proceder a la obtención de resultados. Las posiciones con obstrucción en este circuito, representan la minoría con un 3%, pero la suma de las posiciones que cuentan con valor de cero y guion, representan el 54% de la población, lo que nos dice que la mayor parte del circuito ha sufrido un reemplazo para proveer la seguridad en la planta, y la eficiencia en la producción.

3.3 CIRCUITO 09. ACEITE CICLICO LIGERO

3.3.1 Servicio: Aceite cíclico ligero

3.3.1.1 Aceite cíclico ligero

Se utiliza en los lodos de perforación de pozos, y como combustible para calderas y hornos.

3.3.1.2 Aceite cíclico ligero en el proceso

Producto de la desintegración catalítica del proceso de refinación, En la operación de producción máxima de destilado, la conversión total de gasóleo disminuye en el Riser (reactor) y se recircula aceite cíclico pesado (ACP) con una válvula, para convertirlo en aceite cíclico ligero (ACL).

El ACL que sale como producto, el aceite de sellos para las bombas y el aceite esponja (ACL sin desfleamar), se extraen del plato 9 de la torre fraccionadora. El ACL y el aceite de sellos se agotan con vapor en la torre agotadora y los vapores del domo de ésta, se retornan a la fraccionadora, arriba del plato de extracción, en tanto que el producto del fondo bombea para enfriarse y sale a límite de baterías, donde hay un brinco hacia el tanque de carga, que se utiliza en arranques y emergencias, para establecer la recirculación larga. El aceite esponja se bombea a la sección de recuperación de vapores, en donde absorbe algunos componentes ligeros en el absorbedor secundario y se enfría un poco. El aceite esponja rico retorna a dos platos arriba del de extracción, eliminando algo de calor de la fraccionadora.

La fraccionadora principal, separa tres corrientes laterales, una de las cuales es un producto terminado (aceite cíclico ligero) y otra un producto de fondo (producto de fondo de la fraccionadora). La mezcla sobrecalentada de productos provenientes del convertidor se condensa para producir: gas húmedo y gasolinas en el tambor de reflujo del domo de la fraccionadora, aceite cíclico ligero (producto terminado) en el fondo del agotador de aceite cíclico ligero, y producto de fondo de la fraccionadora principal. El producto de fondo de fraccionadora y aceite cíclico pesado, pueden ser recirculados hacia el convertidor, sin embargo esto no se hace durante la operación normal.

3.3.2 Unidades de Control

Para este circuito, se ocuparán las primeras 4 unidades de control, como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Unidades de Control del CIRCUITO 09. ACEITE CICLICO LIGERO.

No.	UC FINAL	Servicio	Forrado	CLASE	Material	Niveles de Tuberías	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)
37	UC-FCCI-901	Aceite Cíclico Ligero	Si	1P3	A53 Gr. B	38	248	1.6
38	UC-FCCI-902	Aceite Cíclico Ligero	Si	3P3	A53 Gr. B	82	248	13.0
39	UC-FCCI-903	Aceite Cíclico Ligero	No	3P3	A53 Gr. B	58	55	15.2
40	UC-FCCI-904	Aceite Cíclico Ligero	No	1P3	A53 Gr. B	30	55	14.0

La unidad de control con el mayor número niveles de tuberías, es la 902, la cual proviene de un agotador, en donde el flujo es impulsado a través de la bomba principal y la de relevo, hasta llegar a un enfriador, según la descripción de la unidad de control.

3.3.2.1 Rango de condiciones

Rango de temperatura de operación °C: (55 - 248).

Rango de presión de operación kg/cm²: (1.6 - 15.2).

3.3.3 Resumen Circuito.

Para el circuito de aceite cíclico ligero, se tuvieron un total de 832 posiciones y como se observa en la tabla 3.9, 463 de estas contenían un valor de desgaste de la tubería, siendo éste número, el 55.65% del total.

Otro detalle a destacar, es referente a la unidad 902, la cual domina con un 56%, correspondiente a 259 posiciones con valor de velocidad de desgaste de total posiciones

con esta condición. Caso contrario, la unidad 904, la cual solo aporta un 8% al total, con 38 de las 120 totales de esta unidad de control.

Tabla 3.9 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO, en correspondencia a sus unidades de control

UC FINAL	UC-FCCI-901	UC-FCCI-902	UC-FCCI-903	UC-FCCI-904	Total	
Total de posiciones	152	328	232	120	832	100%
Posiciones con obstrucción	6	9	7	4	26	3.13%
Posiciones con -	27	27	55	15	124	14.90%
Posiciones con valor de 0	60	33	63	63	219	26.32%
Posiciones con velocidad de desgaste	59	259	107	38	463	55.65%
% total de posiciones	18%	39%	28%	14%	100%	
% posiciones con obstrucción	23%	35%	27%	15%	100%	
% posiciones con -	22%	22%	44%	12%	100%	
% posiciones con valor de 0	27%	15%	29%	29%	100%	
% posiciones con velocidad de desgaste	13%	56%	23%	8%	100%	

Ahora bien, concierne a lo obtenido en la última columna (junto a izquierda del total), se distingue que al sumar las primeras 3 condiciones en relación a las posiciones, están no superan el porcentaje para las posiciones con velocidad de desgaste, lo cual resulta significativo.

En el 3 % de las posiciones con obstrucción, la unidad de control que más contribuye a este valor, es la 902, pero como se mencionó anteriormente, también es aquella que aporta más valores en la condición más importante en este trabajo.

3.4 CIRCUITO 15. NAFTA

3.4.1 Servicio: Nafta

3.4.1.1 Nafta

- Características: Es un solvente incoloro de un peso específico aproximado de 0.768.
- Elaboración: Es obtenido de la reformación de naftas.

- Usos y aplicaciones: Agente de limpieza en litografía, desmanchador en tintorerías, diluyente de aceites lubricantes y solvente de pinturas y recubrimientos.

3.4.1.2 Nafta en el proceso

En el mismo punto que el diámetro del Reactor se incrementa, se inyecta nafta de enfriamiento para retirar calor y permitir solo reacciones primarias de craqueo. Esto permite incrementar el rendimiento de gasolina, el rendimiento de olefinas, y promueve el incremento en la calidad de la gasolina (gasolina de alto octano).

Las especificaciones de fraccionamiento deseadas para el aceite cíclico ligero y para la gasolina se alcanzan por una relación entre número de etapas de equilibrio y el reflujo inducido. Siete bandejas de fraccionamiento se ubican entre los retiros de aceite cíclico ligero y la nafta pesada. Esta última, es extraída de la columna con una bandeja de retiro total, a la succión de las 2 bombas de nafta pesada. Parte de la nafta regresa a la fraccionadora principal como reflujo neto de nafta (pump-back), y es introducida en la bandeja inmediata inferior, mientras que el reflujo circulante y el aceite pobre son bombeados al sistema de pumparound, para la recuperación de calor de la nafta en la sección de recuperación de vapores y, ésta se divide en dos corrientes. La primera fluye al rehervidor de la agotadora y luego al inter-rehervidor de la agotadora próxima. La segunda corriente fluye al rehervidor de la depropanizadora. Estas dos corrientes se combinan y pasan al aerofriador de pumparound de nafta pesada. La carga calórica de este aerofriador es despreciable en el caso de diseño de maximización de olefinas, sin embargo se incrementa cuando la unidad opera en el modo de maximización de nafta. En este modo de operación se reduce significativamente la remoción de calor de la nafta pesada en la sección de recuperación de vapores. Por esto, la carga calórica del aerofriador se incrementa para mantener el balance de calor en la fraccionadora principal y al mismo tiempo mantener el reflujo interno de las bandejas de la fraccionadora que están por debajo del pumparound. Parte del reflujo circulante de nafta pesada, desde el aerofriador, es bombeado al intercambiador aceite pobre/ aceite rico, luego al enfriador de aceite pobre y es inyectada en la parte superior de la bandeja 1 del absorbedor primario. La otra parte del reflujo circulante se combina con el aceite rico del fondo del absorbedor y es retornada a la tercera bandeja de la fraccionadora principal. En

el aceite rico de retorno, se recuperan cantidades significativas de material en el rango de ebullición de los c4 y c5. Este material se vaporiza y abandona la fraccionadora en la corriente de producto de gas húmedo. Así, estos componentes livianos se reciclan entre la fraccionadora principal y la sección de recuperación de vapores. La recuperación de estos componentes se incrementa a expensas del reciclo de nafta.

La recuperación de calor en el sistema de pumparound de nafta pesada reduce los requerimientos de enfriamiento del sistema de reflujo del domo. A diferencia del calor recuperado en el pumparound de nafta pesada, el calor removido en el sistema de reflujo del domo no puede ser reutilizado efectivamente debido a las bajas temperaturas del sistema, por ello este calor debe ser expulsado a la atmósfera y al sistema de agua de enfriamiento.

3.4.2 Unidades de Control

Este circuito cuenta con 6 unidades de control. La unidad de control con mayor cantidad de posiciones totales, es la 1508 y además, ésta tiene las condiciones de operación casi intermedias dentro del mismo circuito, tal y como se aprecia en la tabla 3.10, la cual también describe las demás unidades de control.

Tabla 3.10 Unidades de Control del CIRCUITO 15. NAFTA.

No.	UC FINAL	Servicio	Forrado	CLASE	Material	Niveles de Tuberías	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)
55	UC-FCCI-1501	Nafta	No	1P3	A53 Gr. B	37	42	1.4
56	UC-FCCI-1502	Nafta	No	3P3	A53 Gr. B	23	41	20.7
57	UC-FCCI-1503	Nafta	No	1P3	A53 Gr. B	68	41	16.8
58	UC-FCCI-1504	Nafta	No	1P3	A53 Gr. B	46	43	19.8
62	UC-FCCI-1508	Nafta	No	1P3	A53 Gr. B	77	38	10.0
63	UC-FCCI-1509	Nafta	No	1P3	A53 Gr. B	56	41	8.4

3.4.2.1 Rango de condiciones

Rango de temperatura de operación °C: (38 - 43).

Rango de presión de operación kg/cm²: (1.4 - 20.7).

3.4.3 Resumen Circuito.

La unidad de control de mayor peso por la cantidad de posiciones con velocidad de desgaste en este circuito, es la 1503 con un total de 144 de las 505 posiciones totales con esta condición. Como ya se había mencionado en el apartado de unidades de control para este circuito, la unidad 1508, contiene el mayor número de posiciones totales, contando con 308, las cuales son el 25% del total. Respecto a las unidades con posiciones de: obstrucción, - y valor de 0, la 1504 domina las 2 primeras condiciones, y la última condición es gobernada por la unidad 1508. Todos estos detalles, se exponen y se pueden corroborar en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 15. NAFTA, en correspondencia a sus unidades de control.

UC FINAL	UC-FCCI-1501	UC-FCCI-1502	UC-FCCI-1503	UC-FCCI-1504	UC-FCCI-1508	UC-FCCI-1509	Total	
Total de posiciones	148	92	272	184	308	224	1228	100%
Posiciones con obstrucción	5	3	2	8	6	4	28	2.28%
Posiciones con -	23	9	68	127	80	28	335	27.28%
Posiciones con valor de 0	38	25	58	15	131	93	360	29.32%
Posiciones con velocidad de desgaste	82	55	144	34	91	99	505	41.12%
% total de posiciones	12.05%	7.49%	22.15%	14.98%	25.08%	18.24%	100%	
% posiciones con obstrucción	17.86%	10.71%	7.14%	28.57%	21.43%	14.29%	100%	
% posiciones con -	6.87%	2.69%	20.30%	37.91%	23.88%	8.36%	100%	
% posiciones con valor de 0	10.56%	6.94%	16.11%	4.17%	36.39%	25.83%	100%	
% posiciones con velocidad de desgaste	16.24%	10.89%	28.51%	6.73%	18.02%	19.60%	100%	

En relación a los porcentajes de las condiciones que tienen las posiciones de los niveles de tuberías para este circuito de nafta, éstos son desglosados en la última columna, donde pude notar que la suma de las 3 primeras condiciones representa más de la mitad de la población de posiciones. Con esto visto, se sabe que el 41% del total de las posiciones son útiles y generarán resultados confiables.

3.5 CIRCUITO 31. PROPILENO

3.5.1 Servicio: Propileno

3.5.1.1 Propileno

- Características: Gas incoloro; soluble en alcohol y éter, ligeramente soluble en agua; baja toxicidad, altamente inflamable.
- Usos y aplicaciones: El propileno se utiliza para la producción de polipropileno, isopropanol, trimeros y tetrámeros de propileno, para detergentes, óxido de propileno, Isopropilbenceno, cumeno propilenglicoles, entre otros usos.

3.5.1.2 Propileno en el proceso

El propileno se produce a través del gas LP C₃. En la depropanizadora se efectúa la separación del propano-propileno por el domo y butano-butileno por el fondo. El producto de gas LP C₃, es impulsado por la bomba de reflujo del domo de la depropanizadora y se divide en dos corrientes: una regresa a la zona superior de la depropanizadora y la otra se envía al splitter de C₃.

Sistema del splitter de C₃.

El gas LP C₃, se alimenta a la columna de destilación del plato 74 de la fraccionadora. El splitter de C₃ es requerido para producir propileno y propano por separado con la especificación mínima de pureza requerida. El condensador de domo del splitter de C₃ es un condensador total con agua de enfriamiento. El rehervidor del splitter de C₃, se sirve de vapor de baja presión como medio de calentamiento. El hidrocarburo líquido del tambor de reflujo del splitter de C₃, se envía de regreso al fraccionador de propileno, como reflujo total al plato uno, por medio de una bomba (bomba de reflujo del fraccionador de propileno). El producto propileno grado químico (99% de pureza), es extraído del plato 6 de ésta fraccionadora, y es enfriado con agua, en el enfriador de producto de propileno, luego es analizado para determinar el contenido de etano y finalmente se envía al límite de batería para su almacenaje, y el propano producto, es extraído del fondo.

3.5.2 Unidades de Control

Para el circuito 31, como se observa en la tabla 3.12, se tienen 4 unidades de control, 3 de ellas, superan los 50 niveles de tuberías, la otra unidad, correspondiente a la 3102, además de tener 21 niveles, cuenta con las condiciones de operación más bajas de éste circuito. Esta unidad de control proviene de 6 intercambiadores de calor, y se dirige al acumulador de reflujo de la fraccionadora de propileno.

Tabla 3.12 Unidades de control del CIRCUITO 31. PROPILENO.

No.	UC FINAL	Servicio	Forado	CLASE	Material	Niveles de Tuberías	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)
115	UC-FCCI-3101	Propileno	NO	3P3	A53 Gr. B	126	63	22.2
116	UC-FCCI-3102	Propileno	NO	3P3	A53 Gr. B	21	38	19.0
117	UC-FCCI-3103	Propileno	NO	3P3	A53 Gr. B	51	63	21.7
120	UC-FCCI-3106	Propileno	NO	3P3	A53 Gr. B	88	63	23.3

3.5.2.1 Rango de condiciones

Rango de temperatura de operación °C: (38 - 63).

Rango de presión de operación kg/cm²: (19 - 23.3).

3.5.3 Resumen Circuito.

La tabla 3.13, nos enseña la cantidad de posiciones, para cada condición referente a éstas.

Si bien se cuenta con un total de 1144 posiciones, la unidad de control que aporta casi la mitad de este número, es la 3101 con el 44%. Para las posiciones con obstrucción, son dos unidades de control que aportan la mayoría de elementos para este rubro: la 3101 y la 3106, esta última, también desempeña el mismo papel para las posiciones que poseen velocidades de desgaste.

Tabla 3.13 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 31. PROPILENO, en correspondencia a sus unidades de control.

UC FINAL	UC-FCCI-3101	UC-FCCI-3102	UC-FCCI-3103	UC-FCCI-3106	Total	
Total de posiciones	504	84	204	352	1144	100%
Posiciones con obstrucción	6	1	5	6	18	1.57%
Posiciones con -	313	19	58	23	413	36.10%
Posiciones con valor de 0	71	24	114	61	270	23.60%
Posiciones con velocidad de desgaste	114	40	27	262	443	38.72%
% total de posiciones	44%	7%	18%	31%	100%	
% posiciones con obstrucción	33%	6%	28%	33%	100%	
% posiciones con -	76%	5%	14%	6%	100%	
% posiciones con valor de 0	26%	9%	42%	23%	100%	
% posiciones con velocidad de desgaste	26%	9%	6%	59%	100%	

Asimismo, se observa en la última columna, el pequeño porcentaje que tienen aquellas posiciones con alguna obstrucción y, además se aprecia la paridad de la segunda y última condición. El 36% corresponde a las posiciones con -, poseyendo 413 elementos y el 39%, atañe a las posiciones con velocidad de desgaste, con 443 posiciones de las 1144 que contiene el circuito.

3.6 CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO

3.6.1 Servicio: Gas LP lavado

3.6.1.1 Gas licuado de petróleo

El gas licuado es una mezcla de hidrocarburos compuesta principalmente de propano y butano; su producción se registra desde principios siglo XX; sin embargo, es en 1946 cuando se inicia su comercialización como estrategia para sustituir en las casas habitación de las zonas urbanas, la utilización de combustibles vegetales. Es una de las principales fuentes de energía en el país, aunque por años, su uso se ha enfocado principalmente al sector residencial; recientemente, el comportamiento de la demanda ha mostrado un crecimiento importante en sectores como la industria y el transporte.

3.6.1.2 Gas LP lavado en el proceso

La corriente de propano-butano, que sale por la parte superior del separador de amina-gas LP, la sección de amina lleva una cierta cantidad de mercaptanos que son compuestos de azufre de la fórmula general "R-S-H", los cuales son removidos en el sistema Merox para el endulzamiento, el cual es un reactor empacado con carbón activado y tiene impregnado el catalizador (Merox 1). El proceso Catalítico de remoción de Mercaptanos presentes en hidrocarburos ligeros, permite el endulzamiento de diversos productos desde una mezcla de propano-butano (Gas LP), hasta fracciones tipo nafta mediante el tratamiento a base de soluciones causticas de hidróxido de sodio, en presencia de un catalizador organometalico, que consiste principalmente en quelatos de fierro y se satura con solución de sosa cáustica. Para esto, primero se hace pasar la corriente de gas LP a través del prelavador cáustico, en donde se mantiene un nivel de sosa cáustica en solución acuosa, con la finalidad de asegurar la completa eliminación de H₂S.

Sale el Gas LP por arriba del prelavador cáustico y entra por la parte inferior al extractor de mercaptanos, donde se encuentra a contracorriente con una solución de sosa cáustica con una concentración al 8% aproximadamente, que va a reaccionar con los mercaptanos, formando mercapturos de sodio dejando de esta forma al gas LP, más o menos libre de mercaptanos. El gas LP libre de mercaptanos, sale por la parte superior del extractor de mercaptanos y se va hacia el tanque de lavado, entrando por abajo y en donde se va a lavar con agua para eliminar cualquier arrastre de sosa. Una parte del gas LP que sale del tanque, se recircula hacia la entrada del mismo. De la parte superior éste, sale el gas LP lavado, y se envía hacia el tanque de balance de carga a la depropanizadora.

El producto gas LP lavado, se enfría con agua en el enfriador del fondo de la depropanizadora y, fluye al límite de batería para su almacenaje.

3.6.2 Unidades de Control

Este circuito cuenta con 3 unidades de control, éstas tienen el número de niveles de tuberías parecido, estancados en los 20's como se puede apreciar en la tabla 3.14.

La unidad 3405, es la que cuenta con mayor número de elementos respecto a las posiciones totales, ésta proviene del intercambiador 16-C (carrete), donde se enfría la corriente y fluye a la depropanizadora.

Tabla 3.14 Unidades de control del CIRCUITO 35. LPG LAVADO.

No.	UC FINAL	Servicio	Forrado	CLASE	Material	Niveles de Tuberías	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)
127	UC-FCCI-3501	LPG lavado	NO	1P3	A53 Gr. B	23	43	13.4
128	UC-FCCI-3502	LPG lavado	NO	1P3	A53 Gr. B	24	43	20.7
130	UC-FCCI-3504	LPG lavado	NO	3P3	A53 Gr. B	26	38	20.7

3.6.2.1 Rango de condiciones

Rango de temperatura de operación °C: (38 – 43).

Rango de presión de operación kg/cm²: (13.4 – 20.7).

3.6.3 Resumen Circuito.

El total de posiciones en este circuito son 292, siendo en valor más pequeño en comparación con lo demás circuitos del presente trabajo. Aun así, se cuenta con 142 posiciones con velocidad de desgaste, siendo un valor no tan insignificante. Asimismo, en la tabla 3.15, resalta diferencia que tienen estas unidades de control referentes a las condiciones que tienen las posiciones, ya que una suposición solo viendo los niveles de tuberías, se pensaría que se obtendrían datos equivalentes unos con otros, pero la realidad nos dice que debido a que las unidades de control provienen de diferentes equipos del proceso, las direcciones de las líneas de proceso son diferentes, por consiguiente las posiciones resultan ser desiguales, y es lo que se aprecia en esta tabla.

Tabla 3.15 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO, en correspondencia a sus unidades de control.

UC FINAL	UC-FCCI-3501	UC-FCCI-3502	UC-FCCI-3504	Total	
Total de posiciones	92	96	104	292	100%
Posiciones con obstrucción	1	5	2	8	2.74%
Posiciones con -	16	35	21	72	24.66%
Posiciones con valor de 0	27	30	13	70	23.97%
Posiciones con velocidad de desgaste	48	26	68	142	48.63%
% total de posiciones	32%	33%	36%	100%	
% posiciones con obstrucción	13%	63%	25%	100%	
% posiciones con -	22%	49%	29%	100%	
% posiciones con valor de 0	39%	43%	19%	100%	
% posiciones con velocidad de desgaste	34%	18%	48%	100%	

Nuevamente, se observa en la última que el 48% de las posiciones, corresponden a la condición que cuenta con velocidad de desgaste con un total de 142 elementos de los 292 de la población, representando casi la mitad. Asimismo, se aprecia la similitud de las posiciones que tienen -y el valor de 0. Estas condiciones sumadas, igualan el valor de posiciones con velocidad de desgaste.

3.7 CIRCUITO 42. AGUA AMARGA

3.7.1 Servicio: Agua amarga

3.7.1.1 Agua amarga

El agua amarga es agua de proceso que contiene ácido sulfhídrico, amoníaco, fenoles, hidrocarburos y compuestos de azufre de bajo peso molecular. Se produce al absorber el vapor fracciones de hidrocarburos durante la destilación, en la regeneración de catalizador o al absorber el vapor ácido sulfhídrico durante el hidrotatamiento y el hidroacabado. También se genera por la adición de agua a procesos para absorber ácido sulfhídrico y amoníaco.

3.7.1.2 Agua amarga en el proceso

Toda el agua que participó de una u otra manera en el proceso, se contamina con H₂S principalmente y, para poder mandarla a otro proceso o al drenaje es necesario eliminárselo. El agua amarga procedente de varios puntos de la planta, se recibe en el tanque de balance de agua amarga. De aquí, se bombea para recibir calor de los fondos de la torre agotadora, mediante dos intercambiadores de calor y luego se calienta con vapor de baja presión en un precalentador, para entrar a la parte superior de la torre agotadora.

Esta torre está empacada con anillos metálicos y trabaja a contracorriente, para una mayor área de contacto, entre el agua amarga y el vapor de agotamiento. Aquí se desflea el agua utilizando vapor de baja presión que se introduce por el fondo. En el fondo de ésta torre, se mantiene una temperatura de unos 116°C y en el domo de 107°C. Por el fondo de la torre se extrae el agua desflemada. Ésta agua, todavía se hace pasar por los dos intercambiadores mencionados al principio y, cede calor al agua amarga, para después irse a límite de baterías.

3.7.2 Unidades de Control

El actual circuito, posee 4 unidades de control, las cuales se muestran en la tabla 3.16. En éste circuito resaltan 2 unidades de control: la unidad 4217 por poseer el mayor número de niveles de tuberías, y la unidad 4218 por ostentar el menor número de niveles de tuberías, en comparación con las demás unidades de control que conforman los circuitos en estudio.

La unidad de control 4217, viene de la descarga de una bomba, para entrar por el carrete de un intercambiador y por último ser conducido al límite de batería de aguas amargas. Mediante esta descripción, se concibe el por qué resulta ser la unidad con más niveles, caso contrario con la unidad 4218, la cual va del carrete de un intercambiador al cuerpo de otro.

Tabla 3.16 Unidades de control del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.

No.	UC FINAL	Servicio	Forrado	CLASE	Material	Niveles de Tuberías	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)
184	UC-FCCI-4216	Agua amarga	NO	1P3	A53 Gr. B	20	113	1.0
185	UC-FCCI-4217	Agua amarga	NO	1P3	A53 Gr. B	63	40	0.8
186	UC-FCCI-4218	Agua amarga	SI	1P3	A53 Gr. B	10	68	3.3
187	UC-FCCI-4219	Agua amarga	SI	1P3	A53 Gr. B	14	68	2.8

3.7.2.1 Rango de condiciones

Rango de temperatura de operación °C: (40 – 113).

Rango de presión de operación Kg/cm²: (0.8 – 3.3).

3.7.3 Resumen Circuito.

A grandes rasgos, la tabla 3.17, contiene los valores relacionados con las posiciones de las unidades de control del circuito de agua amarga. Se puede apreciar que de las 428 posiciones totales, 200 son de posiciones con valor de desgaste, teniendo como principal contribuidor de elementos, a la unidad 4217, igualmente, ésta unidad también domina las demás condiciones.

Tabla 3.17 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA, en correspondencia a sus unidades de control.

UC FINAL	UC-FCCI-4216	UC-FCCI-4217	UC-FCCI-4218	UC-FCCI-4219	Total	
Total de posiciones	80	252	40	56	428	100%
Posiciones con obstrucción	3	8	0	0	11	2.57%
Posiciones con -	7	52	3	2	64	14.95%
Posiciones con valor de 0	30	109	10	4	153	35.75%
Posiciones con velocidad de desgaste	40	83	27	50	200	46.73%
% total de posiciones	19%	59%	9%	13%	100%	
% posiciones con obstrucción	27%	73%	0%	0%	100%	
% posiciones con -	11%	81%	5%	3%	100%	
% posiciones con valor de 0	20%	71%	7%	3%	100%	
% posiciones con velocidad de desgaste	20%	42%	14%	25%	100%	

También se observa que no se cuenta con más del 50% de posiciones con velocidad de desgaste, y que nuevamente el porcentaje de posiciones con obstrucción no supera el 4% como en los demás circuitos. Por último, se da a conocer que aproximadamente el 53% de las posiciones no son representativas del circuito para los objetivos planteados, pero aun así, tiene los suficientes elementos para la descripción del circuito.

3.8 CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO

3.8.1 Servicio: Gas ácido

3.8.1.1 Gas ácido

Gas ácido ($H_2S_{aq} + CO_2$).

3.8.1.2 Gas ácido en el proceso

La planta de desintegración, produce entre varios productos, entre ellos el gas ácido para recuperación de azufre, este gas proviene de diferentes procesos de la planta, por lo cual es un circuito largo.

1. Regenerador de aminas:

Es un agotador con un rehervidor que utiliza vapor de media presión como calentamiento, que remueve el gas ácido de la amina rica. Gas ácido y vapor de agua salen por el domo y se condensa agua en el condensador del regenerador de aminas. El gas ácido y el agua condensada fluyen al tambor de reflujo del regenerador de aminas, en donde el agua condensada es retornada como reflujo al regenerador y el gas ácido es enviado al límite de batería, desde donde se dirige a las unidades de recuperación de azufre de la refinería.

2. Sección de tratamiento con amina:

Se le elimina el gas ácido a las corrientes de gas residual, que viene del absorbedor secundario y gas LP, proveniente del sistema del domo de la debutanizadora, utilizando una solución acuosa de dietanolamina (DEA) al 20 % en peso. Para esto, se tiene un contactor (columna de absorción empacada con anillos) gas residual-amina, para el gas residual y, un contactor LPG liquido-amina, para la corriente de gas LP. Para regenerar la DEA y poder utilizarla nuevamente, se cuenta con la torre regeneradora de DEA.

Flujo del gas residual.

El gas residual que sale por el domo del absorbedor secundario anteriormente señalado, fluye al separador de arrastre, para eliminar cualquier cantidad de aceite de absorción que pudiera arrastrarse. El gas sale por el domo del separador de arrastres y entra en el fondo del primer contactor mencionado. Por el domo entra DEA, que absorbe el gas ácido de los hidrocarburos ascendentes.

El gas endulzado sale por el domo de la columna. De aquí el gas libre de H₂S y CO₂ se envía hacia el sistema de gas combustible y de ahí a la red de gas combustible de la refinería.

Flujo de gas LP.

El gas LP que sale del sistema de la debutanizadora, entra al fondo del contactor LPG-amina, en donde se encuentra con un nivel de DEA para absorberle el gas ácido que lleva. Sale por el domo de la torre gas LP Lavado y por los fondos DEA rica en gas ácido. Ésta

última corriente, se dirige al tanque separador de hidrocarburos, donde los hidrocarburos ligeros vaporizan y se van hacia la red de gas combustible, por el contrario, la DEA rica en gas ácido, después de este tanque separador, pasa por un filtro para eliminar cascarilla y otros contaminantes. Ésta corriente, posteriormente se precalienta en dos intercambiadores de calor con amina pobre caliente, para entrar a la torre regeneradora.

Torre regeneradora 8-E.

En esta torre, se liberará el bióxido de carbono y el ácido sulfhídrico de la amina, quedando ésta, en condiciones de usarse nuevamente.

Los vapores del domo de la torre, se condensan para ser llevados a un acumulador, en donde se colectan y se bombean al plato superior de la torre, como reflujo para recuperar los arrastres formados durante la vaporización instantánea de la solución de DEA rica, al entrar en el plato 3. Los gases que llegan al acumulador, constituyen el gas ácido, y la fracción que no se dirige al reflujo, se manda como parte de la carga, a la planta de azufre.

3. Sección de tratamiento de aguas amargas:

El vapor de agotamiento y el gas ácido separado del agua salen por el domo de la torre agotadora y pasan al condensador y posteriormente al separador de agua-gas ácido, en donde el agua se drena hacia el tanque de balance de agua amarga y el gas ácido sale a control de presión con un PIC, para juntarse con el gas ácido proveniente de la sección de amina y enviarlos como carga a la planta de azufre.

3.8.2 Unidades de Control

Las unidades de control que conforman este circuito son 3, las cuales tienen un rango de presión de operación muy pequeño, como se puede apreciar en la tabla 3.18, la cual, también muestra que la unidad 4401, emplea la clase 1P5 por sus características, dentro de las cuales están: su libraje y, la composición que este grado tiene, ya que esta unidad inicia en el acumulador del reactivador de DEA y se dirige al límite de batería de producto gas ácido que pertenece a la planta de azufre, donde la concentración es más alta.

Tabla 3.18 Unidades de control del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.

No.	UC FINAL	Servicio	Forrado	CLASE	Material	Niveles de Tuberías	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)
191	UC-FCCI-4401	Gas ácido	NO	1P5	A53 Gr. B	42	43	0.5
194	UC-FCCI-4404	Gas ácido	SI	1P3	A53 Gr. B	14	65	0.9
196	UC-FCCI-4406	Gas ácido	SI	1P3	A53 Gr. B	113	113	1.0

3.8.2.1 Rango de condiciones

Rango de temperatura de operación °C: (43 - 113).

Rango de presión de operación Kg/cm²: (0.5 - 1).

3.8.3 Resumen Circuito.

En este circuito se observó que el total de posiciones con -, supero en número de elementos a las demás condiciones. Este acontecimiento no había ocurrido con anterioridad, pero aun así, se cuenta con más de 200 posiciones con velocidad de desgaste, con las cuales se puede trabajar, por consiguiente, se puede efectuar el estudio planteado, ya que incluso, éste valor es aún mayor del que contiene el circuito gas LP lavado.

Asimismo, la tabla 3.19 muestra el número de elementos que contienen las 3 unidades de control para cada condición, además de su porcentaje particular para cada unidad de control y el porcentaje total, el cual es la suma de las posiciones de cada unidad de control que cumplen con la misma condición.

Tabla 3.19 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO, en correspondencia a sus unidades de control.

UC FINAL	UC-FCCI-4401	UC-FCCI-4404	UC-FCCI-4406	Total	
Total de posiciones	168	56	452	676	100%
Posiciones con obstrucción	3	0	10	13	1.92%
Posiciones con -	93	3	195	291	43.05%
Posiciones con valor de 0	35	3	99	137	20.27%
Posiciones con velocidad de desgaste	37	50	148	235	34.76%
% total de posiciones	25%	8%	67%	100%	
% posiciones con obstrucción	23%	0%	77%	100%	
% posiciones con -	32%	1%	67%	100%	
% posiciones con valor de 0	26%	2%	72%	100%	
% posiciones con velocidad de desgaste	16%	21%	63%	100%	

Referente al porcentaje total con respecto al tipo de condición, la última columna, muestra estos valores.

Al predominar las posiciones con -, estamos en un sistema que cuenta con piezas que han presentado un engrosamiento de espesor mayor al 5%, respecto al anterior espesor medido. Esto quiere decir que la mayoría de las piezas han sido repuestas debido a la agresividad del fluido que transportan.

4. Capítulo 4. Resultados y análisis

En seguida, se ejemplificará con el circuito 01 CARGA, el total del trabajo realizado para cada circuito, con el fin de demostrar e ilustrar lo elaborado para cumplir con los objetivos. Para los demás circuitos, se omitirá el apartado del procedimiento, y se presentará únicamente la información relevante que compete al presente trabajo.

En el apartado del resumen para cada circuito, se mostraran 3 tablas, las cuales contienen las principales características que definen y modelan a éstos. Las primeras 2, con aspectos generales y tomando en cuenta los valores críticos y sub-críticos, y la tercera mostrará los promedios representativos del circuito, ya con el previo tratamiento que posteriormente se comentará en este capítulo. Para el siguiente apartado, el cual corresponde al ordenamiento de las unidades de control, en función de las temperaturas y presiones, se podrá apreciar que las unidades de control han sido reordenadas, de tal manera que la primera unidad de control que se muestre, será aquella que tenga, ya sea la presión o temperatura menor, y la última que aparezca, será esa que cuente con el valor más alto de una de las 2 variables. Esto con el fin de preparar la información para el siguiente apartado. Asimismo, se contará con un apartado dedicado a la obtención de condiciones operación ideales para cada circuito, donde se relataran y compararan algunos valores obtenidos del procedimiento en la obtención de las temperaturas, presiones y punto de intersecciones, así como mostrar 2 graficas, en las cuales se observen el Dprom, la posición, temperatura y presión de cada intersección que tenga el circuito. Y por último, se expondrán las características de estos puntos de intersección, en el apartado de condiciones de operación, donde se les dará sentido y se implementaran en alguna sección del circuito con el fin de asegurar la seguridad y corregir algunas secciones de los circuitos que contengan datos contradictorios respecto a la descripción de las unidades de control tomadas del censo.

4.1 CIRCUITO 01. CARGA, Servicio: Mezcla de Gasóleos

4.1.1 Procedimientos para la obtención de resultados

4.1.1.1 Promedio velocidad de desgaste de la unidad de Control “Dprom”

Teniendo todas las unidades de control en el formato mostrado en el capítulo anterior, en el punto de Velocidades de desgaste calculado por SIMECELE, cada unidad se colocó en una hoja de Excel en un mismo documento, así como se aprecia en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Unidades de control en Excel.

4	Gasóleo, Líquido/Vapor, Pmax: 10.5, Tmax: 93				3.2646341	3.39357143	0	4.8417391	3.6045946							jun-99	abr-07	
5	Nivel	Nivel	Posición	Datos	Diámetro	Diámetro	Tipo de nivel	Cédula	Cédula	Espesor nominal (milés)	Espesor nominal (milés)	Límite de retro (milés)	Límite de retro (milés)	Material	Espesor [milés]	Espesor [milés]	Velocidad de Desgaste [mpa]	
6	1	1.1	Oriente	Diámetro: 12"	12"	12	CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente	20	20	250	250	190	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	334	342		
7		1.2	Poniente	Diámetro: 12"		12			20				250		190	380	409	
8		1.3	Dentro (Garganta)	Diámetro: 12"		12			20				250		190	410	409	0.13
9		1.4	Fuera (Codo)	Diámetro: 12"		12			20				250		190	360	349	14
10	2	2.1	Oriente	Diámetro: 12"	12"	12	TuOPAB 3. Tubería horizontal paralela al eje Norte-Sur	20	20	250	250	190	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	259	236		
11		2.2	Poniente	Diámetro: 12"		12			20				250		190	280	314	
12		2.3	Arriba	Diámetro: 12"		12			20				250		190	273	239	
13		2.4	Abajo	Diámetro: 12"		12			20				250		190	294	231	0.38
14	3	3.1	Norte	Diámetro: 4"	4"	4	TuMSOP 1. Tubería vertical	40	40	237	237	120	120	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	363	369		
15		3.2	Sur	Diámetro: 4"		4			40				237		120	352	356	
16		3.3	Oriente	Diámetro: 4"		4			40				237		120	349	337	7.98
17		3.4	Poniente	Diámetro: 4"		4			40				237		120	355	363	
18	4	4.1	Oriente	Diámetro: 12"	12"	12	TeOPXB 21 T horizontal con salida hacia Arriba	20	20	250	250	190	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	259	276		
19		4.2	Poniente	Diámetro: 12"		12			20				250		190	270	286	
20		4.3	Obstrucción	Diámetro: 12"		12			20				250		190			
21		4.4	Abajo	Diámetro: 12"		12			20				250		190	261	272	
22	5	5.1	Oriente	Diámetro: 12"	12"	12	TuOPAB 3. Tubería horizontal paralela al eje Norte-Sur	20	20	250	250	190	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	277	289		
23		5.2	Poniente	Diámetro: 12"		12			20				250		190	273	230	
24		5.3	Arriba	Diámetro: 12"		12			20				250		190	274	282	
25		5.4	Abajo	Diámetro: 12"		12			20				250		190	276	287	
26	6	6.1	Oriente	Diámetro: 12"	12"	12	TeOPXB 21 T horizontal con salida hacia Arriba	20	20	250	250	190	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	514	517		
27		6.2	Poniente	Diámetro: 12"		12			20				250		190	507	502	3.33
28		6.3	Obstrucción	Diámetro: 12"		12			20				250		190			
29		6.4	Abajo	Diámetro: 12"		12			20				250		190	421	484	
30	7	7.1	Oriente	Diámetro: 12"	12"	12	TuOPAB 3. Tubería horizontal	20	20	250	250	190	190	ASTM A53 Gr. E-B steel, carbon steel	263	252	7.32	
31		7.2	Poniente	Diámetro: 12"		12			20				250		190	230	285	3.33

Se observa que se tiene activa la pestaña de la UC-FCCI-101, y en la parte inferior se encuentran las otras 4 unidades de control que conforman este circuito.

Teniendo los valores de velocidad de desgaste por punto (d), se derivó el cálculo del promedio de la velocidad de desgaste (Dprom), para cada unidad de control. Este cálculo forma parte de la estadística cuantitativa, el cual resulta de obtener la suma de los valores de velocidad de desgaste por punto, entre las n posiciones, que si tienen valor de d. Se excluyeron los valores de 0 y -, para la obtención de n, ya que este cambiaría el valor del promedio, disminuyéndolo y afectando en el verdadero comportamiento del circuito.

Para obtener los valores de la suma y el número de posiciones que son significativas, se utilizaron funciones condicionales (SUMAR.SI y CONTAR. SI), para reducir el tiempo de cálculo y evitar errores manuales, al contar con un gran número de valores.

En la tabla 4.2, se muestran los valores de las variables anteriormente mencionadas, para la unidad de control 101, donde el valor de cantidad de elementos con velocidad de desgaste, coincide con el presentado en el capítulo anterior para el circuito 01. CARGA.

Tabla 4.2 Promedio de la UC-FFCI-101.

Suma de las velocidades de desgaste (d) [mpa]	Cantidad de números "n" con velocidad de desgaste	Promedio de la velocidad de desgaste de la unidad (Dprom) [mpa]
426.09	115	3.705

Este promedio obtenido, al contener elementos críticos, podría implicar tener una población dispersa. Para comprobar este problema, se debe acudir a una medida de dispersión definida como desviación típica poblacional. Además también se hará uso de herramientas como la moda y mediana, las cuales son indicadores de la tendencia central de la población o muestra, las cuales se definen a continuación.

4.1.1.2 Mediana, desviación típica muestral y moda

Para evitar confusión, se dará una breve definición de estos conceptos, que se emplearán para entender mejor el comportamiento del circuito y de la unidad misma.

Medidas de tendencia central

- **Media:** La media es la suma de los valores de los elementos dividida por la cantidad de éstos. Es conocida también como promedio, o media aritmética.
- **Mediana:** La mediana estadística es el número central de un grupo de números ordenados por tamaño. Si la cantidad de términos es par, la mediana es el promedio de los dos números centrales.
- **Moda:** La moda estadística es el valor que más se repite en un grupo de números ordenados por tamaño.

Las medidas de dispersión, también llamadas medidas de variabilidad, muestran la variabilidad de una distribución, indicando por medio de un número si las diferentes puntuaciones de una variable están muy alejadas de la media. Cuanto mayor sea ese valor, mayor será la variabilidad, y cuanto menor sea, más homogénea será a la media. Así se sabe si todos los casos son parecidos o varían mucho entre ellos.

- **Desviación típica muestral:** La varianza a veces no se interpreta claramente, para evitar ese problema, se define otra medida de dispersión, que es la desviación típica, o desviación estándar, que se obtiene como la raíz cuadrada positiva de la varianza. La desviación típica informa sobre la dispersión de los datos respecto al valor de la media; cuanto mayor sea su valor, más dispersos estarán los datos. Esta medida viene representada en la mayoría de los casos por S , dado que es su inicial de su nominación en inglés.

Estos indicadores se calcularon por las razones expuestas al principio de este apartado, para facilitar la comprensión de los datos y saber si tenemos un promedio que represente a la población.

En general, para toda la población de cada unidad de control que conforman los circuitos y aunado a los valores calculados por SIMECELE de d , la moda siempre tiene un valor pequeño comparado con los otros 3 conceptos, la mediana es siempre menor a la desviación típica poblacional, y el valor de ésta última, siempre tiene una proximidad más cercana a la velocidad de desgaste promedio de la unidad de control, lo que indica que la dispersión de los valores es demasiado grande en todas las unidades de control de los circuitos seleccionados.

Por ejemplo, en la tabla 4.3 se aprecian estos valores para éste circuito, y claramente se observa como el valor de la desviación es un número grande, que indica la dispersión de los datos, por lo que se concluye que este promedio no es representativo. El mismo procedimiento se realizó para los demás circuitos y se concluyó lo mismo: “no se puede trabajar con el promedio general y es necesario clasificar y acotar los elementos con velocidad de desgaste, hasta que se tenga un intervalo, con el número suficiente de

elementos y con una desviación típica muestral en este caso más pequeña que la mitad promedio”.

Tabla 4.3 Confrontación del promedio con la dispersión de los valores del CIRCUITO 01. CARGA.

UC FINAL	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Mediana	desviación típica poblacional σ	Moda
UC-FCCI-101	3.705	2.34	4.347	0.29
UC-FCCI-102	10.840	5.03	12.796	2.51
UC-FCCI-104	4.947	3.77	3.769	2.51
UC-FCCI-107	4.231	2.66	4.536	1.68
UC-FCCI-113	6.163	4.27	6.136	4.27

Por lo tanto, con base al conocimiento de los valores y juicio estratégico, no se decidió hacer los muestreos convencionales ya que presentarían un problema similar, se procedió a sesgar la información para cada unidad de control, en intervalos de valores de velocidad de desgaste, para decidir cuál de estos, representa a la unidad de control y así, poder obtener el comportamiento más aproximado del circuito para poder obtener las condiciones de operación que garanticen un desgaste homogéneo.

La siguiente tabla muestra estos intervalos con las respectivas características que ayudan a corroborar que tan confiable es el promedio y el intervalo. Se presenta la información de la UC-102, debido a que como se apreció en la tabla anterior, presento el mayor Dprom y también la mayor desviación típica poblacional.

Tabla 4.4 Intervalos de los elementos con velocidad de desgaste de la UC-102.

Circuito 01. Carga 102												
Condiciones de operación	Intervalos	Cantidad de números con velocidad de desgaste [mpa]	Porcentaje de la cantidad de elementos respecto al total	Suma velocidad de desgaste [mpa]	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Moda	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Desviación típica poblacional σ	Promedio - σ	Prom/2 - σ
T=187°C P=1.4 Kg/cm ²	General	106	100%	1149.070	0.28	60.6	5.03	2.51	10.840	12.796	-1.956	-7.376
	Intervalos	Cantidad de números con velocidad de desgaste [mpa]	Porcentaje de la cantidad de elementos respecto al total	Suma velocidad de desgaste [mpa]	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Moda	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Desviación típica muestral s	Promedio - s	Prom/2 - s
	≥ 15	28	26%	818.2	15.08	60.6	27.505	15.64	29.221	11.617	17.604	2.994
	<15	78	74%	330.87	0.28	14.8	3.21	2.51	4.242	3.335	0.907	-1.214
	(10,15)	6	6%	74.83	10.05	14.8	12.565	#N/A	12.472	1.824	10.648	4.412
	<10	72	68%	256.04	0.28	9.49	3.07	2.51	3.556	2.372	1.185	-0.594
	(5,10)	20	19%	134.86	5.03	9.49	6.14	5.03	6.743	1.620	5.123	1.751
	<5	52	49%	121.18	0.28	4.47	2.23	2.51	2.330	1.156	1.174	0.009
	(2.5,5)	25	24%	83.47	2.51	4.47	3.35	2.51	3.339	0.629	2.710	1.041
	<2.5	27	25%	37.71	0.28	2.23	1.4	2.23	1.397	0.612	0.784	0.086
	(1.3,2.5)	15	14%	27.91	1.4	2.23	1.95	2.23	1.861	0.341	1.520	0.589
	<1.3	12	11%	9.8	0.28	1.12	0.84	0.84	0.817	0.279	0.538	0.129
	(1,1.3)	4	4%	4.48	1.12	1.12	1.12	1.12	1.120	0.000	1.120	0.560
	<1	8	8%	5.32	0.28	0.84	0.7	0.84	0.665	0.208	0.457	0.124
(0.5,1)	7	7%	5.04	0.56	0.84	0.84	0.84	0.720	0.150	0.570	0.210	
<.5	1	1%	0.28	0.28	0.28	0.28	#N/A	0.280	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	

Se puede ver en la tabla, que la primera fila corresponde a los valores de la población de la unidad, donde entre el valor máximo y mínimo de velocidad de desgaste hay un rango demasiado amplio y los elementos con (d), además éstos están centralizados en 2.51 mpa, por lo que aquí hay otra evidencia de la dispersión existente en esta unidad 102. Además de que el principal indicador de que tan confiable es el promedio, el cual está indicado como la mitad del promedio menos la desviación típica muestral, tiene un valor negativo. Para que el promedio sea representativo, este indicador debe ser positivo. Por lo que se procedió a buscar aquel rango o intervalo que cumpliera las siguientes características: 1) Contar con más del 40% de la población, 2) El resultado de la mitad del promedio menos la desviación, debe ser positivo.

Nuevamente, situándose en la tabla, más de la mitad de los intervalos cumplen con la segunda condición, pero en la primera resultar tener una cantidad de elementos insuficientes para ser representativos, más sin embargo, el intervalo con valores con menos de 5 milésimas de pulgada por año (<5), cumple satisfactoriamente estos 2 puntos, conteniendo 52 elementos de los 106 de esta unidad de control, y por lo cual fue seleccionado.

Este procedimiento se realizó para todas las unidades de control, el cual garantiza excluir los elementos críticos, y seleccionar el intervalo apropiado, que permita obtener los Dprom que definan perfectamente el circuito para el cumplimiento de uno de los objetivos.

4.1.1.3 Diámetros y celdas

Para obtener datos generales, se desglosó la información exportada y se ordenaron sus diámetros de menor a mayor, en función de las características de las posiciones (posiciones diferentes a las mencionadas en el segundo capítulo: norte, sur, oriente, etc).

La tabla 4.5, ejemplifica lo realizado, mediante las condicionales CONTAR.SI.CONUNTO y SUMAR.SI.CONJUNTO. Esta tabla, también nos muestra el Dprom para cada diámetro existente en la unidad de control, es importante aclarar que para el valor de la última fila y columna, éste no representa la suma de los Dprom de los diámetros. De hecho, este valor es el Dprom de la unidad de control presentado en la tabla 4.3 y coincide con el mismo valor, el cual se obtuvo dividiendo el valor de la suma de los valores de d de todos los diámetros, entre las n posiciones que cuentan con un valor de d.

Tabla 4.5 UC-FFCI-101 diámetros.

1P3						
Diámetros en “	4	6	8	10	12	Total
Cédula	40	40	40	40	20	
Espesor nominal (mils)	237	280	322	365	250	
Límite de retiro (mils)	120	150	180	190	190	
Total de posiciones	164	48	28	44	104	388
Posiciones con obstrucción	2	4	0	3	3	12
Posiciones con -	76	16	19	6	39	156
Posiciones con valor de 0	45	14	9	12	25	105
Posiciones con velocidad de desgaste	41	14	0	23	37	115

1P3						
Diámetros en “	4	6	8	10	12	Total
Suma de los valores	133.85	47.51	0	111.36	133.37	426.09
Dprom	3.265	3.394	0.000	4.842	3.605	3.705

Esta tabla se omitirá en las próximas páginas para cada circuito, ya que se mostrará una general, que compete a todos los diámetros de cada circuito, al igual que su Dprom del circuito sin omitir elementos críticos y sub-críticos, el cual resultará interesante comparar con el seleccionado mediante el procedimiento citado anteriormente.

4.1.1.4 Diámetro con mayor y menor promedio de desgaste

Este es un criterio para encontrar un factor clave en cada unidad de control para todos los circuitos.

Este dato se extrae de la tabla anterior, seleccionando el Dprom más alto de los diferentes diámetros de cada unidad de control. Observando nuevamente la tabla, se nota que los diámetros de 10” y 4”, cumplen con las condiciones mencionadas. Esto se realiza debido a que se planteó en los objetivos, además de que resulta oportuno compararlo con los demás diámetros de cada unidad de control que conforma la unidad de control con éste escenario.

4.1.1.5 Características del máximo valor de velocidad de desgaste de la unidad de control.

Estas características son 3: el tipo de nivel, la posición y el diámetro, las cuales se plasmaran en el resumen de las propiedades que posteriormente se mostrara para cada circuito.

Esta información se extrae de las tablas generadas para cada unidad de control y de los filtros. Dicha información se presentará en el siguiente apartado, el cual corresponde al resumen del circuito, el cual englobara algunos de los puntos vistos en este apartado y presentará nueva información, con el fin de encontrar aquellos datos, valores o características que detallen, definan y describan mejor éste y los demás circuitos.

Además, también se realizará para circuito, el conteo, la suma y el promedio de todos los elementos con velocidad de desgaste para las posiciones y tipos de niveles, con el fin de encontrar el factor común de desgaste, así como observar en qué posición y tipo de posición hay más elementos, y si esto influye en su desgaste, al igual que para los tipos de niveles.

Resumen de propiedades.

Después de desglosar la información, y ordenarla para cada unidad de control, se dispuso a clasificar el circuito por medio de los diámetros con lo que este trabaja, de menor a mayor, con el propósito de hacer más visual los datos y resultados mostrados y, cumplir con los objetivos.

De los 7 diámetros que ocupan las líneas de este circuito, los diámetros más representativos son 3: 4”, 8”, 12”, siendo éstos 2 últimos, los más significativos, ya que aparte de tener el mayor número de posiciones en total, también lideran a las posiciones con d, como se muestra en la tabla 4.6, además, también se puede observar la influencia de éstos sobre el Dprom del circuito.

Tabla 4.6 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 01. CARGA.

Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 01. CARGA								
Diámetros del circuito en "	1	1.5	4	6	8	10	12	
Cédula	80	80	40	40	40	40	20	
Espesor nominal (mils)	179	200	237	280	322	365	250	
Límite de retiro (mils)	90	100	120	150	180	190	190	TOTAL
Total de posiciones	20	32	184	164	192	72	200	864
Posiciones con obstrucción	2	2	2	5	3	6	7	27
Posiciones con -	18	22	77	34	38	18	54	261
Posiciones con valor de 0	0	5	52	46	50	18	34	205
Posiciones con velocidad de desgaste	0	3	53	79	101	30	105	371
Promedio velocidad de desgaste	0	2.053	3.171	5.753	8.937	5.288	6.52	6.401
Estos 371 elementos con una velocidad de desgaste, se distribuyen de la siguiente manera:								
Posiciones con Norte	0	0	6	13	18	3	12	52
Posiciones con Sur	0	1	4	13	17	1	13	49
Posiciones con Oriente	0	1	9	11	9	6	19	55
Posiciones con Poniente	0	1	10	9	12	7	20	59
Posiciones con Arriba	0	0	8	10	10	5	13	46
Posiciones con Abajo	0	0	5	10	12	2	13	42

Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 01. CARGA								
Diámetros del circuito en "	1	1.5	4	6	8	10	12	
Cédula	80	80	40	40	40	40	20	
Espesor nominal (mils)	179	200	237	280	322	365	250	
Límite de retiro (mils)	90	100	120	150	180	190	190	TOTAL
Posiciones con Dentro (Garganta)	0	0	5	8	12	2	9	36
Posiciones con Fuera (Codo)	0	0	6	5	11	2	6	30
Posiciones con Posición 1	0	0	0	0	0	1	0	1
Posiciones con Posición 2	0	0	0	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 4	0	0	0	0	0	1	0	1

Por el contrario, el diámetro de 4", resulta ser el más reemplazado en este circuito para este material, ya que contiene 129 posiciones que presentan un engrosamiento mayor, menor o igual al 5%, respecto la última medición de espesor realizada. El diámetro más pequeño, no aporta elementos con d, ya que por lo observado, todas las piezas y tubería que emplean este diámetro, han sido reemplazadas.

Cabe explicar, que todos números presentados en la anterior tabla, fueron extraídos de las unidades de control sin el previo tratamiento para encontrar el rango o intervalo que arroje el promedio representativo. Es por esto, que los promedios y demás números presentados, contienen esos valores críticos y sub-críticos. En este caso no afecta presentarlos y emplearlos, ya que son demostrativos y permiten definir la distribución total de los elementos con d.

A pesar de que las posiciones con – y 0, tengan en común que presentan un incremento en el espesor, debido al emplazamiento de piezas nuevas, el comportamiento no tendría que ser el mismo. En este caso, en números no representan los mismos elementos, pero la conducta es similar, siendo parecida al del total posiciones. Esto significa que, los diámetros de 4", 8" y 12, en líneas y accesorios son los más ocupados y asimismo son los más reemplazados.

Como ya se indicó, el Dprom presentado es para los diámetros y el circuito, contempla la dispersidad del sistema, pero naturalmente, es necesario conocerlo para cada unidad de control en general para comprobar que no es característico del sistema y proceder a

realizar la clasificación de la información en intervalos, ya que esto encamina a uno de los objetivos y, además, perfecciona la descripción de la unidad y al mismo circuito. Esta información se ubica en la tabla 4.7, que además contiene más detalles peculiares para complementar el reporte de la unidad de control como se mencionó en la justificación del presente trabajo. Igualmente, esta tabla contiene y sintetiza los resultados trascendentes, excepto aquellas que contemplan los valores del intervalo seleccionado que garantice el modelado correcto del circuito, para la obtención de las condiciones de operación óptimas. Éstos estarán presentes en la tabla 4.8 y serán los los empleados en los siguientes apartados para este circuito.

Tabla 4.7 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 01. CARGA.

UC FINAL	UC-FCCI-101	UC-FCCI-102	UC-FCCI-104	UC-FCCI-107	UC-FCCI-113
Forrado	SI	SI	SI	SI	SI
CLASE	1P3	1P3	3P3	3P3	1P3
Material	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B
Niveles de Tuberías	97	34	21	40	24
Temperatura de operación (°C)	65	187	182	288	187
Presión de operación (Kg/cm ²)	2.5	1.4	17.0	17.0	4.9
Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	3.705	10.840	4.947	4.231	6.163
Máximo velocidad de desgaste	27.07	60.60	19.53	21.53	31.29
Mediana	2.34	5.03	3.77	2.66	4.27
Desviación típica poblacional σ	4.347	12.796	3.769	4.536	6.136
Moda	0.29	2.51	2.51	1.68	4.27
\emptyset con el promedio de desgaste mayor	10	8	8	10	6
Promedio	4.842	15.733	4.947	6.753	6.389

UC FINAL	UC-FCCI-101	UC-FCCI-102	UC-FCCI-104	UC-FCCI-107	UC-FCCI-113
∅ con el promedio de desgaste menor	4	12	-	1.5	4
Promedio	3.265	8.106	-	2.053	1.420
Tipo de nivel con el máximo valor de velocidad de desgaste	TeNXOP 13. T vertical con salida al Sur	CoABDF 4. Codo en el plano perpendicular al eje Arriba-Abajo	CoNSDF 5. Codo en el plano perpendicular al eje Norte-Sur	TeNXAB 15. T horizontal con salida al Sur	CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente
Posición con el máximo valor de velocidad de desgaste	Poniente	Dentro (Garganta)	Dentro (Garganta)	Abajo	Dentro (Garganta)
∅ con máximo valor de velocidad de desgaste	10	8	8	10	6
Elementos con velocidad de desgaste crítica > 15 mpa	3	28	2	1	4
Promedio de velocidad de desgaste crítica	22.603	29.221	18.135	21.530	26.100
Promedio de velocidad de desgaste del circuito	6.401				

De la tabla anterior, es importante destacar los siguientes detalles:

- Se aprecia que los diámetros de mayor tamaño (6",8" y 10"), excepto 12", presentan un desgaste mayor comparados con los de 1", 1.5" y 4", aunque estos primeros tienen la ventaja de tener un margen más amplio en relación al espesor nominal y su límite de retiro. Además, se puede decir con seguridad que la posición con mayor velocidad de desgaste es "dentro (garganta)", la cual pertenece al codo, aunque para el tipo de nivel, la realidad es diferente, claro pertenece a un codo, pero con diferentes orientaciones, por lo que referente al desgaste, se puede indicar que el tipo de nivel o la orientación no es factor, más sin en cambio la pieza y la

posición si lo son para este circuito y las condiciones de operación. Las condiciones de operación, porque tanto la unidad 102 y la 113 solo tienen de diferente la presión, con una diferencia de 3.5 Kg/cm², y tienen los Dprom más elevados del circuito debido a que contiene más elementos críticos. También, se observa que se cuenta con 38 niveles críticos en total, siendo la unidad 102, la que aporta más elementos con un desgaste mayor a 15 mpa, teniendo un promedio de 29.221 mpa, representando del poco menos doble del considerado como crítico. Por otra parte, coinciden los diámetros con el mayor promedio de desgaste y máximo valor de velocidad de desgaste.

Por último, se observa que las 2 unidades de control señaladas previamente, a pesar de poseer condiciones de operación relativamente intermedias dentro del rango del circuito, contienen la información más relevante y crítica, a pesar de no contar con el mayor número de posiciones, ya sea totales con (d) y con las condiciones más extremas.

A continuación se presenta la tabla previamente señalada con los Dprom, que modelaran el circuito, en estos promedios se descartó valores de 5mpa en adelante, ya que como se observa, la mayoría de los elementos, se encuentran dentro del intervalo seleccionado.

Tabla 4.8 Información de los intervalos seleccionados para modelado del circuito 01. CARGA.

Unidad de control	Intervalos	Porcentaje de la cantidad de elementos respecto al total que cuenta con una (d)	Suma velocidad de desgaste [mpa]	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Moda	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Desviación típica muestrals	Prom/2 - s
UC-FCCI-101	(0.01,4.99)	77%	163.86	0.13	4.98	1.71	0.29	1.862	0.697	0.234
UC-FCCI-102	(0.01,4.99)	49%	121.18	0.28	4.47	2.23	2.51	2.33	1.156	0.009
UC-FCCI-104	(0.01,4.99)	60%	81.2	0.84	4.46	2.51	2.51	2.619	1.063	0.247
UC-FCCI-107	(0.01,4.99)	72%	46.2	0.28	4.2	1.68	1.68	2.009	0.918	0.086
UC-FCCI-113	(0.01,4.99)	62%	120.05	0.28	4.84	3.13	4.27	2.928	1.361	0.103

Teniendo estos valores y resultados, las unidades de control de cada circuito, se ordenaron de menor a mayor en función de la temperatura y presión de operación respectivamente, esto con la finalidad de proceder a la obtención de aquellas condiciones de operación óptimas. Este procedimiento se realizó para obtener el verídico comportamiento de las unidades de control, además de estipular las condiciones de operación en alguna sección del circuito, cuando las 2 líneas de los gráficos se intersecten.

4.1.1.6 Ordenamiento de las UC, en función de T y P

Como se aprecia en la tabla 4.9, el lugar ocupado de las unidades de control en su posición normal, suele cambiar cuando se ordena conforme a sus condiciones de operación. Para este caso, únicamente coincide la unidad 101 en la posición 1, para cuando se ordena en relación a su temperatura de operación, de menor a mayor.

Además, en la posición cinco, existe un punto de igualdad, lo que nos indica que al menos existe una intersección, de la cual ya se tiene la información, solo habría que compararse con los demás puntos si es que existen, e indicar que presión y temperatura sería la óptima.

Tabla 4.9 Posiciones de las unidades de control, acorde al ordenamiento del CIRCUITO 01. CARGA.

	Posición Normal	Posición conforme a la temperatura de operación	Posición conforme a la presión de operación
1	UC-FCCI-101	UC-FCCI-101	UC-FCCI-102
2	UC-FCCI-102	UC-FCCI-104	UC-FCCI-101
3	UC-FCCI-104	UC-FCCI-102	UC-FCCI-113
4	UC-FCCI-107	UC-FCCI-113	UC-FCCI-104
5	UC-FCCI-113	UC-FCCI-107	UC-FCCI-107

4.1.2 Obtención de las condiciones de operación óptima.

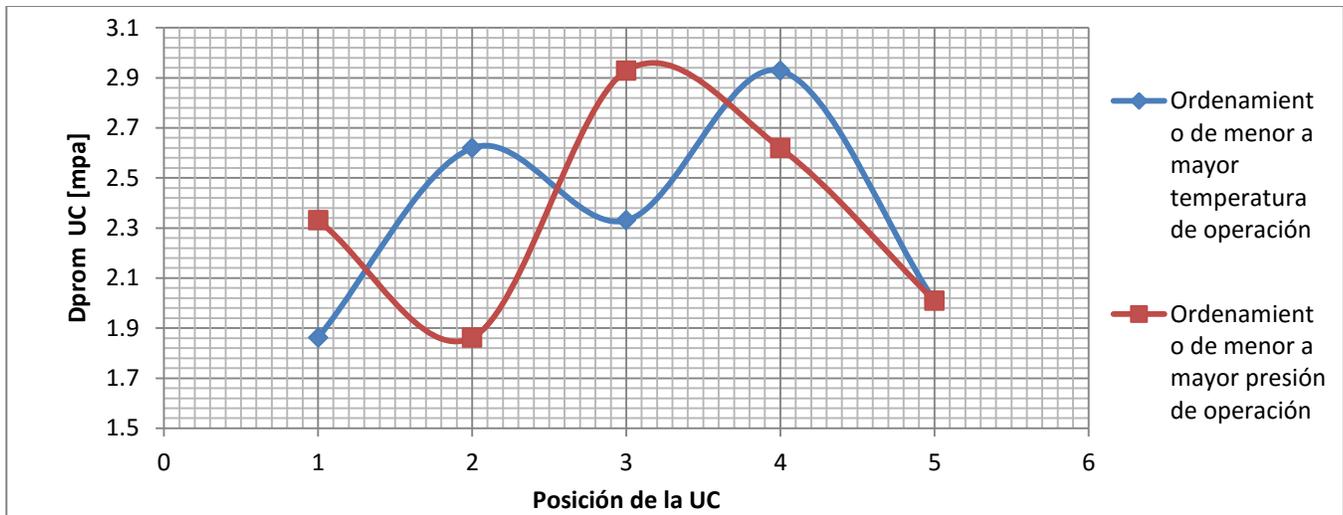
La obtención de estas condiciones, como se puede apreciar, representa la parte principal del trabajo, y es por esta razón que se dedicará en este apartado, para este circuito, a detallar el procedimiento realizado para la obtención de los valores de T y P.

Habiendo definido las posiciones de las unidades de control, mediante el ordenamiento ya definido, hay que agruparlas juntos con sus Dprom representativo, como se muestra en la tabla 4.10, la cual además también contiene las condiciones de operación del circuito.

Tabla 4.10 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 01. CARGA.

Posición de la unidad de control, acorde al ordenamiento	Ordenamiento de menor a mayor temperatura de operación				Ordenamiento de menor a mayor presión de operación			
	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] T	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] P
1	65	2.5	UC-FCCI-101	1.862	187	1.4	UC-FCCI-102	2.330
2	182	17.0	UC-FCCI-104	2.619	65	2.5	UC-FCCI-101	1.862
3	187	1.4	UC-FCCI-102	2.330	187	4.9	UC-FCCI-113	2.928
4	187	4.9	UC-FCCI-113	2.928	182	17.0	UC-FCCI-104	2.619
5	288	17.0	UC-FCCI-107	2.009	288	17.0	UC-FCCI-107	2.009

Para observar los demás puntos de posible intersección, se necesita graficar lo ya mencionado y generar resultados. En la siguiente gráfica, se observa la conducta del Dprom en función de T y P, además de contener el punto de intersección ya mencionado para la posición 5.



Gráfica 4.1 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 01. CARGA.

Se entrevé que el orden si afecta la respuesta del comportamiento del circuito para este material, por lo que además existen otros 3 puntos de interés, de los cuales se mostrará el procedimiento para encontrar el Dprom, T y P, en las páginas siguientes.

Asimismo, es importante destacar lo que se observa en la posición número 3, ya que para el Dprom en función de la temperatura, presenta un mínimo en el cual después de este, sigue el mismo comportamiento, pareciéndose al típico representado por la distribución bimodal, y en el otro caso, concerniente a la presión, a partir de esta posición, se observa que existe una función decreciente.

4.1.2.1 Primera intersección.

Mediante la gráfica anterior, se dejó entrever que la primera intersección se encontraba entre las 2 primeras posiciones, por lo que a través de líneas de tendencia, es posible encontrar el valor aproximado mediante las funciones polinómicas (lineal, cuadrática, cúbicas, etc).

A continuación, se muestran las ecuaciones lineales y cuadráticas en función del ordenamiento de menor a mayor temperatura y presión para este primer punto, donde:

Dprom es el valor deseado.

n es la posición que le correspondería al valor de la intersección, que podría traducirse como una unidad de control intermedia.

Cuando se presente un par de ecuaciones lineales o de mayor grado, la primera representara la tendencia para el ordenamiento en función de la temperatura y la segunda corresponderá a describir la conducta en función de la presión.

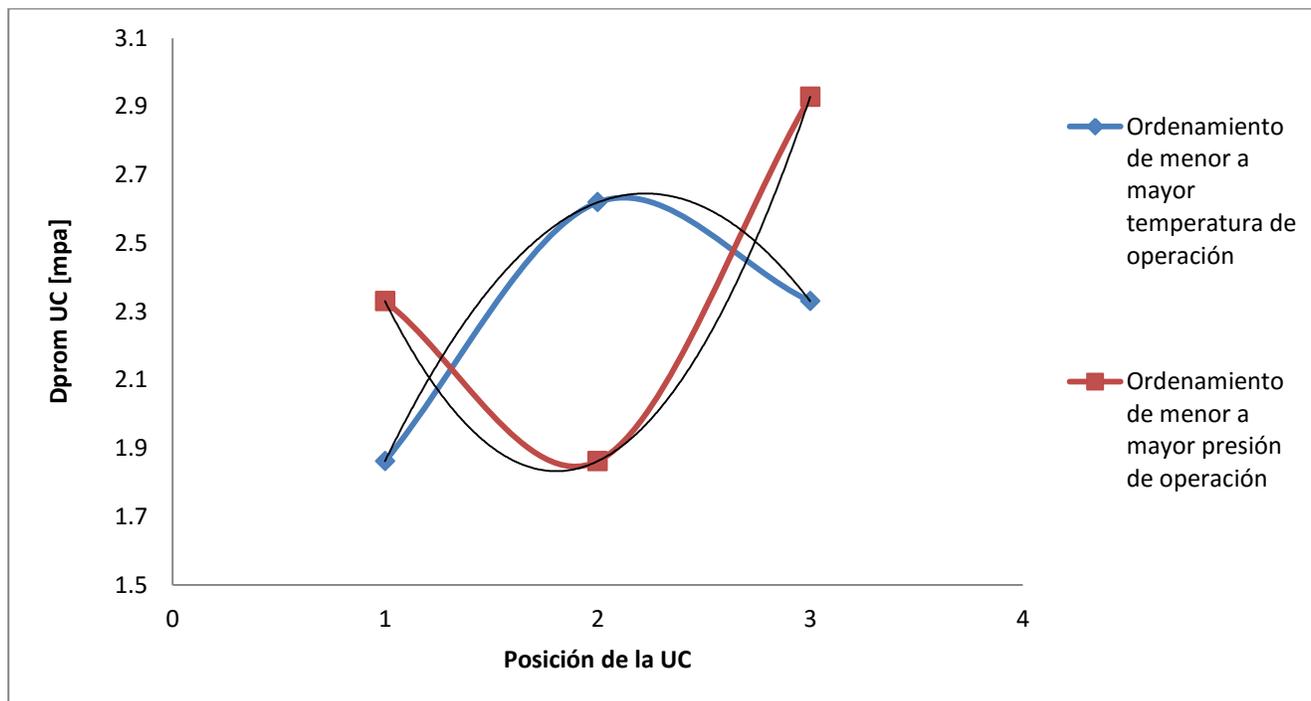
Las siguientes ecuaciones representan el comportamiento del Dprom de las unidades del primer punto de interés. Además, estas permiten conocer los valores de Dprom y n de la intersección. Dicha intersección como se aprecia en la gráfica 4.2, se encuentra próxima a la posición 1.3 y para poder obtener este valor, hay que establecer una igualdad entre estas 2 ecuaciones, proponiendo valores para n, hasta que la igual se cumpla.

$$D_{prom} = -0.5231n^2 + 2.3267n + 0.0585$$

Ecuación 7

$$D_{prom} = 0.7672n^2 - 2.7699n + 4.3331$$

Ecuación 8



Gráfica 4.2 Líneas de tendencia de la función cuadrática de la primera intersección del CIRCUITO 01. CARGA.

Con estas 2 ecuaciones se obtiene 2 valores de Dprom con una diferencia de 10^{-6} mpa entre sí, asimismo, un valor de n, el cual se señalará más adelante como “Posición P”, en las tablas 4.11 y 4.12”.

Para aproximarse a una exactitud, también se emplea la representación lineal de los 2 puntos entre los que existe dicha intersección con las ecuaciones 8 y 9. Estas ecuaciones son empleadas de la misma forma que las anteriores, se establece una igualdad y se busca aquel valor de n (posición de la intersección) que genere el mismo valor. Tal como en el caso anterior, se generan 3 resultados; la n lineal, la cual se nombrará como “Posición L” y los 2 valores de Dprom.

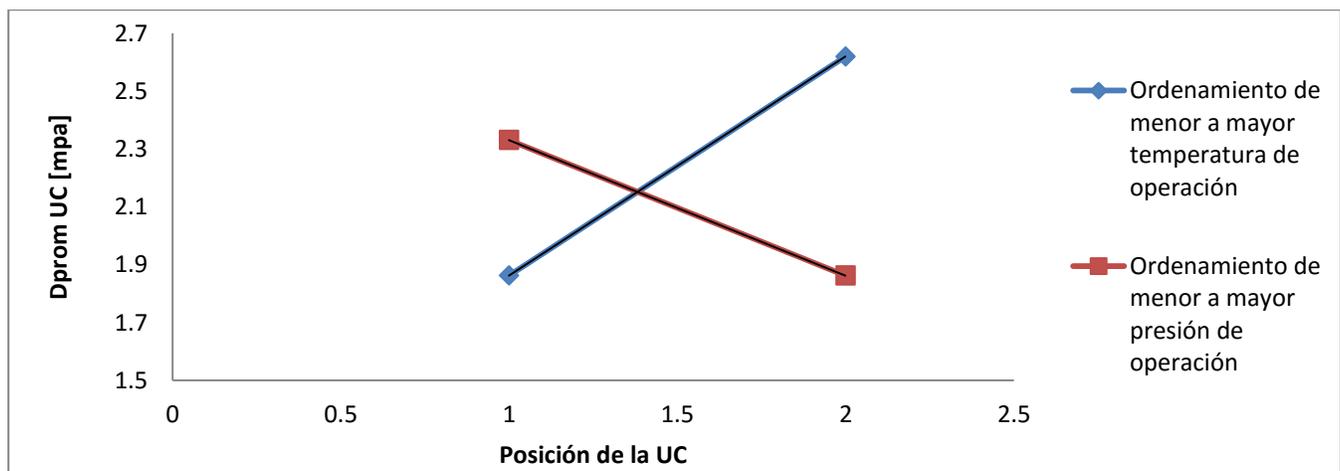
$$D_{prom} = 0.7573n + 1.1047$$

Ecuación 9

$$D_{prom} = -0.4683n + 2.7987$$

Ecuación 10

En el siguiente gráfico, comparado con el anterior, se observa que el comportamiento cambia, y el valor buscado se desplaza un cuanto más a la derecha. Para este caso resulta conveniente usar ambos valores y su promedio más que nada, ya que en la representación anterior, se observó que el valor se corría un poco a la izquierda. Teniendo en cuenta estas observaciones, es pertinente trabajar con ambos resultados.



Gráfica 4.3 Líneas de tendencia de la función lineal de la primera intersección del CIRCUITO 01. CARGA.

Para comprender el efecto que causa dicha diferencia del desplazamiento señalado, se exponen los resultados obtenidos hasta el momento de las 4 ecuaciones en la siguiente tabla.

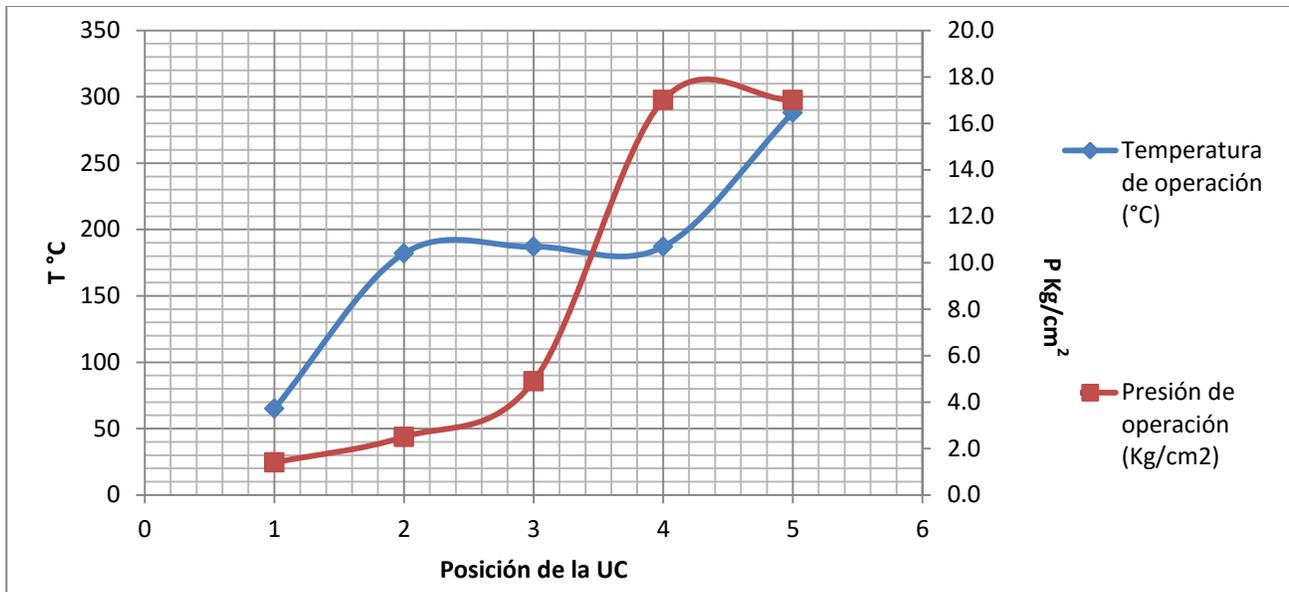
Tabla 4.11 Dprom's y posiciones calculadas de la primera intersección del CIRCUITO 01. CARGA.

Características de la primera intersección					
Datos de la ecuación polinómica		Datos de la ecuación lineal			
Posición P	1.208	Posición L	1.382	Diferencia entre las posiciones calculadas	0.174
Dprom f(T)	2.106	Dprom f(T)	2.151	Diferencia entre el Dprom calculado	0.045
Dprom f(P)	2.106	Dprom f(P)	2.151		
Diferencia de los Dprom obtenidos $f(T)-f(P) = 0 D$	0.000	Diferencia de los Dprom obtenidos $f(T)-f(P) = 0 D$	0.000		

Entre los valores calculados para las posiciones hay una diferencia de 0.174, representando este valor, esos desplazamientos mencionados. Pero si recordamos el valor observado y señalado en la gráfica 4.1, comprobamos que la representación polinómica se recorrió hacia la derecha y la lineal, hacia la izquierda. Por lo que el tomar el promedio de estos 2 resulta conveniente, y más cuando existan estas desviaciones. Existen otros casos, donde la línea de tendencia representará perfectamente la intersección buscada en otros puntos óptimos para este y los demás circuitos.

Por esta razón, tomara en cuenta los valores de posición P, posición L, y su promedio para calcular las condiciones de operación.

La gráfica 4.4, presenta las temperaturas y presiones en el orden establecido para este apartado, con el fin de facilitar y encontrar los valores de las posiciones encontradas. También se podría trabajar con los Dprom, pero estéticamente no es prudente, además de que el comportamiento resulta confuso, más sin en cambio, con las posiciones, se observa el aumento planteado desde el principio.

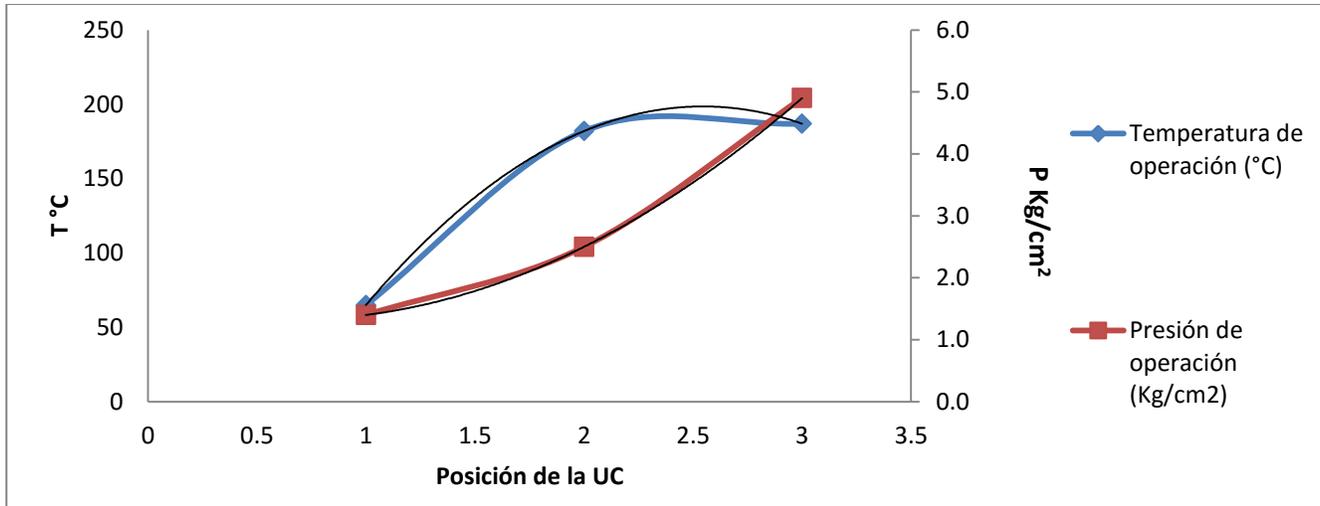


Gráfica 4.4 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 01. CARGA.

Usando el método gráfico, mediante la utilización de cualquiera de las posiciones calculadas, se puede obtener la temperatura y presión. Es importante aclarar que la escala a la izquierda, representa a los valores de temperatura y los de la derecha, conciernen a los de la presión.

Para lograr un menor margen de error, se emplea el procedimiento anterior, el cual consiste en seleccionar 2,3 o más puntos para la representación del comportamiento, para posteriormente obtener sus ecuaciones y sustituir el valor de posición L, posición P y Posición Promedio en ellas.

En esta primera intersección, la representación más aproximada se da con los primeros 3 y 2 puntos, como se vislumbran en las 2 gráficas siguientes. Obteniendo las funciones de las líneas de tendencias representativas de estos puntos, se sustituye los valores de posiciones y se obtienen 12 resultados, 6 para la temperatura y 6 para presión respectivamente. Estos valores se presentan en la tabla 4.12, junto con otros 2 valores de referentes del método gráfico.



Gráfica 4.5 Líneas de tendencia de las funciones cuadráticas para la obtención de T y P del CIRCUITO 01. CARGA.

Con esta representación de la intersección, se generan nuevamente 2 ecuaciones, la primera para calcular la temperatura y la presión con la segunda, mediante los valores de las posiciones calculadas.

$$T = -56n^2 + 285n - 164$$

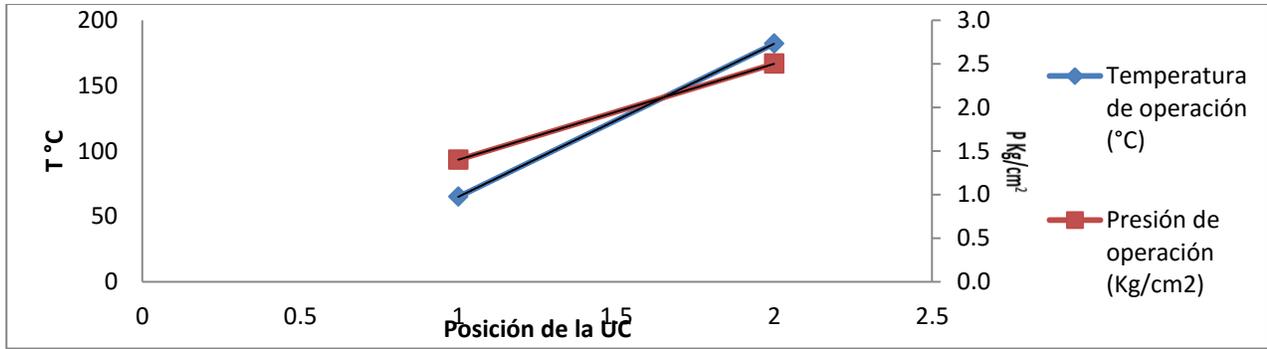
Ecuación 11

$$P = 0.65n^2 - 0.85n + 1.6$$

Ecuación 12

Y nuevamente, para reducir el error derivado de las pequeñas desviaciones observada en las líneas de tendencia, se procede a generar el modelado mediante la tendencia lineal para recorrer los valores y tener resultados confiables y precisos.

En la siguiente gráfica, se presentan los 2 primeros puntos, que incumben al número en el que se presenta la intersección, y esta grafica también representa las ecuaciones lineales presentadas debajo de ésta para la obtención de la temperatura y presión respectivamente.



Gráfica 4.6 Líneas de tendencia de las funciones lineales para la obtención de T y P del CIRCUITO 01. CARGA.

$$T = 117n^2 - 52$$

Ecuación 13

$$P = 1.1n + 0.3$$

Ecuación 14

Con estos pares de ecuaciones, y los valores de posición obtenidos, es posible obtener los 6 valores de temperatura y 6 de presión, además de los 2 calculados mediante el método gráfico y así ver que tan diferentes son por las desviaciones señaladas, además de conocer la sensibilidad son las funciones mediante la sustitución de valores en las ecuaciones.

Como ya se había señalado, esta información es presentada en la tabla 4.12, la cual se presenta a continuación. Esta tabla está dividida en 2 columnas principales: temperatura y presión. Tanto para la temperatura y presión, se hizo uso de las 3 posiciones señaladas previamente.

Tabla 4.12 Valores calculados de T y P de la primera intersección del circuito 01. CARGA.

Condiciones de operación calculadas para la primera intersección											
TEMPERATURA °C						PRESIÓN Kg/cm ²					
Posición P	1.208	Posición L	1.382	Posición Promedio	1.295	Posición P	1.208	Posición L	1.382	Posición Promedio	1.295
T°C Lineal	89.383	T°C Lineal	109.715	T°C Lineal	99.549	P Kg/cm ² Lineal	1.629	P Kg/cm ² Lineal	1.820	P Kg/cm ² Lineal	1.725
T°C Polinómica	98.621	T°C Polinómica	122.938	T°C Polinómica	111.202	P Kg/cm ² Polinómica	1.522	P Kg/cm ² Polinómica	1.667	P Kg/cm ² Polinómica	1.590
T°C Gráfica	100					P Kg/cm ² Gráfica	1.7				

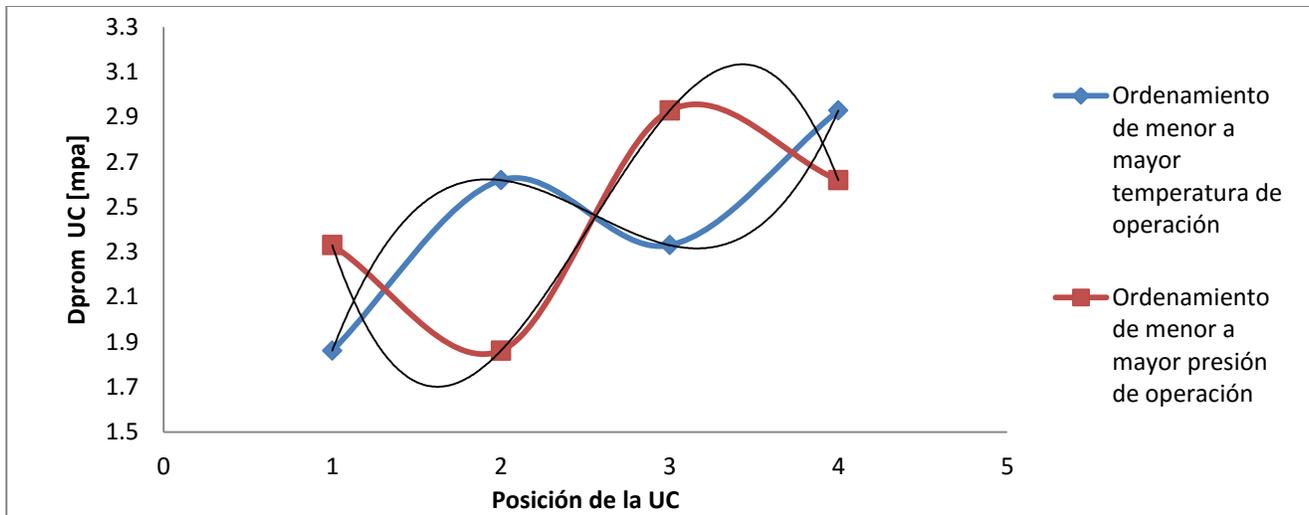
Con estos valores, se obtiene el promedio de T y P de la primera intersección para mayor confiabilidad en el resultado, en cuanto el valor de Dprom, se obtiene de los 4 presentados en la tabla 4.11. Dichos valores se presentarán al final de junto con los demás resultados de las otras 3 intersecciones para este circuito.

Retomando estos primeros resultados, se observa que en la presión, los valores no son distantes, además de que mantienen un rango pequeño en comparación con el que tiene la temperatura, que va de 89.383 °C a 122.938 °C, y que además, se nota la sensibilidad de esta variable en función del desgaste presentado en la pared de la línea de proceso.

4.1.2.2 Segunda intersección.

En este apartado, se mostrarán los puntos seleccionados para la obtención de la función de mayor grado, con 2 graficas, la primera para encontrar Dprom y la posición, la segunda para las condiciones de operación, mediante el mismo procedimiento efectuado para la primera intersección, haciendo uso de otras ecuaciones, valores y tablas.

La grafica 4.7 muestra la segunda intersección con sus respectivas representaciones mediante las líneas de tendencia, en este caso, se observa que esta segunda intersección, está perfectamente representado el punto de intersección, por lo que se obtendrán valores tendrán mayor validez y acercamiento al punto exacto. Asimismo, se ve la utilización de los 4 primeros puntos para la generación de las líneas de tendencia, que entre la posición 2 y 3 se encuentra la mejor representación, lo cual es pertinente, ya que ahí también se encuentra el valor buscado.



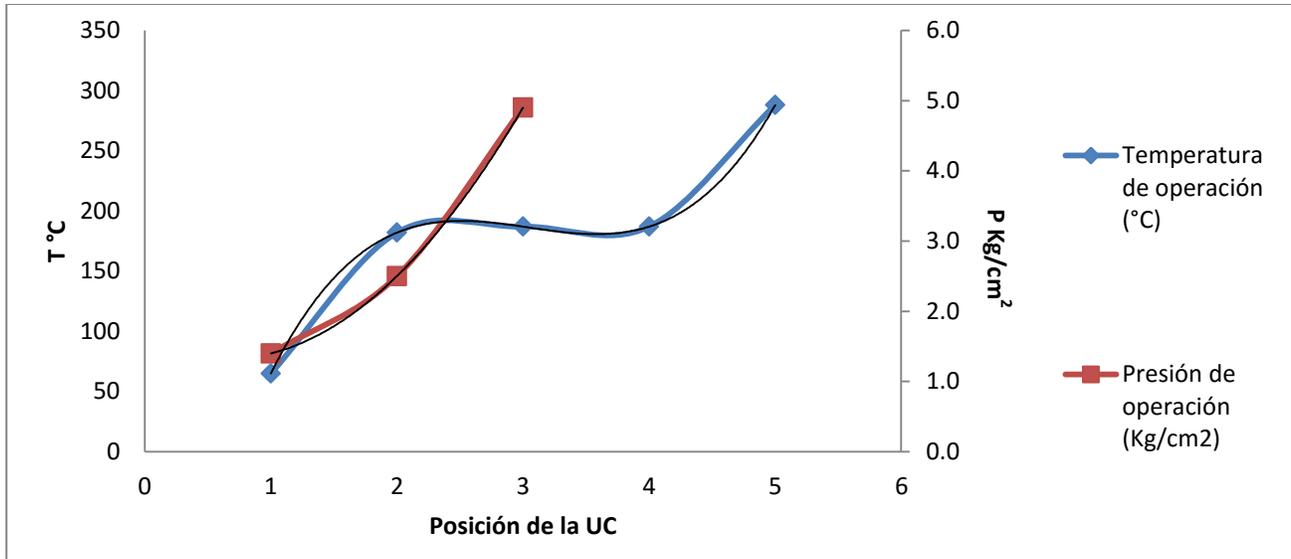
Gráfica 4.7 Líneas de tendencia de las funciones mayores de primer grado, para la obtención de Dprom y posición de la segunda intersección en el CIRCUITO 01. CARGA.

Teniendo la ecuaciones (2 cúbicas y 2 lineales), se procede a efectuar la igualdad y obtener los valores de Dprom y la posición como en el caso anterior. Para esta intersección, como ya se apreció, las representaciones de las líneas de tendencia tienen mayor similitud a la tendencia original, por lo que la diferencia entre las posiciones calculadas fue de 0.005 y para el Dprom fue de 0.004 mpa, que en comparación con el caso anterior, es menor la discrepancia entre los valores obtenidos mediante la ecuación lineal y la de mayor grado.

Con los valores de la posición P, L y promedio (2.564, 2.559, 2.561), nuevamente se calcula las temperaturas y presiones mediante las ecuaciones de la representación del gráfico 4.8.

En este gráfico, la representación entre las mediciones 2 y 3, se encuentran perfectamente descritas por las ecuaciones, por lo que a priori, se sabe que debe haber un menor rango entre el menor y mayor valor calculado para la presión y temperatura.

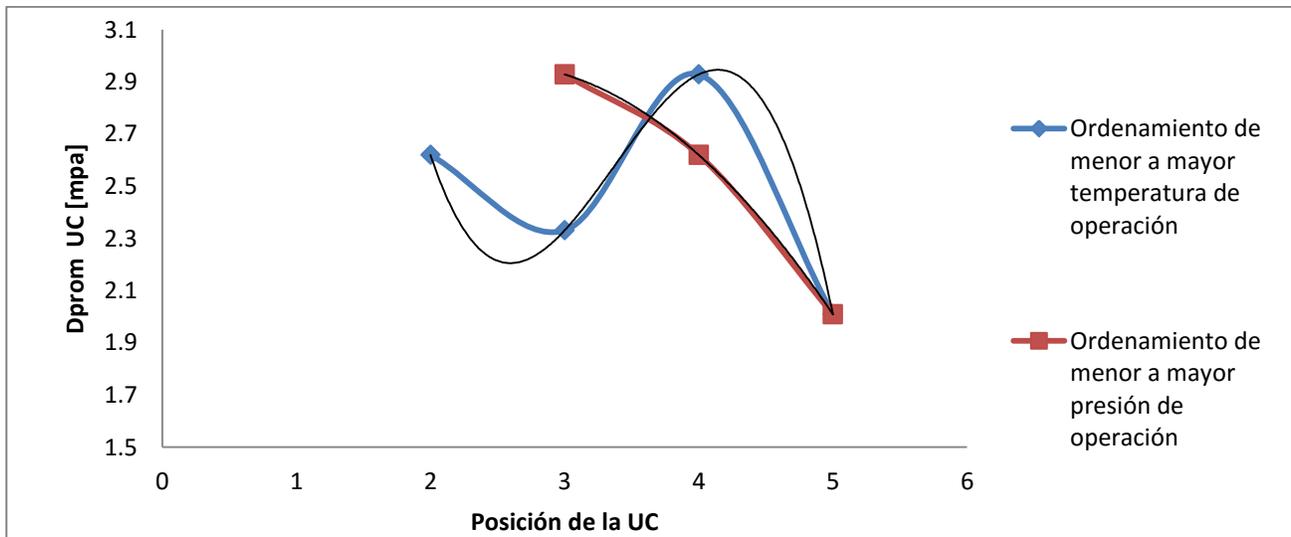
La menor temperatura encontrada fue 184.794 °C para la ecuación lineal de temperatura y la mayor fue 191.711 °C, más cercana al valor obtenido mediante el método gráfico el cual fue de 190 °C. Para las presiones se presentó un rango más cerrado [3.6, 3.853] Kg/cm², por lo que existe una mayor confiabilidad en esta intersección.



Gráfica 4.8 Líneas de tendencia de las funciones mayores de primer grado, para la obtención de T y P de la segunda intersección en el CIRCUITO 01. CARGA.

4.1.2.3 Tercera intersección.

Naturalmente, no se puede trabajar con las ecuaciones de la gráfica 4.7, que aunque contemplen la tercera intersección, no existe la adecuada representación. Es necesario emplear otras que describan de mejor manera el comportamiento entre la posición 3 y 4. Por ejemplo en la gráfica 4.9 se señalan los puntos empleados y se ve cómo cambia la línea de tendencia respecto la presentada a la segunda.

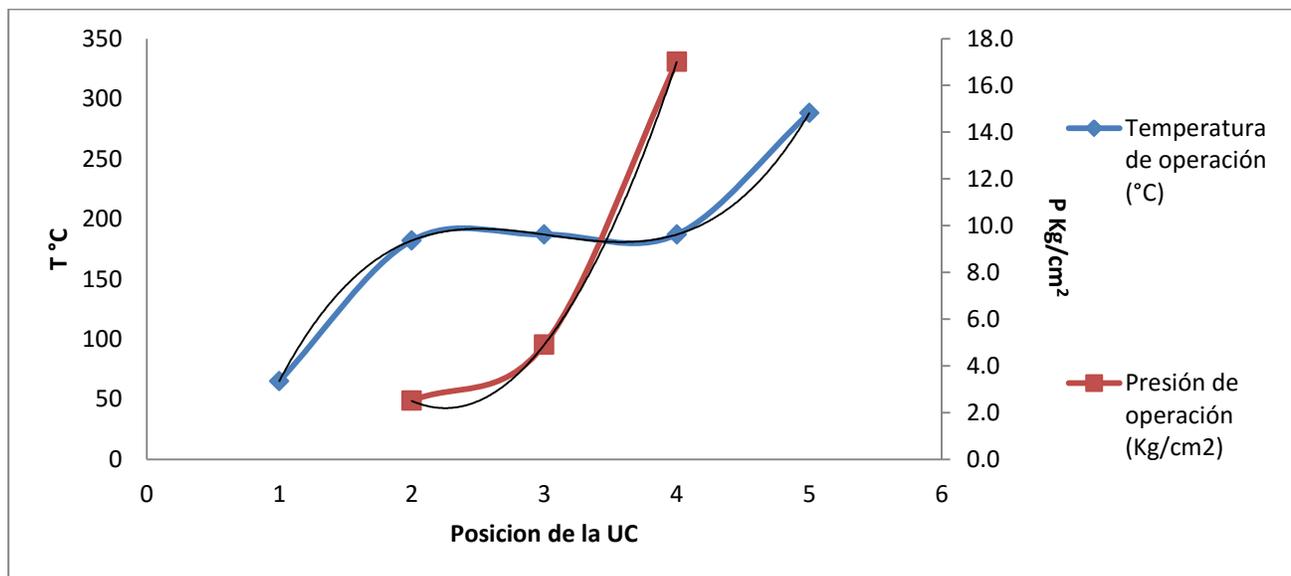


Gráfica 4.9 Líneas de tendencia de las funciones mayores de primer grado, para la obtención de Dprom y posición de la tercera intersección en el CIRCUITO 01. CARGA.

Se puede observar un ligero desplazamiento a la derecha en la intersección con las líneas de tendencia respecto a las del comportamiento original, por lo que se espera que las temperaturas y presiones tengan un incremento liviano respecto al real.

Para los datos de posición calculadas, existe una diferencia de 0.018, y para los Dprom, la diferencia es de 0.040 mpa. Estas diferencias son un poco más grandes que la intersección anterior, pero aun así, son valores que debido a su proximidad, sirven para el asunto en cuestión.

Nuevamente se presentan en la gráfica 4.10, los puntos de T y P, en relación a la posición adquirida por el ordenamiento que permiten la mejor representación de esta intersección. Con respecto al grafico 4.8, este se modifica en los puntos seleccionados para encontrar la presión, ya que con el anterior no existía la mínima representación entre las posiciones 3 y 4.



Gráfica 4.10 Líneas de tendencia de las funciones mayores de primer grado, para la obtención de T y P de la tercera intersección en el CIRCUITO 01. CARGA.

Con las ecuaciones respectivas para cada línea de tendencia, nuevamente se vuelve a repetir el procedimiento mostrado en la primera intersección de este circuito mediante los valores de las posiciones calculadas para este tercer punto de interés.

Se observó que con el empleo de las ecuaciones lineales para encontrar T y P, seleccionando solo los valores de las posiciones 3 y 4, los valores aumentaron

nuevamente, en este caso para la temperatura, al no tener pendiente adquiere el mismo valor de estos puntos, aumentando un poco más de 6°C, respecto a los valores calculados con la ecuación de cuarto grado que describe a la temperatura. En relación a la presión, este aumento no es tan evidente, ya que se manejan valores más pequeños y próximos como en las intersecciones anteriores.

4.1.2.4 Cuarta intersección.

Recordando lo señalado al principio del apartado “Obtención de condiciones de operación óptimas”, se había mencionado que existía una intersección al final, como lo muestra la gráfica 4.1, donde de antemano se conocían todas las características que se buscaron en las demás intersecciones. Además se había señalado él porque estas condiciones podrían ser seleccionados y se platicó un poco del proceso.

En el siguiente apartado se complementa lo comentado y además, presentan los valores obtenidos en las 3 intersecciones anteriores. Asimismo, éste apartado se presentará para los demás circuitos, con el fin de comparar los valores obtenidos en el caso de que exista más de uno, y analizar del por qué resulta ser la solución y alternativa, a través de los resultados y la descripción del circuito.

4.1.3 Condiciones de Operación.

Los valores de las intersecciones vistas mediante la gráfica 4.1, solo fueron comentadas a grandes rasgos de sus características y un valor puntual nunca se concretó, más que para la cuarta intersección, ya que para la primera intersección a pesar de mostrar todo lo realizado para cada intersección, no se dio un solo valor para el Dprom, la temperatura y presión y, para las otras 2 intersecciones solo se mostraron gráficos, y se comentó un poco de algunos valores y que tan próximos eran entre ellos. Esto se hizo con el fin de mostrar al último solo lo datos de interés, para no recurrir en retornar páginas y perder de vista cada valor encontrado.

La tabla 4.13, presenta los diferentes puntos de mejora, relacionados con el desgaste de la línea de procesos, la temperatura y presión.

Tabla 4.13 Condiciones de Operación encontradas en el CIRCUITO 01. CARGA.

Puntos	T°C	P Kg/cm ²	Dprom [mpa]
1	104.487	1.665	2.129
2	188.505	3.743	2.460
3	183.381	12.298	2.745
4	288	17.0	2.009

En relación a los Dprom, se aprecia que existe una diferencia de 0.736 mpa entre el mayor y el menor, un valor pequeño a pesar de contar con una variabilidad en los resultados. El mayor valor lo encontramos en la tercera intersección, observando que es donde se halla la segunda presión más alta. A pesar de que tiene el mayor Dprom, observamos sus condiciones de operación no son las de mayor valor, ya que se encuentran en medio de los 2 extremos. Sorpresivamente para las condiciones de operación más elevadas para este material y servicio, se obtiene el menor Dprom. El primer punto se establecería para cambiar las condiciones de la unidad 102, el tercero para la unidad 104, el segundo para la unidad 105 y por último el cuarto en la unidad 106. A continuación se justificara el porqué de esta conjetura. Para la unidad 102, a estas condiciones el material aumentaría su vida útil a la salida del tanque de carga para llegar a la succión de las bombas 3-J/JA, obviamente por la disminución de su velocidad de desgaste aproximadamente en 2 décimas, respecto al Dprom calculado para la muestra representativa, lo que implicaría disminuir la temperatura un poco más de 42 °C y aumentar la presión en mucha menor proporción, lo cual es razonable, ya que aprovecharía de mejor manera la carga calórica del tren de intercambiadores de calor que se encuentran en próximas unidades de control. Para el tercer punto, se estableció en la unidad 104, debido a que sería a la temperatura a la que saldría el fluido del intercambiador 6-C y entra al intercambiador 29-C1, a costa de incrementar un poco más de una décima su velocidad de desgaste, pero augurando el intercambio de calor entre el aceite decantado y la mezcla de gasóleos, ya que este primero debería ceder calor, lo cual no se ve reflejado en el censo de unidades de control, debido a que indica la misma temperatura para la entrada del intercambiador y a su salida, lo cual no tiene sentido, ya que si fuera el caso, no tendría razón de ser el poner un

intercambiador de calor, ya que no se aprovecharía la energía calórica que debe tener esta corriente en la primera etapa antes de entrar al reactor. El segundo punto, está establecido para la unidad consecutiva a esta última, la cual, casualmente también ocupa el mismo material y va del intercambiador 29-C1, al 29-C2, donde se buscaría bajar la temperatura a costa de una caída de presión, en referencia a las condiciones plasmadas en el censo para la unidad 105, ya que en vez de salir a 252 °C y 17 Kg/cm², se buscaría una temperatura de 188.505 °C y una presión de 3.743 Kg/cm², augurando una velocidad de desgaste de 2.460 mpa, valor menor al de la unidad anterior, permitiendo que se aproveche el intercambio de calor del aceite cíclico pesado con la mezcla de gasóleos, ya que en ambos intercambiadores transita el ACP, y a la salida del 29-C2 y entrada de los 8-C2/C4, se implementa las condiciones del cuarto punto, para la unidad 106, modificando nuevamente lo establecido en el censo, con lo cual saldría a una temperatura de 288 °C, estableciendo un Dprom de 2.009 mpa, y así, la unidad 107, que va de este último intercambiador a las válvulas a FV-35/36, tendría las condiciones de 295 °C y una presión de 17 Kg/cm², aprovechando de esta manera el calor cedido de la recirculación de los fondos de la fraccionadora principal en estos intercambiadores, debido a que anteriormente, los valores de la unidad 106 y 107, estaban plasmados de manera inversa a los establecidos con esta mejora, existiendo una incongruencia notable, ya que en la unidad 106, se tenía señalado una temperatura de 295 °C, temperatura adquirida a través del ACP. Posteriormente, en la unidad 107, la cual sale de estos últimos intercambiadores, tenía las condiciones señaladas por el cuarto punto de intersección, lo cual promovía la existencia de un enfriamiento, siendo este fenómeno inverosímil, ya que el reflujos fondos de la fraccionadora llegan con una temperatura mayor, debido a que provienen de la sección del rehervidor de la fraccionadora, con lo que no es posible que exista un descenso de temperatura, ya que este circuito busca calentar la alimentación para la carga al reactor.

Es importante aclarar que las condiciones, dependen de los requerimientos del proceso, por ejemplo, cuando se reduce la carga a menos de la de diseño, ocurren varias cosas que afectan el funcionamiento de la planta: va a disminuir la velocidad del levantamiento en el punto de inyección de la carga y a velocidades bajas de levantamiento, puede presentarse inestabilidad en la circulación; además de eso, van a aumentar los tiempos de

residencia del catalizador y el aceite en el elevador, lo que hará aumentar ligeramente la conversión, pero aumentará también la formación de carbón y puede redesarintegrar parte de la gasolina. En el regenerador, la disminución de aire requerido abatirá la velocidad a través de la cama y tenderá a disminuir la eficiencia de la regeneración.

Para contrarrestar los efectos derivados de la operación de la planta a baja carga, deberá cambiarse la alimentación al punto de inyección inferior y la presión de operación deberá bajarse, tanto como lo permita la reducción de carga del compresor de gas. El cambio al punto inferior de inyección puede hacerse al 80 % de la carga de diseño (32 000 BPD). En este punto, la presión puede bajarse de .140 a .210 Kg/cm²; al 60 % de la carga de diseño. Estos ajustes harán posible el mantenimiento de velocidades satisfactorias. Si es necesario mantener la conversión en el nivel deseado, puede bajarse un poco la temperatura de salida del Riser, la cual es de 527 °C.

4.2 CIRCUITO 09. ACEITE CICLICO LIGERO, Servicio: Aceite cíclico ligero

Como ya se explicó, este compuesto es producto de la desintegración catalítica que se lleva a cabo en el reactor del convertidor, el cual se separa en la fraccionadora principal y es agotado con vapor, para que de esta manera esté listo para ser enviado al límite de batería.

4.2.1 Resumen de propiedades.

A continuación se mostrara el resumen de la información relevante y los resultados obtenidos del circuito mediante 2 tablas, similares a las que mostraron en el apartado de "Resumen de propiedades" en el circuito anterior.

La primera tabla en este apartado, siendo la 4.14 en el capítulo, enseña el número de elementos contenidos para las diferentes posiciones, a través de la clasificación con los diámetros existente en este circuito.

Como se aprecia, existen 5 diámetros, siendo el menor y mayor 2" y 8" respectivamente. Además, se observa que el diámetro de 4" tiene el mayor número de posiciones con velocidad de desgaste, con 318 y, es el más empleado con 480 posiciones en total. Este diámetro también tiene el mayor Dprom y el menor lo tiene la tubería con 6". La tubería con 2" pulgadas, contiene solo 8 elementos con una posible posición con medición, pero

estas 8 posiciones presentan un aumento mayor al 5% de espesor respecto a tu anterior medición, por lo que no contribuye cuantitativamente al Dprom del circuito y al estudio en general.

Respecto a las posiciones u orientaciones con una velocidad de desgaste calculada, aquella que tiene más elementos es poniente, seguido por su par oriente. El par que le sigue con mayor número de elementos, es norte-sur y posteriormente arriba-abajo.

Tabla 4.14 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.

Diámetros en función de las características de las posiciones del circuito 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO						
Diámetros del circuito en "	2	3	4	6	8	
Cédula	80	40	40	40	40	
Espesor nominal (mils)	218	216	237	280	322	
Límite de retiro (mils)	100	100	120	150	180	TOTAL
Total de posiciones	8	56	480	188	100	832
Posiciones con obstrucción	0	3	6	12	5	26
Posiciones con -	8	7	59	38	12	124
Posiciones con valor de 0	0	24	97	64	34	219
Posiciones con velocidad de desgaste	0	22	318	74	49	463
Promedio velocidad de desgaste	0	2.133	3.660	1.436	2.682	3.129
Estos 463 elementos con una velocidad de desgaste, se distribuyen de la siguiente manera:						
Posiciones con Norte	0	4	40	12	5	61
Posiciones con Sur	0	6	36	14	7	63
Posiciones con Oriente	0	4	56	4	10	74
Posiciones con Poniente	0	3	63	3	9	78
Posiciones con Arriba	0	1	32	13	8	54
Posiciones con Abajo	0	1	35	18	4	58
Posiciones con Dentro (Garganta)	0	2	34	3	5	44
Posiciones con Fuera (Codo)	0	1	18	2	1	22
Posiciones con Posición 1	0	0	1	2	0	3
Posiciones con Posición 2	0	0	1	1	0	2
Posiciones con Posición 3	0	0	1	1	0	2
Posiciones con Posición 4	0	0	1	1	0	2

Para los codos, que aún no se conoce a qué tipo de nivel corresponden las posiciones, se sabe mediante el conteo presentado en esta tabla que la posición dentro (garganta) contiene mayor número de elementos con desgaste, y por lo tanto posiblemente un mayor valor de mpa, respecto a su par fuera (codo).

A continuación, se presenta el resumen de las propiedades obtenidas para este circuito, mediante la tabla 4.15, donde se observa que la unidad 904, no contiene elementos críticos y su promedio es el menor, por lo que podría ser que para este fluido, la tubería sufre mayor desgaste cuando la presión y temperatura aumentan, como lo dice la teoría y se comprueba con la unidad 902, y ésta sufre un menor desgaste cuando se disminuye la temperatura y no la presión.

Tabla 4.15 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.

UC FINAL	UC-FCCI-901	UC-FCCI-902	UC-FCCI-903	UC-FCCI-904
Forrado	Si	Si	No	No
CLASE	1P3	3P3	3P3	1P3
Material	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B
Niveles de Tuberías	38	82	58	30
Temperatura de operación (°C)	248	248	55	55
Presión de operación (Kg/cm2)	1.6	13.0	15.2	14.0
Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	2.603	3.791	2.656	0.761
Máximo velocidad de desgaste	24	20.66	33.64	3.2
Mediana	1.55	2.79	1.18	0.61
Desviación típica poblacional σ	3.783	3.818	4.406	0.607
Moda	1.55	3.07	0.3	0.3
\emptyset con el promedio de desgaste mayor	8	4	4	6
Promedio [mpa]	2.682	4.110	3.090	0.850
\emptyset con el promedio de desgaste menor	6	6	6	3
Promedio [mpa]	2.214	1.609	1.064	0.699
Tipo de nivel con el máximo valor de velocidad de desgaste	ReOPAB 9. Reducción horizontal paralela la eje Norte-Sur	CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente	TeNSAX 16. T horizontal con salida hacia Abajo	CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente
Posición con el máximo valor de velocidad de desgaste	Poniente	Dentro (Garganta)	Arriba	Oriente

UC FINAL	UC-FCCI-901	UC-FCCI-902	UC-FCCI-903	UC-FCCI-904
Ø con máximo valor de velocidad de desgaste	8	4	4	6
Elementos con velocidad de desgaste crítica > 15 mpa	2	9	2	0
Promedio de velocidad de desgaste crítica	20.360	17.591	26.070	0
Promedio de velocidad de desgaste del circuito	3.129			

Para empezar, en esta tabla, tratando de encontrar una posible tendencia en relación al valor de Dprom y las condiciones de operación, se observa que en las primeras 2 unidades de control, emplean 248° C, pero la 902 trabaja con una presión de 13 Kg/cm², teniendo un valor mayor de Dprom, en relación a que genera los 1.6 Kg/cm², de la 901. Por lo que se podría decir que para este fluido, el material presenta un mayor desgaste a presiones moderadas con una temperatura elevada, por lo que sería preferible trabajar con una presión baja y una temperatura alta. Como segundo caso, se encontró un par de temperaturas moderadas con el mismo valor, y unas presiones similares y moderadas en valor. Aquí se observa que al aumentar levemente la presión, se hallan valores sumamente diferentes en su Dprom, siendo así preferible trabajar con 55° C y 14 Kg/cm², para llevar al producto al límite de batería o transportarlo como producto de materia prima mediante tuberías. Por lo que en este circuito, tomando en cuenta todos los valores de la población, se observó que a una misma temperatura al aumentar la presión, aumenta el desgaste de la línea de proceso.

Para proceder a la obtención de las condiciones de operación óptimas, nuevamente hay que sesgar la información, con el fin de tener datos homogéneos en la modelación del circuito mediante los Dprom, que en la tabla 4.16 se plasman. Estos valores, como se ha indicado en páginas anteriores, ya no contienen elementos con información crítica o cercana a ella, además, como se observa en la tabla, estos promedios contienen la mayor

parte de la información de las unidades de control para el circuito de aceite cíclico ligero, por lo que estos valores son los correctos para dicho modelado.

Tabla 4.16 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.

Unidad de control	Intervalos	Porcentaje de la cantidad de elementos respecto al total	Suma velocidad de desgaste [mpa]	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Moda	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Desviación típica muestrals	Prom/2 - s
UC-FCCI-901	(0.01,4.99)	90%	87.31	0.15	4.49	1.39	1.55	1.647	0.437	0.387
UC-FCCI-902	(0.01,4.99)	74%	388.79	0.1	4.75	1.95	3.07	2.025	1.000	0.012
UC-FCCI-903	(0.01,4.99)	85%	117.35	0.1	4.93	0.89	0.3	1.290	0.618	0.027
UC-FCCI-904	(0.01,2.49)	97%	25.71	0.25	2.29	0.61	0.3	0.695	0.336	0.011

Para la unidad 904, es evidente que su Dprom resultará menor a comparación de la demás, ya que el intervalo tomado fue de valores mayores a 0.01 mpa y menores a 2.5, debido a que no se presentaron elementos con mayor valor hasta los 5 mpa, conteniendo éste intervalo el 97% de elementos con una velocidad de desgaste.

Como en la tabla 4.16, coincide que la unidad 902 contiene el mayor Dprom, y la 904 el Dprom de menor valor, por lo que las aseveraciones realizadas para la tabla anterior en relación a las condiciones de operación y sus desgaste siguen siendo válidas.

4.2.1.1 Ordenamiento de las UC, en función de T y P

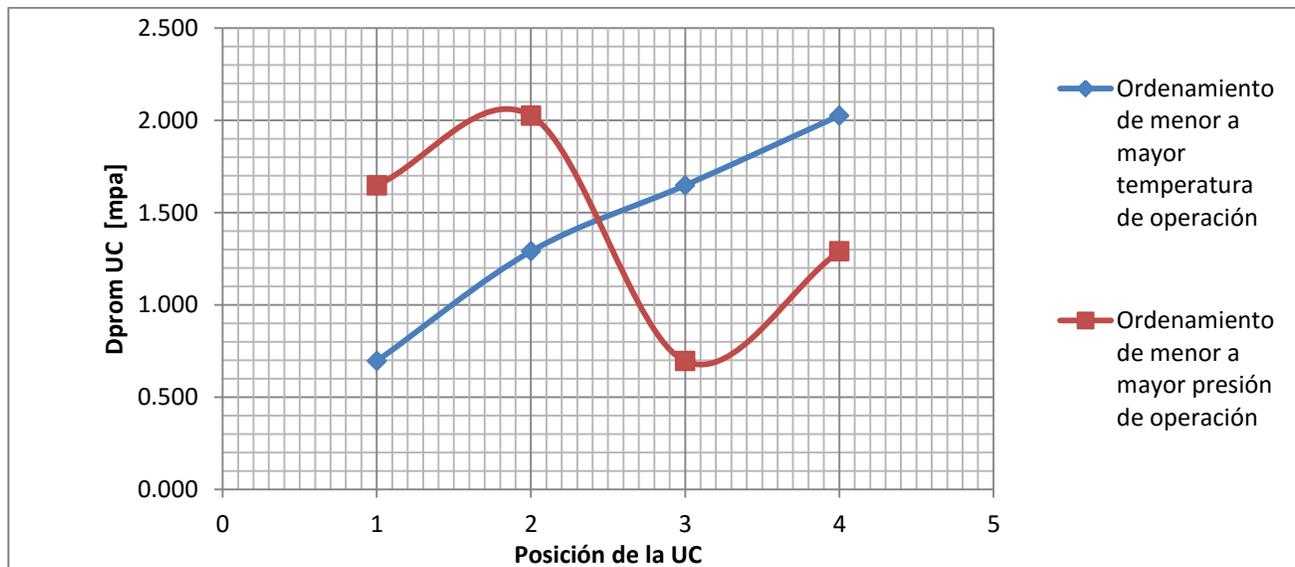
Nuevamente, se ordenan estos últimos Dprom obtenidos, como lo muestra la tabla 4.17, donde las posiciones no coinciden en ningún punto como en el circuito anterior.

Tabla 4.17 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.

Posición de la unidad de control, acorde al ordenamiento	Ordenamiento de menor a mayor temperatura de operación				Ordenamiento de menor a mayor presión de operación			
	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] T	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] P
1	55	14.0	UC-FCCI-904	0.695	248	1.6	UC-FCCI-901	1.647
2	55	15.2	UC-FCCI-903	1.290	248	13.0	UC-FCCI-902	2.025
3	248	1.6	UC-FCCI-901	1.647	55	14.0	UC-FCCI-904	0.695
4	248	13.0	UC-FCCI-902	2.025	55	15.2	UC-FCCI-903	1.290

4.2.2 Obtención de las condiciones de operación óptima.

Para el ordenamiento de los Dprom en función de la temperatura, se alcanza a apreciar que existe un comportamiento lineal, el cual se aprecia en la gráfica 4.11. Para el comportamiento en función de las presiones, se observa que el valor de la intersección, esta próximo al valor del punto de inflexión.

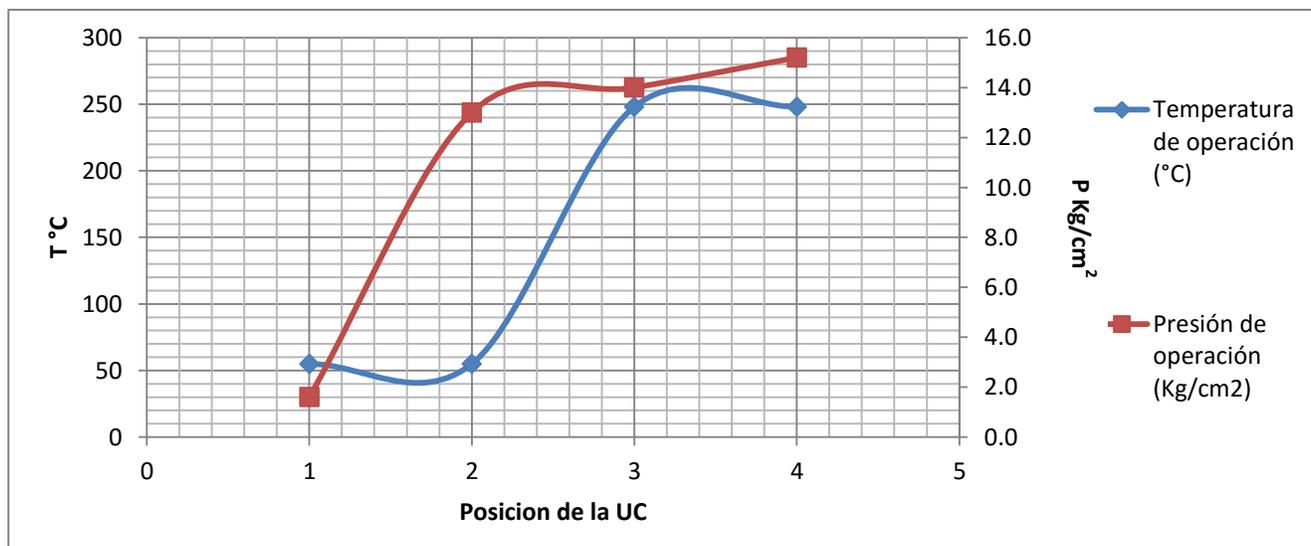


Gráfica 4.11 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.

Para obtener los valores de las posiciones y D_{prom} como en el circuito anterior, se utilizaron los 4 puntos, debido a que la ecuación mediante la línea de tendencia representa perfectamente la intersección.

El D_{prom} calculado fue de 1.451 mpa, en una posición de 2.431. Si se comparan estos valores con los observados en la gráfica, éstos se validan, por lo que es correcto emplearlos para la obtención de las condiciones de operación, a través de las ecuaciones resultantes de las líneas de tendencia para las presiones y temperaturas.

Como ya se explicó, se utilizará el valor de la posición donde se encuentra el D_{prom} de la intersección, y como ya vimos, este valor se encuentra entre la posición 2 y 3. Para encontrar la temperatura se utilizarán los 4 puntos mostrados en la gráfica 4.12, ya que la ecuación generada, representa exactamente el comportamiento entre estas 2 posiciones y para la presión, se utilizará de la posición 2, en adelante para generar la ecuación mayor a la de primer grado y posteriormente, utilizar en ambos casos, los 2 puntos extremos donde está presente la intersección y obtener el comportamiento lineal para encontrar otro par de ecuaciones, que generen otros 6 resultados de condiciones de operación.



Gráfica 4.12 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.

Las temperaturas encontradas para las 3 posiciones generadas, conforme al procedimiento mostrado en la primera intersección del circuito anterior (lineal, polinómica, promedio), se obtuvieron valores sumamente parecidos, siendo el mínimo, el más alejado

de los demás, con un valor de 135.977 °C y el promedio de los 6 restantes fue de 137.902, cercano a los 138 °C observado en este mismo gráfico. Referente a la presión, los valores calculados, al contar con una mayor exactitud en la intersección anterior, tuvieron una mayor proximidad con una diferencia de 0.034 Kg/cm² entre el máximo y menor valor, pero para el valor observado en la gráfica, resulto ser mayor (13.8 Kg/cm²), ya que se aprecia un máximo entre la posición 2 y 3, cuando se modela el comportamiento con los 4 puntos, pero al excluir el primer punto, cambia la tendencia y se observa solo un comportamiento lineal, es por eso que los valores entre estos 2 métodos difieren.

4.2.3 Condiciones de Operación.

Ya con los 14 valores obtenidos, 7 para cada variable (temperatura y presión), se obtiene el promedio y se presenta el valor resultante en la tabla 4.18, donde se observa las características de la intersección a excepción de la posición, ya que esta solo fue un medio para encontrar el Dprom, la temperatura y presión, ya que físicamente no se interpreta como un valor que pueda señalar una característica importante del circuito, ya que además no existen unidades de control en esa posición.

Tabla 4.18 Condición de Operación encontrada en el CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.

Puntos	T°C	P Kg/cm ²	Dprom [mpa]
1	137.627	13.473	1.451

Con este punto encontrado, se concluye que se debe establecer una unidad de control entre la unidad 902 y 903, colocando un enfriador, así se reducirá los 82 niveles de la unidad 902, los cuales tienen una velocidad de desgaste promedio de 2.025 mpa, modificando y aumentando la presión de salida de las bombas 5-J/JA/JB, para que a la salida de este enfriador, la presión sea la observada en el punto uno de la tabla anterior, con el fin de augurar un menor desgaste y mayor seguridad al retirarle calor al ACL en 2 etapas, la primera etapa a estas condiciones para el enfriador requerido, y la segunda, correspondiente al enfriador 4-C de la unidad 903, donde sale a 55 °C, y así, ser enviado al límite de baterías. Con esta implementación, se tendría un comportamiento lineal decreciente de la velocidad de desgaste, a partir de la unidad 902, hasta la 905, la cual

viene siendo la 904 conforme el censo y la última del circuito, ya que con el enfriador colocado, la unidad 903 sería nueva y se desplazarían las demás unidades de control en una unidad,

4.3 CIRCUITO 15. NAFTA, Servicio: Nafta

Como se explicó en el tercer capítulo, la nafta sale como producto de la fraccionadora principal, y al salir se divide en 2 corrientes, la primera utilizada como reflujo en la fraccionadora para cumplir con las especificaciones de fraccionamiento deseadas para el aceite cíclico ligero y para la gasolina, y la segunda se envía al sistema de pumparound de nafta pesada, para la recuperación de calor de la nafta en la sección de recuperación de vapores. La recuperación de calor en el sistema de pumparound de nafta pesada reduce los requerimientos de enfriamiento del sistema de reflujo del domo de la fraccionadora. A diferencia del calor recuperado en el pumparound de nafta pesada, el calor removido en el sistema de reflujo del domo no puede ser reutilizado efectivamente debido a las bajas temperaturas del sistema, por ello este calor debe ser expulsado a la atmósfera y al sistema de agua de enfriamiento.

4.3.1 Resumen de propiedades.

Este circuito presenta una variedad de diámetros importante, con 9 diámetros diferentes, aunque no todos ayudan al estudio en cuestión, debido a que los diámetros de, 2" y 12", suman 11 elementos con un valor de velocidad de desgaste de los 505 en total que hay con esta especificación. Además de que el diámetro de 1.5" contiene solo 4 posiciones y ninguna tiene registrado un valor de espesor que pueda ser utilizada para calcular el desgaste. También se puede observar en la tabla 4.19, que el diámetro con el mayor D_{prom} es el de 12" y debido a que solo contiene 9 elementos, no contribuirá significativamente en el D_{prom} del circuito, y se comprueba porque el valor de este D_{prom} es de 2.720 mpa, estando más cercano al D_{prom} del diámetro de 6" el cual contiene 304 elementos con velocidad de desgaste.

En correspondencia a los 505 elementos con una velocidad de desgaste, nuevamente el par oriente-poniente contiene el mayor número de estos elementos, aunque ahora la posición oriente tiene 4 elementos de más. Además, se aprecia cómo se distribuyen los

304 elementos del diámetro de 6”, aportando un número de elementos parecidos en las posiciones: norte, sur, oriente y poniente, que sumados con 196 de los 304.

Tabla 4.19 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 15. NAFTA.

Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 15. NAFTA.										
Diámetros del circuito en "	1.5	2	3	4	6	8	10	12	18	
Cédula	80	80	40	40	40	40	40	20	20	
Espesor nominal (mils)	200	218	216	237	280	322	365	250	312	
Límite de retiro (mils)	100	100	100	120	150	180	190	190	190	TOTAL
Total de posiciones	4	48	160	156	624	104	64	24	44	1228
Posiciones con obstrucción	0	4	2	2	11	4	2	2	1	28
Posiciones con -	4	41	21	49	122	75	10	2	11	335
Posiciones con valor de 0	0	1	49	76	187	13	17	11	6	360
Posiciones con velocidad de desgaste	0	2	88	29	304	12	35	9	26	505
Promedio velocidad de desgaste	0.000	0.480	1.371	1.746	3.151	2.607	2.782	4.226	2.964	2.720
Estos 505 elementos con una velocidad de desgaste, se distribuyen de la siguiente manera:										
Posiciones con Norte	0	0	15	2	47	3	1	3	0	71
Posiciones con Sur	0	0	14	6	48	3	3	3	2	79
Posiciones con Oriente	0	1	8	5	52	0	11	1	3	81
Posiciones con Poniente	0	1	12	2	49	0	8	2	3	77
Posiciones con Arriba	0	0	9	1	29	3	4	0	5	51
Posiciones con Abajo	0	0	11	4	22	1	3	0	4	45
Posiciones con Dentro (Garganta)	0	0	11	6	36	1	3	0	1	58
Posiciones con Fuera (Codo)	0	0	8	3	21	1	2	0	1	36
Posiciones con Posición 1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Posiciones con Posición 2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Posiciones con Posición 3	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Posiciones con Posición 4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Respecto a las posiciones que son claramente correspondientes a los codos, la posición garganta tiene más elementos con una velocidad de desgaste, lo que da pauta a que posiblemente contenga un mayor desgaste en valor y no solo en cantidad de elementos.

En este circuito se tienen temperaturas moderadas y sumamente parecidas, por lo que será interesante observar cómo cambia el valor del Dprom para estas temperaturas y presiones. Prueba de esto se ve en la tabla 4.20, donde se observa que para la temperatura de 41 °C, hay 3 unidades de control, siendo la 1509 con el mayor Dprom en el circuito, además se parecía que su presión es menor de la mitad que con la que opera la unidad 1502, así que en este caso conviene aumentar la presión, para que la tubería tenga una vida útil mayor. Respecto a la temperatura menor, que es de 38°, esta unidad de control trabaja con una presión intermedia respecto al valor mínimo y máximo en el

circuito, y se encontró que contiene el menor Dprom. En relación a las 2 mayores temperaturas que son de 42°C Y 43°C, es interesante comparar las unidades con estas condiciones, ya que solamente contiene 1 °C de diferencia, por lo que se podría considerar similares, pero en la presión existe una diferencia de 18.4 Kg/cm². Esta diferencia es notable en los valores de Dprom y dan rastros de la conducta para este fluido y que posiblemente concuerden con la apreciada para las temperaturas de 41 °C donde al aumentar la presión disminuye el Dprom. Para este caso se aprecia el mismo fenómeno, aunque la diferencia de Dprom no resulto ser significativa como el caso anterior, ya que la unidad 1504, la cual opera a 43°C de temperatura y 19.8 Kg/cm² de presión, contiene solamente 34 elementos con posición de desgaste y es posible que este factor influya en el valor, pero no en la tendencia encontrada que sería enunciada de la siguiente manera.

Dentro del circuito nafta, es evidente que al reducir la presión de operación, afecta al desgaste de las líneas de proceso, disminuyendo la vida útil de estas, por lo que resultaría conveniente transportar este fluido con presiones iguales o mayores a 10 Kg/cm², ya sea para para la recirculación o el sistema de pumparound de nafta pesada.

Tabla 4.20 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 15. NAFTA.

UC FINAL	UC-FCCI-1501	UC-FCCI-1502	UC-FCCI-1503	UC-FCCI-1504	UC-FCCI-1508	UC-FCCI-1509
Forrado	No	No	No	No	No	No
CLASE	1P3	3P3	1P3	1P3	1P3	1P3
Material	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B
Niveles de Tuberías	37	23	68	46	77	56
Temperatura de operación (°C)	42	41	41	43	38	41
Presión de operación (Kg/cm ²)	1.4	20.7	16.8	19.8	10.0	8.4
Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	2.725	2.644	2.486	2.513	2.074	3.765
Máximo velocidad de desgaste	10.37	11.19	10.78	11.45	11.39	20.18

UC FINAL	UC-FCCI-1501	UC-FCCI-1502	UC-FCCI-1503	UC-FCCI-1504	UC-FCCI-1508	UC-FCCI-1509
Mediana	1.83	2.24	1.63	1.53	1.15	2.24
Desviación típica poblacional σ	2.598	2.018	2.333	2.717	2.135	3.824
Moda	0.81	1.63	0.4	0.57	0.77	0.84
\emptyset con el promedio de desgaste mayor	12	6	6	8	6	6
Promedio [mpa]	4.226	2.644	3.421	2.607	2.346	3.981
\emptyset con el promedio de desgaste menor	6	-	3	6	2	4
Promedio [mpa]	0.915	-	1.100	2.462	0.480	0.920
Tipo de nivel con el máximo valor de velocidad de desgaste	TeXSOP 10. T vertical con salida al Norte	TeNSXP 11. T vertical con salida al Oriente	CoNSDF 5. Codo en el plano perpendicular al eje Norte-Sur	CoNSDF 5. Codo en el plano perpendicular al eje Norte-Sur	CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente	ReNSOP 7. Reducción vertical
Posición con el máximo valor de velocidad de desgaste	Sur	Poniente	Dentro (Garganta)	Dentro (Garganta)	Dentro (Garganta)	Oriente
\emptyset con máximo valor de velocidad de desgaste	12	6	6	6	6	6
Elementos con velocidad de desgaste crítica > 15 mpa	0	0	0	0	0	1
Promedio de velocidad de desgaste crítica	0	0	0	0	0	20.18
Promedio de velocidad de desgaste del circuito	2.720					

En esta tabla también nos da señal de que el diámetro de 6", a lo largo del circuito contiene los valores con mayor y menor promedio de desgaste y que la posición dentro (garganta) contiene el valor máximo de desgaste en 3 unidades de control, por lo que podría ser tomando en cuenta después, como un factor común del desgaste en general.

Por último se observa que salvo de un elemento con velocidad de desgaste crítica, no hay más elementos críticos, por lo que estas condiciones de operación y fluido, en combinación, resultan ser aún más dóciles con el material.

A pesar de que el circuito solo presento un elemento con desgaste crítico, se procede a seleccionar el intervalo que modele al circuito con valores homogéneos en cada unidad de control que lo conforma.

El intervalo seleccionado para las 6 unidades de control resulto ser el mismo, como se muestra en la tabla 4.21. También se observa que la unidad 1509 es la que aporta solo el 70% elementos del total de su población, siendo esta misma unidad la que contiene el único valor crítico y también la que posee el Dprom mayor tomando en cuenta todos sus elementos, por lo que confirma que a estas condiciones, hay un mayor deterioro en la línea de proceso, ya que se sabe que el 30% de los elementos de esta unidad con un valor de velocidad de desgaste exceden las 5 mpa.

Tabla 4.21 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 15. NAFTA.

Unidad de control	Intervalos	Porcentaje de la cantidad de elementos respecto al total	Suma velocidad de desgaste [mpa]	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Moda	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Desviación típica muestrals	Prom/2 - s
UC-FCCI-1501	(0.01,4.99)	84%	121.17	0.2	4.88	1.42	0.81	1.756	0.839	0.039
UC-FCCI-1502	(0.01,4.99)	89%	103.92	0.2	4.88	1.83	1.63	2.121	1.055	0.005
UC-FCCI-1503	(0.01,4.99)	88%	226.45	0.2	4.88	1.42	0.4	1.783	0.851	0.041
UC-FCCI-1504	(0.01,4.99)	82%	39.45	0.19	3.43	1.14	0.57	1.409	0.601	0.103
UC-FCCI-1508	(0.01,4.99)	89%	120.1	0.19	4.99	1.02	0.77	1.483	0.729	0.012
UC-FCCI-1509	(0.01,4.99)	70%	110.89	0.28	4.77	1.4	0.84	1.607	0.746	0.058

Con este paso, la unidad 1509 deja de tener el Dprom con mayor valor, esta peculiaridad le corresponde a la unidad 1502, la cual trabaja con la presión máxima encontrada en el circuito, además de que con estos valores ya no se cumple la tendencia enunciada para los Dprom que contemplan a toda la población.

4.3.1.1 Ordenamiento de las UC, en función de T y P

Reiteradamente, se ordenan las unidades de control en relación a sus condiciones de operación. Si se dirige la atención hacia la segunda fila de la tabla 4.22, se sabe que existe al menos una intersección en este circuito, ya la unidad de control ocupa la misma posición para ambos ordenamientos.

Por lo que un punto óptimo se encuentra a 41°C con 8.4 Kg/cm² de presión. Y de antemano, se sabe que estas condiciones de operación corresponden a la parte del reflujo de nafta a la fraccionadora, de acuerdo con la descripción del censo.

Tabla 4.22 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 15. NAFTA.

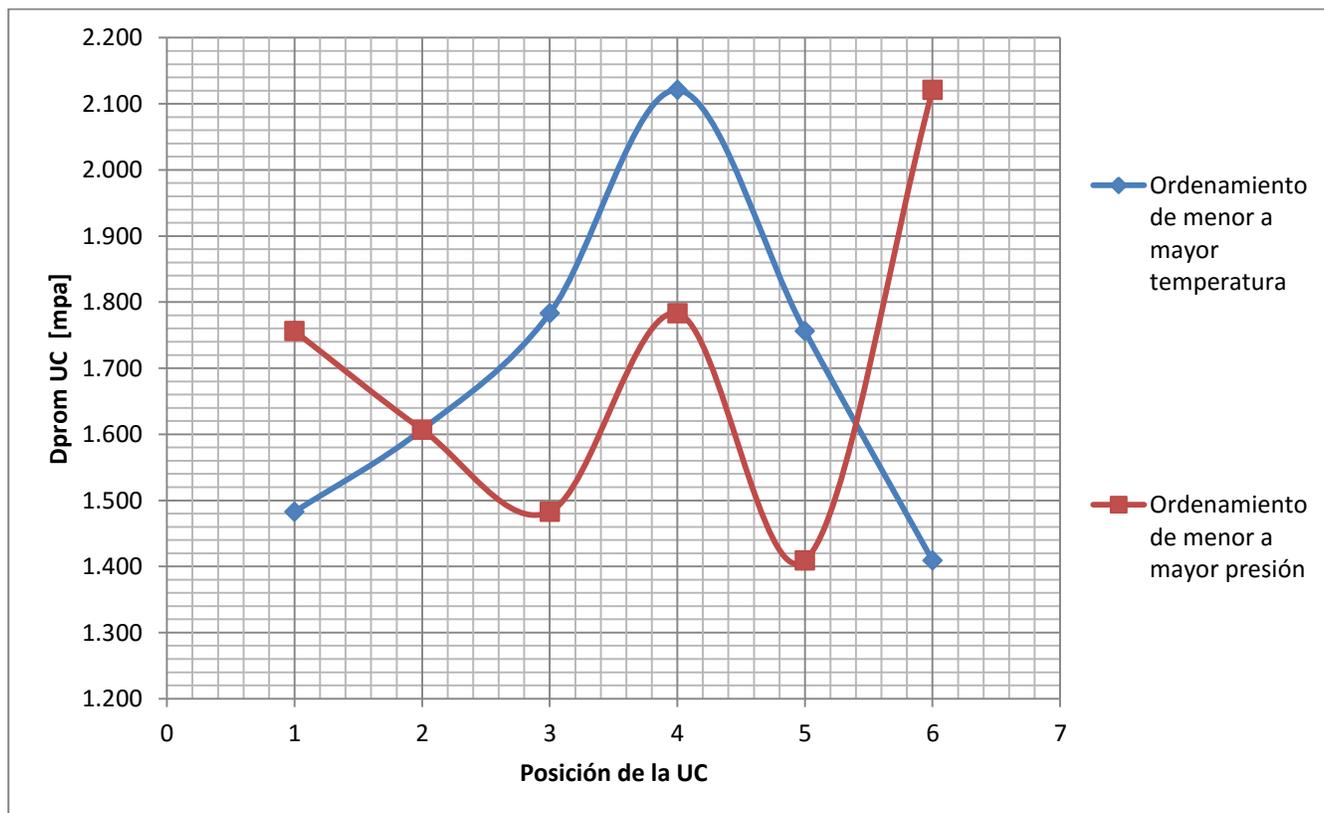
Posición de la unidad de control, acorde al ordenamiento	Ordenamiento de menor a mayor temperatura de operación				Ordenamiento de menor a mayor presión de operación			
	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] T	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] P
1	38	10.0	UC-FCCI-1508	1.483	42	1.4	UC-FCCI-1501	1.756
2	41	8.4	UC-FCCI-1509	1.607	41	8.4	UC-FCCI-1509	1.607
3	41	16.8	UC-FCCI-1503	1.783	38	10.0	UC-FCCI-1508	1.483
4	41	20.7	UC-FCCI-1502	2.121	41	16.8	UC-FCCI-1503	1.783
5	42	1.4	UC-FCCI-1501	1.756	43	19.8	UC-FCCI-1504	1.409
6	43	19.8	UC-FCCI-1504	1.409	41	20.7	UC-FCCI-1502	2.121

4.3.2 Obtención de las condiciones de operación óptima.

Ya ordenadas las unidades de control según las especificaciones, se procede a obtener el gráfico 4.13, donde se observa el comportamiento de los Dprom. Para el ordenamiento relacionado con la temperatura, hay un comportamiento parecido al que genera una distribución normal, presentando un solo máximo. En el caso contrario, para la presión, existen 2 puntos de inflexión, lo que da origen a una pequeña similitud con la representación de las funciones trigonométricas del seno y coseno.

Asimismo, se perciben 2 intersecciones, la primera ya señalada desde la tabla anterior y la segunda localizada entre la posición 5 y 6.

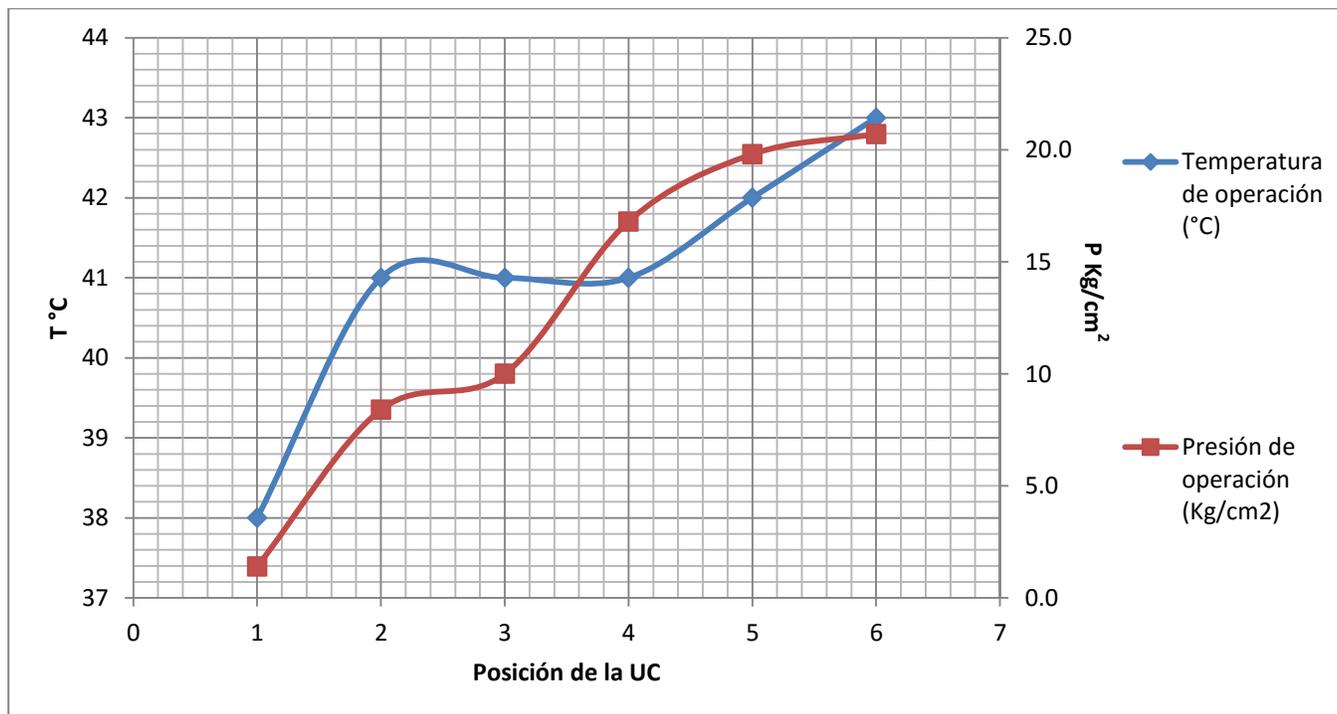
A simple vista, se aprecia que los valores de Dprom para ambas intersecciones resultan similares, pero obviamente con condiciones de operación diferentes, por lo que es necesario encontrar estos datos a través del procedimiento mostrado en el circuito de mezcla de gasóleos.



Gráfica 4.13 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 15. NAFTA.

El valor de Dprom encontrado para la segunda intersección es de 1.619 mpa, siendo mayor por 0.012 mpa únicamente respecto al valor de la primera intersección. Posteriormente, con ambos valores se deriva la obtención de sus condiciones de operación que reiterando, para el primer punto ya se tiene la información requerida.

En relación a la gráfica 4.14, de donde se obtendrán dichas condiciones, también nos muestra los diferentes comportamientos para cada una de las variables, para la temperatura existe un intervalo de 3 puntos donde existe la misma temperatura, pero mediante la representación de la línea de tendencia, se observa que después del primer punto con 41 °C podría existir un aumento insignificante y posteriormente, después del segundo punto con esta temperatura, hay una disminución de diferente magnitud al aumento previo, y posteriormente, después del tercer punto, continua el incremento de esta variable con una tendencia lineal. Para la línea de tendencia en función de la presión, se percibe claramente el aumento de esta variable sin llegar a tener una tendencia lineal, ya que los incrementos son desproporcionados.



Gráfica 4.14 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 15. NAFTA.

Habiendo comentando algunas peculiaridades de este gráfico, se procede a mostrar los valores correspondientes para la segunda intersección, que de antemano se saben que son mayores.

La temperatura de 42.414 °C y con una presión de 20.329 Kg/cm², corresponden al Dprom de 1.619 mpa, encontrado en la posición 5.391, donde se observa esta segunda intersección.

4.3.3 Condiciones de Operación.

Los anteriores valores son plasmados en la tabla 4.23. El primer punto óptimo encontrado disminuiría el tamaño de la unidad 1501 y disminuiría el desgaste generado, habiendo que instalar otra bomba entre las dos primeras unidades de control, por lo que se tendría que aumentar la presión, teniendo un valor a la salida de esta bomba de 8.4 Kg/cm², sin tener que modificar la temperatura que se viene operando, ni las condiciones de operación de la unidad 1502.

El segundo punto encontrado se aplicaría para líneas de proceso que se encuentren entre el sistema de pumparound de nafta pesada y el sistema de reflujo del domo de la fraccionadora principal, siendo la unidad 1509, la que contempla esta sección, ya que esta unidad proviene de la bomba 29-J/JA y regresa a la fraccionadora principal 1-E. Es importante recordar que esta bomba es alimentada del flujo del acumulador 3-F, el cual contiene tres fases: una fase gas, una de hidrocarburos líquidos y otra de agua amarga, y además, el flujo del acumulador, proviene del domo de la fraccionadora principal.

Con esta implementación, se presagia la recuperación de calor en el primer sistema, aumentando al tener un mayor flujo derivado del incremento de la presión, además de reducir aún más los requerimientos de enfriamiento del sistema de reflujo del domo de la fraccionadora, ya que los vapores del domo de la fraccionadora deben fluir a 2 condensadores más en el proceso original, después del sistema de reflujo del domo. Asimismo, con estas condiciones de operación se reduciría la energía empleada para enfriar, y el Dprom mantendría prácticamente casi el mismo valor, permitiendo conservar el mismo valor del factor de servicio, además de que el calor que se expulsaba a la

atmosfera, se reduciría, haciendo que la energía emitida contribuya en menor proporción a la absorbida por los gases de efecto invernadero.

Tabla 4.23 Condición de Operación encontrada en el CIRCUITO 15. NAFTA.

Puntos	T °C	P Kg/cm ²	Dprom [mpa]
1	41.000	8.400	1.607
2	42.414	20.329	1.619

4.4 CIRCUITO 31. PROPILENO, Servicio: Propileno

Mediante el gas LP C₃, se produce el propileno, el cual sale como producto después de haber pasado splitter de C₃ y posteriormente por el fraccionador de propileno, donde éste sale con el 99% de pureza del sexto plato.

4.4.1 Resumen de propiedades.

El circuito de propileno cuenta con 10 diámetros en su haber, mostrando una gran diversidad de tamaños, en las líneas de proceso. Además, se observa en la tabla 4.24, que todos estos diámetros aportan elementos con velocidad de desgaste, siendo el diámetro de 3", aquel que aporta más de estos elementos, con 200. En relación al Dprom de los diámetros, el mayor y menor valor de éste, lo tienen los diámetros de 1.5" y 2" respectivamente, ambos con pocos elementos con una d.

También se observa que los diámetros con mayor uso son 8", 2" y 3", éste último con más posiciones totales con posible valor de d. En contraparte, aquellos que son menos requeridos son 0.75" y 4".

De los 443 elementos con una velocidad de desgaste, estos se distribuyen en su mayoría en las posiciones norte (72), sur (71), oriente (72), y el diámetro de 3" aporta poco menos de la mitad de los totales de estas posiciones. Referente a las posiciones que claramente corresponden a los codos, aconteció un resultado sorprendente, ya que a diferencia de los 3 circuitos anteriores donde la garganta contenía un mayor número de elementos con una d, aquí la parte externa (fuera) o el codo, contiene una mayor cantidad de éstos.

Hablando de las sumas de d para las posiciones, la posición norte suma 188.68 mpa, que comparado con el valor de la posición oriente, la cual tiene los mismos 72 elementos con d, resulta ser mayor que ésta, con una diferencia de 33.02 mpa.

Respecto a los codos, efectivamente la suma de d, para la posición fuera, fue mayor por casi del doble del valor de la posición garganta, con un valor de 106.6 mpa respecto a los 53.06 mpa de la posición garganta.

Para los tipos de nivel, el que presento mayor desgaste fue: TuNSAB 2. Tubería horizontal paralela al eje Oriente-Poniente, con 288.02 mpa y también, éste fue el nivel más utilizado, por lo que nos da una idea de la orientación de las líneas del proceso de este circuito.

Tabla 4.24 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 31. PROPILENO.

Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 31. PROPILENO											
Diámetros del circuito en "	0.75	1	1.5	2	3	4	6	8	14	16	
Cédula	80	80	80	80	40	40	40	40	20	20	
Espesor nominal (mils)	154	179	200	218	216	237	280	322	312	312	
Límite de retiro (mils)	90	90	100	100	100	120	150	180	190	190	TOTAL
Total de posiciones	52	72	48	224	296	16	76	220	60	80	1144
Posiciones con obstrucción	0	1	2	3	7	0	2	1	1	1	18
Posiciones con -	48	7	21	195	29	4	18	42	18	31	413
Posiciones con valor de 0	1	14	6	14	60	8	19	108	18	22	270
Posiciones con velocidad de desgaste	3	50	19	12	200	4	37	69	23	26	443
Promedio velocidad de desgaste	1.003	3.625	6.989	0.699	2.356	0.715	1.461	2.287	3.327	2.095	2.579
Estos 443 elementos con una velocidad de desgaste, se distribuyen de la siguiente manera:											
Posiciones con Norte	1	9	3	3	35	0	5	5	5	6	72
Posiciones con Sur	1	8	5	2	37	0	9	4	0	5	71
Posiciones con Oriente	0	9	3	3	28	1	9	14	3	2	72
Posiciones con Poniente	0	7	3	4	18	2	10	16	1	1	62
Posiciones con Arriba	0	5	3	0	28	1	1	4	2	4	48
Posiciones con Abajo	1	8	2	0	22	0	1	9	7	3	53
Posiciones con Dentro (Garganta)	0	0	0	0	14	0	0	5	1	2	22
Posiciones con Fuera (Codo)	0	4	0	0	18	0	2	12	0	1	37
Posiciones con Posición 1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Posiciones con Posición 2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Posiciones con Posición 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Posiciones con Posición 4	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	3

En este circuito encontramos 4 unidades de control con el material A53 Gr.B, de las cuales, 3 trabajan con la misma temperatura de operación, y presiones sumamente

próximas, por lo que sería interesante poder encontrar una tendencia en relación al desgaste la de la tubería al modificar únicamente la presión.

En este circuito se localizaron 8 elementos críticos, y la posición con el máximo valor de desgaste en general fue poniente, repitiéndose en 3 de las 4 unidades. Esta posición, en 2 de las 3 unidades que lo contemplan, corresponde al codo en el plano perpendicular al eje oriente poniente, tal y como lo muestra la tabla 4.25, que enseña el resumen de las propiedades obtenidas para el circuito de propileno.

Tabla 4.25 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 31. PROPILENO.

UC FINAL	UC-FCCI-3101	UC-FCCI-3102	UC-FCCI-3103	UC-FCCI-3106
Forrado	NO	NO	NO	NO
CLASE	3P3	3P3	3P3	3P3
Material	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B
Niveles de Tuberías	126	21	51	88
Temperatura de operación (°C)	63	38	63	63
Presión de operación (Kg/cm2)	22.2	19.0	21.7	23.3
Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	1.751	2.837	5.308	2.618
Máximo velocidad de desgaste	7.14	9.98	22.09	22.25
Mediana	1.43	1.5	1.77	1.85
Desviación típica poblacional σ	1.563	2.784	7.588	2.835
Moda	0.2	0.8	0.18	0.23
\emptyset con el promedio de desgaste mayor	8	14	1.5	1
Promedio [mpa]	2.136	3.327	21.555	3.625
\emptyset con el promedio de desgaste menor	2	6	4	0.75
Promedio [mpa]	0.699	2.174	0.767	1.003
Tipo de nivel con el máximo valor de velocidad de desgaste	CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente	TuNSAB 2. Tubería horizontal paralela al eje Oriente-Poniente	TuNSOP 1. Tubería vertical	CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente
Posición con el máximo valor de velocidad de desgaste	Poniente	Abajo	Poniente	Poniente

UC FINAL	UC-FCCI-3101	UC-FCCI-3102	UC-FCCI-3103	UC-FCCI-3106
∅ con máximo valor de velocidad de desgaste	8	14	1.5	1
Elementos con velocidad de desgaste crítica > 15 mpa	0	0	4	4
Promedio de velocidad de desgaste crítica	0	0	21.555	19.18
Promedio de velocidad de desgaste del circuito	2.579			

También se observa que el mayor Dprom se lo adjudica la unidad 3103, la cual opera con la menor presión de las 3 unidades que tienen la misma temperatura y, el menor Dprom del circuito lo tiene la unidad 3101, que pertenece a estas unidades con la misma temperatura, pero con una presión intermedia. La diferencia entre estos dos valores de Dprom es de 3.557 mpa a pesar de que la caída de presión sea de 0.5 Kg/cm². Para la unidad que trabaja con ambas variables diferentes, tiene el segundo valor más alto de Dprom, a pesar de operar con condiciones más bajas. Entonces, también podríamos hablar de una influencia mayor al disminuir la presión, en el aumento del desgaste de la pared del material. Faltaría observar si este comportamiento sigue la tendencia al contar con valores de d más homogéneos, como los que se presentan en la tabla 4.26, donde se excluyen los valores mayores a 5mpa para las 4 unidades de control, y se emplea esta información para encontrar los puntos de operación óptima como en los anteriores y próximos circuitos.

Tabla 4.26 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 31. PROPILENO.

Unidad de control	Intervalos	Porcentaje de la cantidad de elementos respecto al total	Suma velocidad de desgaste [mpa]	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Moda	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Desviación típica muestrals	Prom/2 - s
UC-FCCI-3101	(0.01,4.99)	96%	168.76	0.08	4.90	1.43	0.20	1.548	0.761	0.013
UC-FCCI-3102	(0.01,4.99)	75%	42.57	0.2	4.79	1.1	0.8	1.419	0.577	0.132
UC-FCCI-3103	(0.01,4.99)	67%	18.22	0.18	3.36	0.71	0.18	1.012	0.448	0.058
UC-FCCI-3106	(0.01,4.99)	90%	456.52	0.23	4.87	1.62	0.23	1.943	0.899	0.072

Con estos nuevos Dprom, cambia radicalmente el comportamiento, ya que la unidad que tenía el mayor desgaste promedio, ahora contiene el Dprom de menor valor, pero se aprecia que es la unidad que tiene menor cantidad de elementos representativos para el intervalo seleccionado, ya que el 33% de los elementos con un valor de desgaste, tienen un valor a los 5 mpa.

Con estos valores, la unidad de control que sufre un mayor desgaste, es la que opera con las condiciones más altas del circuito, seguida por aquella que trabaja a la misma temperatura pero con la presión intermedia, que en el caso anterior, esta unidad de control contenía el Dprom más bajo. Y respecto al Dprom con el menor valor, lo posee la unidad que también opera con la temperatura de 63°C, pero con la menor presión entre estas 3 unidades. Por lo que se podría decir que contrario a la observación para la tabla anterior, al disminuir la presión, en este caso disminuye el Dprom.

4.4.1.1 Ordenamiento de las UC, en función de T y P.

Con los Dprom de la tabla anterior, se ordenan las unidades de control conforme a lo establecido al procedimiento y se presenta el nuevo orden en la tabla 4.27, que enseña la misma ubicación para las unidades de control, por lo que se concluye que el comportamiento del promedio de la velocidad de desgaste de las unidades de control, es independiente del ordenamiento para ambas variables.

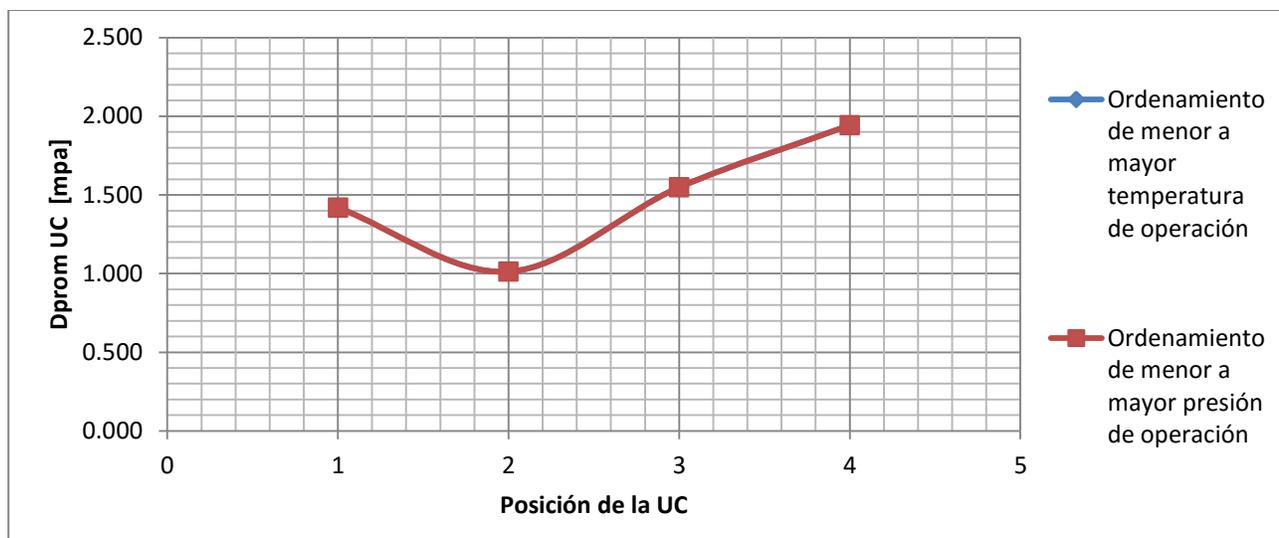
Tabla 4.27 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 31. PROPILENO.

Posición de la unidad de control, acorde al ordenamiento	Ordenamiento de menor a mayor temperatura de operación				Ordenamiento de menor a mayor presión de operación			
	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] T	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] P
1	38	19.0	UC-FCCI-3102	1.419	38	19.0	UC-FCCI-3102	1.419
2	63	21.7	UC-FCCI-3103	1.012	63	21.7	UC-FCCI-3103	1.012
3	63	22.2	UC-FCCI-3101	1.548	63	22.2	UC-FCCI-3101	1.548
4	63	23.3	UC-FCCI-3106	1.943	63	23.3	UC-FCCI-3106	1.943

4.4.2 Obtención de las condiciones de operación óptima.

Lo anteriormente señalado, se observa en la gráfica 4.15, donde también, se ve claramente la conducta que toma el desgaste del circuito al ir aumentando la temperatura y presión. Si se omite el primer punto, se observaría un comportamiento lineal, donde conforme aumenta la presión de operación, disminuye el espesor de la línea de proceso.

Ya que este circuito no contiene elementos para establecer una mejora, se concluye que tal y como opera, es lo mejor para en proceso en función del desgaste de pared. Por último, una hipótesis al porqué de este caso, sería por la cercanía de las presiones de las unidades de control con temperaturas similares, que al tener un rango pequeño, no permite que la influencia de la presión se haga presente y se pueda optar por otras condiciones de operación, como en los circuitos anteriores.



Gráfica 4.15 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 31. PROPILENO.

4.5 CIRCUITO 35. LPG LAVADO, Servicio: LPG lavado

El flujo de propano-butano LPG, que proviene de la debutanizadora, es pasado por la sección de tratamiento con amina. En esta sección se les elimina el gas ácido (H_2S y CO_2) a las corrientes de gas residual que viene del absorbedor secundario 4-E y de propano-butano LPG, proveniente del sistema del domo de la debutanizadora 5-E, utilizando una solución acuosa de dietanolamina (DEA) al 20 % en peso. Para esto, se tiene un contactor gas residual-amina (9-E) para el gas residual y un contactor LPG liquido-amina (7-E) para la corriente de propano butano.

La corriente de propano-butano, que sale por la parte superior del separador de amina-gas LP, contiene una gran cantidad de mercaptanos, es por eso que esta corriente llega al domo del contactor LPG/Cáustico de película de fibra, donde se pone en contacto con una corriente de sosa caustica, la cual es recirculada y tiene una relación en esta etapa de 7:1 en contra del hidrocarburo. La corriente de sosa, rica en sales de mercaptanos de sodio, se envía al sistema de regeneración de caustico y el gas LP parcialmente tratado, fluye a la segunda etapa para la extracción de mercaptanos permanentes. Las reacciones y relaciones entre las fases de hidrocarburos y la solución acuosa de cáustico, son prácticamente iguales a las de la primera etapa. El gas LP sale por la parte superior del separador hacia el sistema de lavado con agua, mientras la corriente de cáustico, sale del separador hacia la primera etapa.

El gas LP fluye a la entrada del último contactor de película de fibra, en donde se pone en contacto con agua recirculada. El gas LP asciende a través del empaque de fibras del contactor, donde el gas LP se lava y se le elimina cualquier arrastre de sosa y es enviado al tanque de balance de carga de la depropanizadora en la sección de recuperación de vapores de hidrocarburo (VRU). Esta sección además, recibe gas húmedo y gasolinas para cumplir los siguientes objetivos:

- Enviar C₂ y componentes más ligeros al sistema de gas combustible.
- Recuperar LPG C₄, Propano y Propileno en grado químico como productos líquidos separados.
- Producir Gasolina en el rango de ebullición y volatilidad especificadas.

4.5.1 Resumen de propiedades.

Se encontraron que existen 142 elementos con una velocidad de desgaste de los 292 posibles, y de estos 142 se distribuyen casi en igual número para los diámetros de 4" y 6" como se aprecia en la tabla 4.28, donde además, se observa que el Dprom del circuito difiere del Dprom del diámetro de 1", a pesar de que este contiene el mayor promedio, pero únicamente contiene 4 elementos, por lo que su contribución al promedio del circuito es insignificante.

De los 142 elementos, se distribuyen en mayor proporción en las posiciones norte-sur. Estos elementos de norte (26) y sur (27), aportan un mayor valor para el tipo de nivel TuNSOP 1. Tubería vertical, con 49.94 mpa y 40.39 mpa respectivamente. Éste nivel contiene el mayor valor de la suma de d, con 171.32 mpa, de los 544.63 mpa del circuito.

Para los codos, el nivel 5(CoNSDF 5. Codo en el plano perpendicular al eje Norte-Sur) y 6 (CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente), contienen casi la misma cantidad de elementos con d, el nivel 5 con 22 y el 6 con 20, y a pesar de esto, este último nivel supera en número de suma de d al nivel 5, por 10.54 mpa. Nuevamente la posición garganta tiene mayor cantidad de elementos que la posición fuera y, también su suma de d, es mayor.

En las reducciones, solo la "ReOPAB 9. Reducción horizontal paralela a la eje Norte-Sur", aporta numéricamente a la suma de d del circuito y por último, para las Tees, la "TeNSOX

12. T vertical con salida al Poniente” contiene 3 elementos, y su valor de d es 15.50 mpa, valor 3 veces mayor a la de la tee que contiene 2 elementos.

Tabla 4.28 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.

Diámetros en función de las características de las posiciones del circuito 35. GAS LP LAVADO.					
Diámetros del circuito en "	1	3	4	6	
Cédula	80	40	40	40	
Espesor nominal (mils)	179	216	237	280	
Límite de retiro (mils)	90	100	120	150	TOTAL
Total de posiciones	16	52	108	116	292
Posiciones con obstrucción	1	0	4	3	8
Posiciones con -	10	13	20	29	72
Posiciones con valor de 0	1	12	25	32	70
Posiciones con velocidad de desgaste	4	27	59	52	142
Promedio velocidad de desgaste	7.393	4.080	4.317	2.889	3.835
Estos 142 elementos con una velocidad de desgaste, se distribuyen de la siguiente manera:					
Posiciones con Norte	2	4	11	9	26
Posiciones con Sur	2	3	13	9	27
Posiciones con Oriente	0	3	9	8	20
Posiciones con Poniente	0	5	8	8	21
Posiciones con Arriba	0	4	5	3	12
Posiciones con Abajo	0	4	4	2	10
Posiciones con Dentro (Garganta)	0	2	5	9	16
Posiciones con Fuera (Codo)	0	2	4	4	10
Posiciones con Posición 1	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 2	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 3	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 4	0	0	0	0	0

Y nuevamente se vuelve a clasificar la información, para los 3 unidades de control, donde observa que contienen parecidos niveles de tuberías, como ya se había observado en el capítulo 3, además, también se encontró hay 2 tipos de combinaciones para las condiciones de operación en las 3 unidades de control. En la tabla 4.29, se observa que las unidades 3501 y 3502 operan a la misma temperatura, mientras que las unidades 3502 y 3504 trabajan a la misma presión.

Para el caso de la misma temperatura de operación, la cual es una temperatura de valor medio, se observó que el Dprom poblacional aumenta cuando la presión es mayor, y para el caso de la misma presión, la cual corresponde a 20.7 Kg/cm², el valor del Dprom aumenta si se reduce la temperatura, teniendo este comportamiento al margen, se obtiene un menor desgaste del espesor a las condiciones de la unidad 3501.

Tabla 4.29 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.

UC FINAL	UC-FCCI-3501	UC-FCCI-3502	UC-FCCI-3504
Forrado	NO	NO	NO
CLASE	1P3	1P3	3P3
Material	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B
Niveles de Tuberías	23	24	26
Temperatura de operación (°C)	43	43	38
Presión de operación (Kg/cm2)	13.4	20.7	20.7
Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	2.781	3.577	4.679
Máximo velocidad de desgaste	18.58	7.65	13.87
Mediana	1.92	3.51	4.32
Desviación típica poblacional σ	3.155	1.888	3.050
Moda	0.81	3.51	4.32
\emptyset con el promedio de desgaste mayor	6	6	1
Promedio [mpa]	2.781	4.185	7.393
\emptyset con el promedio de desgaste menor	-	3	4
Promedio [mpa]	-	3.251	4.369
Tipo de nivel con el máximo valor de velocidad de desgaste	CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente	TuNSAB 2. Tubería horizontal paralela al eje Oriente-Poniente	CoABDF 4. Codo en el plano perpendicular al eje Arriba-Abajo
Posición con el máximo valor de velocidad de desgaste	Fuera (Codo)	Abajo	Dentro (Garganta)
\emptyset con máximo valor de velocidad de desgaste	6	3	4
Elementos con velocidad de desgaste crítica > 15 mpa	1	0	0
Promedio de velocidad de desgaste crítica	18.58	0	0
Promedio de velocidad de desgaste del circuito	3.835		

El intervalo de temperaturas es idéntico al CIRCUITO 15 y el intervalo de presiones es más estrecho, pero con el mismo valor máximo, predomina el diámetro de 6" con el

promedio de mayor velocidad de desgaste, el codo nuevamente tiene la posición con el máximo valor de desgaste aunque en diferentes posiciones, y el tipo de nivel con el valor más alto de velocidad de desgaste, es diferente para las 3 unidades de control que conforman este circuito.

En este caso solo hay un elemento crítico para la máxima temperatura y una presión intermedia, con lo que se va observando la tendencia de temperaturas moderadas, a no tener tantos elementos críticos, como en el circuito 15.

Ya con la selección de los intervalos de mpa, que representen mejor a la población, se observa en la tabla 4.30, que a la unidad que le afecto más este procedimiento fue a la 3504, la cual contenía el mayor Dprom, ya que solamente se quedó con el 59%, con 40 elementos de los 68 que contenían un valor de velocidad de desgaste en la unidad de control.

Tabla 4.30 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.

Unidad de control	Intervalos	Porcentaje de la cantidad de elementos respecto al total	Suma velocidad de desgaste [mpa]	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Moda	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Desviación típica muestrals	Prom/2 - s
UC-FCCI-3501	(0.01,4.99)	81%	64.21	0.2	4.64	1.41	0.81	1.646	0.678	0.145
UC-FCCI-3502	(0.01,4.99)	81%	61.38	0.21	4.96	3.1	3.51	2.923	1.398	0.064
UC-FCCI-3504	(0.01,4.99)	59%	107.56	0.23	4.78	2.96	4.32	2.689	1.341	0.004

Además, se ve que la unidad con 3501 y 3502 tienen el mismo porcentaje, y la suma de velocidad de la primera es mayor, no obstante, la 3502 contiene el mayor Dprom, debido a que su 81% contiene menos elementos. Y por el contrario de la unidad 3504, contiene más elementos, haciendo que su suma no sea factor para que tenga el Dprom mayor del circuito.

4.5.1.1 Ordenamiento de las UC, en función de T y P

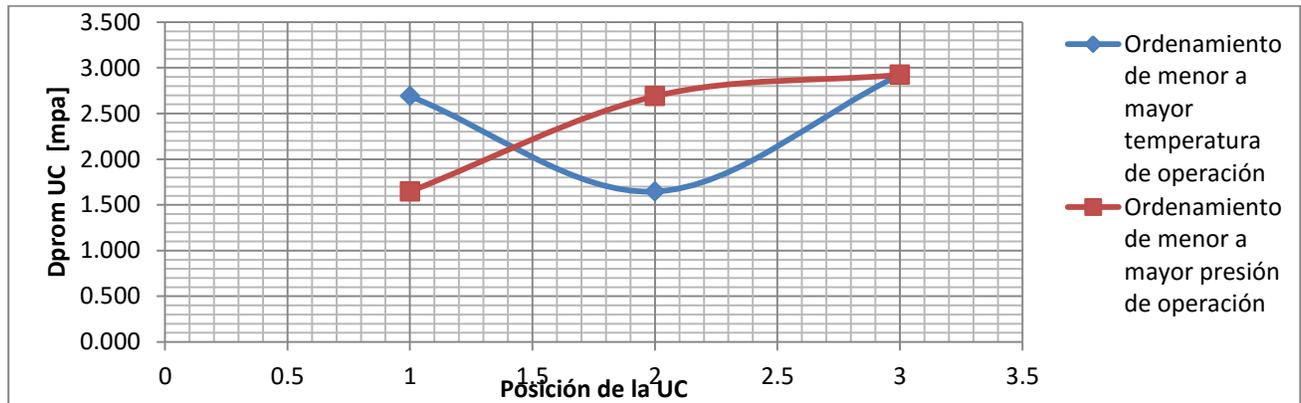
Con el ordenamiento presentado en la tabla 4.31, se observa claramente un punto de intersección, donde la unidad 3502 coincide en la misma posición. Y visualizando los otros valores con las posiciones, se prevé una intersección más, entre las posición 1 y 2.

Tabla 4.31 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.

Posición de la unidad de control, acorde al ordenamiento	Ordenamiento de menor a mayor temperatura de operación				Ordenamiento de menor a mayor presión de operación			
	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] T	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm ²)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] P
1	38	20.7	UC-FCCI-3504	2.689	43	13.4	UC-FCCI-3501	1.646
2	43	13.4	UC-FCCI-3501	1.646	38	20.7	UC-FCCI-3504	2.689
3	43	20.7	UC-FCCI-3502	2.923	43	20.7	UC-FCCI-3502	2.923

4.5.2 Obtención de las condiciones de operación óptima.

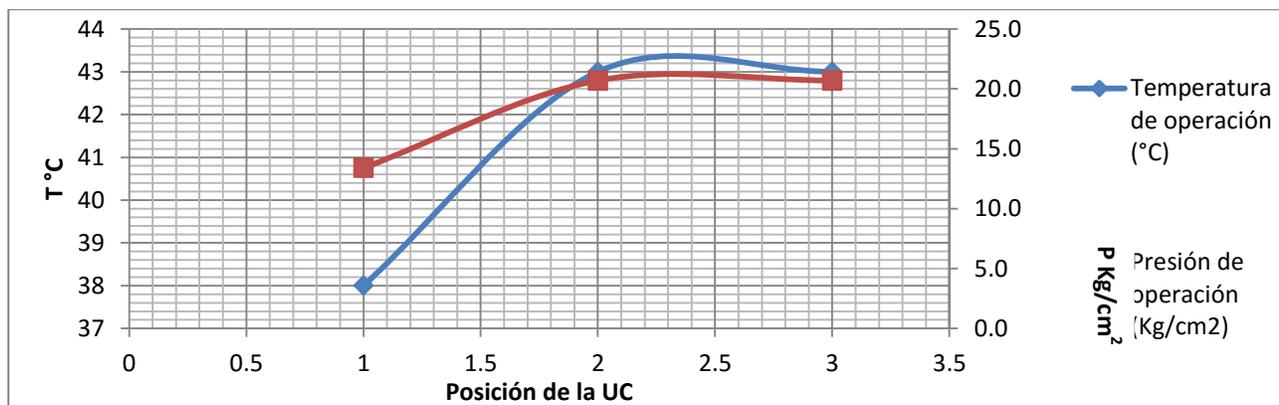
Lo señalado anteriormente, es mostrado en la gráfica 4.16, donde se observan las 2 intersecciones, con valores sumamente diferentes de Dprom y, también de T y P, ya que como se había comentado, mientras más a la derecha este la intersección, estas 2 ultimas variables aumentan en valor.



Gráfica 4.16 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.

Efectivamente, para la segunda intersección, el desgaste promedio es de 2.923 mpa, y las condiciones de operación de 43 °C y 20.kg/cm². Pero para la primera intersección se tuvo una diferencia de 0.167 para el valor de su posición que se calcula por el procedimiento del circuito 1, y esas posiciones obtuvieron una diferencia de 0.084 mpa en el Dprom,

donde el valor mayor entre estos valores fue para la posición calculada por la ecuación de primer grado, como en la mayoría de los circuitos.



Gráfica 4.17 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.

La temperatura observada para la posición 1.417, donde existe la primera intercesión, es de 40.3 °C, la cual difiere muy poco de los valores calculados en este caso, ya que la mayor y menor temperaturas calculadas fueron de 41.121 °C y 39.667 °C respectivamente. Para la presión, los valores calculados son aún más estrechos, con una diferencia de 1.162 Kg/cm², lo cual es razonablemente aceptable, debido a que el Dprom no cambiaría demasiado en caso de llevar el procedimiento al revés, conociendo esta presión.

4.5.3 Condiciones de Operación.

Mediante la descripción del proceso, en conjunto con la descripción de las unidades de control, se decidió que las condiciones del primer punto se implementarían entre el tramo de la salida del tanque de compensación de alimentación de depropanizadora 13-F, hasta la succión de las bombas 16-J/JA16, debido a que en la unidad 3502, de donde es perteneciente este tramo, se operaba con una temperatura de 43 °C y 20.7 Kg/cm², lo cual provoca un mayor desgaste y además no cumple con la función de que el fluido debe adquirir calor del intercambiador 16-C, para ser alimentado a la depropanizadora arriba del plato 17, además de que la presión ya no aumenta, a pesar de que esta debe de pasar por las bombas previamente señaladas, que corresponden a la unidad 3503.

Respecto al segundo punto, las condiciones encontradas son apropiadas para reemplazar las estipuladas por el censo en la unidad 3504, donde el flujo procede del intercambiador

16-C, y se envía a la depropanizadora, ya que con estas nuevas condiciones de operación, se justificaría el empleo del intercambiador en el proceso, aumentándole la temperatura a la corriente de entrada del intercambiador, y aprovechando la potencia generada por las bombas señalas anteriormente, para que entre a las condiciones apropiadas a la depropanizadora. Cabe aclarar que para este segundo punto, el desgaste incrementaría 0.234 mpa, pero se garantiza el correcto funcionamiento, además de que el aumento no resulta abrupto.

Con estos cambios, se le da sentido a la descripción del circuito, mediante sus unidades de control en función con sus condiciones de operación, ya que anteriormente, no era congruente la forma en que la presión del flujo fuese la misma antes y después de entrar a una bomba, o que la temperatura decreciera en vez de aumentar, teniendo en cuenta que el flujo debe ser calentado para la entrada a la depropanizadora, según la descripción del proceso en esta alimentación. Por último, también se logró disminuir el desgaste generado en el circuito, ya que anteriormente, la suma del promedio de la velocidad de desgaste de las unidades de control era de 7.258 mpa, y ahora, a pesar de que el desgaste en la unidad 3504 incremento, disminuyo 0.797 mpa para la unidad 3502, teniendo una suma de los Dprom de cada unidad de 6.695 mpa, augurando mayor seguridad, vida útil y calidad en el proceso.

Tabla 4.32 Condición de Operación encontrada en el CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.

Puntos	T °C	P Kg/cm ²	Dprom [mpa]
1	40.370	16.866	2.126
2	43.000	20.700	2.923

4.6 CIRCUITO 42. AGUA AMARGA, Servicio: Agua amarga

Como ya se mencionó, el agua amarga proviene de varios puntos de la planta, la cual está contaminada principalmente de H₂S, ésta fluye al sistema del agotador de aguas amargas, donde primero se manda al tambor de desgasificación del agotador de aguas amargas, para despojarle la mayor cantidad de gases disueltos en ella. De aquí se bombea para recibir la energía suficiente de los fondos de la torre agotadora, pasando por 2 intercambiadores y un precalentador con vapor de baja y así poder entrar en la bandeja 6

de la torre agotadora. Además, esta torre, está empacada con anillos metálicos y trabaja a contracorriente, para una mayor área de contacto, entre el agua amarga y el vapor de agotamiento. Aquí se desflema el agua utilizando vapor de baja presión que se introduce por el fondo. En el fondo de ésta torre, se mantiene una temperatura de unos 116°C y en el domo de 107°C. Por el fondo de la torre se extrae el agua desflemada. Ésta agua, todavía se hace pasar por los dos intercambiadores mencionados al principio y, cede calor al agua amarga, para después irse a límite de baterías. Mientras que el vapor de agotamiento y el gas ácido separado del agua, salen por el domo de la torre agotadora, y pasan al condensador 46-C y posteriormente al separador de agua-gas ácido 35-F, en donde el agua se drena hacia el tanque de balance de agua amarga 33-F, y el gas ácido sale a control de presión, para juntarse con el gas ácido proveniente de la sección de amina y enviarlos como carga a la planta de azufre.

4.6.1 Resumen de propiedades.

Como ya es sabido, el circuito cuenta con 200 posiciones con d, además de que ya se conoce cuantos elementos aporta cada una de las 4 unidades de control. A continuación, en la tabla 4.33, se presenta como se distribuyen estos 200 elementos en función de los diámetros existentes en el circuito y de su tipo de posición, además de ver los promedios de cada diámetro y del circuito sin excluir elementos con un desgaste de 5 mpa o mayor.

Tabla 4.33 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.

Diámetros en función de las características de las posiciones del circuito 42. AGUA AMARGA					
Diámetros del circuito en "	1	3	4	6	
Cédula	80	40	40	40	
Espesor nominal (mils)	179	216	237	280	
Límite de retiro (mils)	90	100	120	150	TOTAL
Total de posiciones	8	52	288	80	428
Posiciones con obstrucción	0	4	4	3	11
Posiciones con -	8	8	41	7	64

Posiciones con valor de 0	0	24	99	30	153
Posiciones con velocidad de desgaste	0	16	144	40	200
Promedio velocidad de desgaste	0	1.798	2.649	3.341	2.719
Estos 200 elementos con una velocidad de desgaste, se distribuyen de la siguiente manera:					
Posiciones con Norte	0	2	21	5	28
Posiciones con Sur	0	3	19	5	27
Posiciones con Oriente	0	4	23	3	30
Posiciones con Poniente	0	3	25	8	36
Posiciones con Arriba	0	2	11	7	20
Posiciones con Abajo	0	1	14	4	19
Posiciones con Dentro (Garganta)	0	0	16	4	20
Posiciones con Fuera (Codo)	0	1	15	4	20
Posiciones con Posición 1	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 2	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 3	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 4	0	0	0	0	0

Con esta información, se da a conocer que el diámetro de 4", es el de mayor empleo, además de tener un mayor número de elementos con d, no obstante, ese número no genera el mayor desgaste, ya que en el diámetro de 6", se observa un mayor deterioro. Referente a los 200 con una velocidad de desgaste, existe una mayor cantidad de éstos en las posiciones oriente y poniente, lo cual no asegura que mediante la suma de d, tengan el mayor desgaste estas posiciones, como se ha visto en los circuitos anteriores. En este circuito, la posición, poniente tiene el mayor valor de la suma de velocidades de desgaste con 94.45 mpa, contando con la mayor aportación de éste número en el tipo de nivel TuNSOP 1. Tubería vertical, con 22.87 mpa, pertenecientes a 10 elementos de los 36 con esta posición. Para la posición con menos elementos (abajo), se calculó un valor de 38.98 mpa, para la suma de sus velocidad de desgaste, con la mayor aportación al nivel TuOPAB 3. Tubería horizontal paralela al eje Norte-Sur, que tiene 18.44 mpa, con 8 elementos de los 19 para esta posición. El nivel con mayor valor en la suma de sus velocidades de desgaste de las posiciones que lo integran, pertenece al CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente, con 102.37 mpa, donde la posición dentro, aporto 42.26 mpa.

Para este circuito, en la tabla 4.34, las propiedades generales obtenidas, muestran que se trata de un circuito impredecible y diferente, ya que a pesar de las características del

fluido, no se cuentan con valores críticos en ninguna unidad de control y, el tipo de nivel con el máximo valor, no incluye en ninguna unidad de control a algún codo.

En relación a los niveles de medición que presentaban los valores máximos de velocidad de desgaste y los puntos críticos, una primera hipótesis de este fenómeno, es que se debe en primera instancia al fluido, que aunque tenga dentro de su composición ácido sulfhídrico, que es altamente corrosivo, se supone que, tal vez en estos tramos de circuito no esta tan concentrada como se esperaría para arrojar valores más significativos. Y en segunda, es que también influye de manera importante al comportamiento verdadero del circuito, el tener unidades de control con niveles de tubería menores o igual a 20 elementos totales, ya que no contiene la información significativa o suficiente como en los demás circuitos, debido a que como se vio en el capítulo 3, hay muchas celdas sin medición o con obstrucción, aparte el tamaño nos da una mayor población de datos, que aquí se observa que si está influenciando en el análisis.

Tabla 4.34 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.

UC FINAL	UC-FCCI-4216	UC-FCCI-4217	UC-FCCI-4218	UC-FCCI-4219
Forrado	NO	NO	SI	SI
CLASE	1P3	1P3	1P3	1P3
Material	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B
Niveles de Tuberías	20	63	10	14
Temperatura de operación (°C)	113	40	68	68
Presión de operación (Kg/cm ²)	1.0	0.8	3.3	2.8
Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	3.341	2.372	3.213	2.531
Máximo velocidad de desgaste	7.84	12.9	9.72	9.04
Mediana	3.225	1.57	1.53	1.71
Desviación típica poblacional σ	2.590	2.355	3.090	2.369
Moda	1.39	0.17	0.9	0.45
\emptyset con el promedio	6	4	4	4

UC FINAL	UC-FCCI-4216	UC-FCCI-4217	UC-FCCI-4218	UC-FCCI-4219
de desgaste mayor				
Promedio [mpa]	3.341	2.509	3.213	2.531
∅ con el promedio de desgaste menor	-	3	-	-
Promedio [mpa]	-	1.798	-	-
Tipo de nivel con el máximo valor de velocidad de desgaste	TuNSAB 2. Tubería horizontal paralela al eje Oriente-Poniente	TeNXOP 13. T vertical con salida al Sur	TuOPAB 3. Tubería horizontal paralela al eje Norte-Sur	TuNSOP 1. Tubería vertical
Posición con el máximo valor de velocidad de desgaste	Arriba	Oriente	Arriba	Oriente
∅ con máximo valor de velocidad de desgaste	6	4	4	4
Elementos con velocidad de desgaste crítica > 15 mpa	0	0	0	0
Promedio de velocidad de desgaste crítica	0	0	0	0
Promedio de velocidad de desgaste del circuito	2.719			

Por último, en relación a esta tabla y los Dprom, se observó que para temperaturas moderadamente altas, al aumentar la presión, aumenta el desgaste, y para presiones pequeñas, si se quiere disminuir el desgaste de pared, es necesario disminuir la temperatura de operación.

Sesgando la población, para la obtención de una muestra representativa, mostrada en la tabla 4.35, se encontró que el Dprom para la unidad 4216 es el de mayor valor, al igual que en la tabla anterior. Asimismo, la unidad 4219, ocupa el mismo lugar en relación a su valor promedio de desgaste, en este caso el tercero, de mayor a menor.

Por último, aproximadamente el 70% de elementos con d, fueron tomados en cuenta para la obtención de las condiciones de operación óptima, siendo así, el circuito con menor cantidad de elementos tomados en cuenta, con un total de 163.

Tabla 4.35 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.

Unidad de control	Intervalos	Porcentaje de la cantidad de elementos respecto al total	Suma velocidad de desgaste [mpa]	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Moda	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Desviación típica muestrals	Prom/2 - s
UC-FCCI-4216	(0.01,4.99)	70%	54.87	0.17	4.71	1.39	1.39	1.960	0.957	0.023
UC-FCCI-4217	(0.01,4.99)	88%	126.49	0.17	4.88	1.05	0.17	1.733	0.863	0.003
UC-FCCI-4218	(0.01,4.99)	70%	26.63	0.54	4.04	1.08	0.9	1.402	0.645	0.056
UC-FCCI-4219	(0.01,4.99)	86%	73.38	0.18	4.49	1.62	0.45	1.707	0.770	0.083

4.6.1.1 Ordenamiento de las UC, en función de T y P.

Nuevamente, se ordenan las unidades de control de menor a mayor, en relación de sus condiciones de operación, como se muestra en la tabla 4.36, donde la unidad 4217, que corresponde a la parte de la descarga de la bomba 39-J/JA y que se dirige al intercambiador 44-C y al límite de batería de aguas amargas, tiene las condiciones de operación más bajas y por lo tanto comparte un punto de intersección.

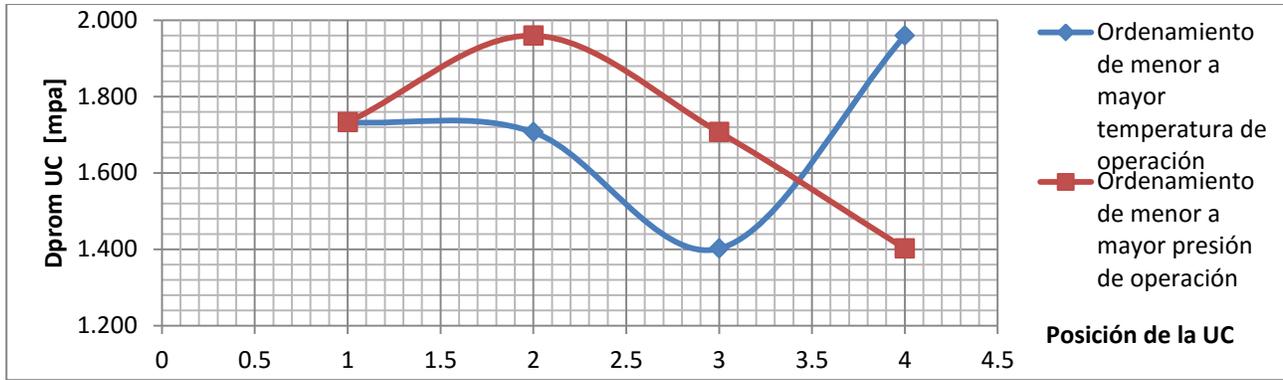
Tabla 4.36 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.

Posición de la unidad de	Ordenamiento de menor a mayor temperatura de operación	Ordenamiento de menor a mayor presión de operación

control, acorde al ordenamiento	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] T	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] P
1	40	0.8	UC- FCCI- 4217	1.733	40	0.8	UC- FCCI- 4217	1.733
2	68	2.8	UC- FCCI- 4219	1.707	113	1.0	UC- FCCI- 4216	1.960
3	68	3.3	UC- FCCI- 4218	1.402	68	2.8	UC- FCCI- 4219	1.707
4	113	1.0	UC- FCCI- 4216	1.960	68	3.3	UC- FCCI- 4218	1.402

4.6.2 Obtención de las condiciones de operación óptima.

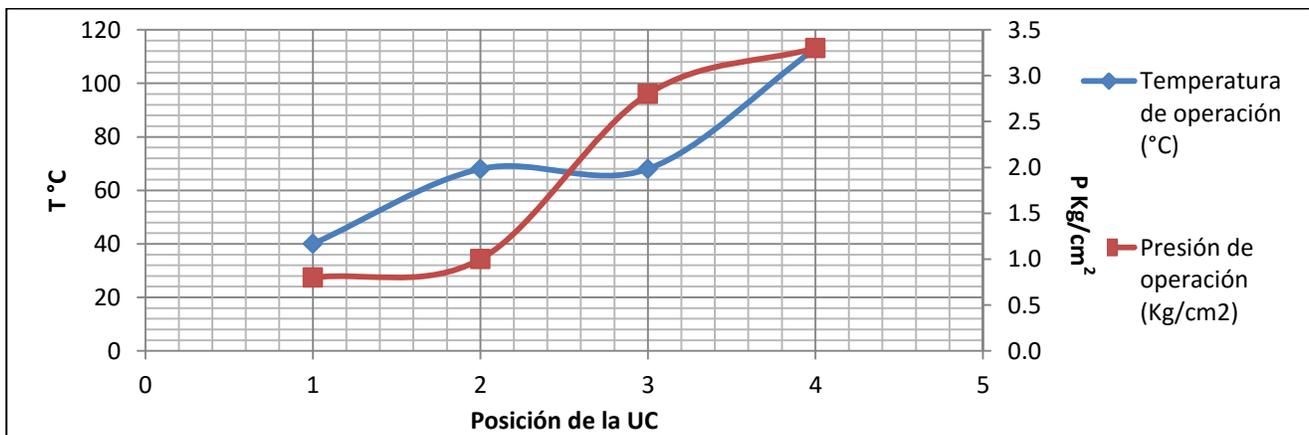
Primeramente, mediante el ordenamiento plasmado en la tabla anterior, se entrevé un comportamiento decreciente después de haber alcanzado un máximo para el ordenamiento en función de la temperatura, y ya en la gráfica 4.18, se observa una curva típica del comportamiento asimétrico positivo o a la derecha, en referencia a los tipos de distribuciones unimodales, donde la moda se encuentra en la concavidad de la curva, y posteriormente, hacia la derecha encontramos en valor de la mediana y consecutivamente, con un valor aún más pequeño, se halla el promedio. Caso contrario al comportamiento entrevisto y observado para el ordenamiento de la otra variable, ya que esta va decreciendo en los 2 primeros puntos de manera suave y para el tercer vuelve a decrecer pero de manera abrupta para posteriormente, alcanzar un máximo en la cuarta posición.



Gráfica 4.18 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.

Asimismo, en este gráfico, se observa un segundo punto de intersección, con un Dprom más bajo, pero con condiciones de operación más elevadas, ya que este punto se encuentra a la derecha del primero y como ya es sabido, mientras más a la derecha se encuentre dicha intersección, sus condiciones de operación aumentaran en valor.

Dicho lo anterior, la segunda intersección corresponde a la posición 3.4169 según su valor promedio, por lo que sus condiciones de operación calculadas por el método gráfico, por medio de la gráfica 4.19, son de 84.5 °C y 3.15 Kg/cm². Estos valores a su vez, difieren 0.282 °C y 0.053 Kg/cm² respectivamente, de lo plasmados en la tabla 4.37, donde se observan los puntos óptimos.



Gráfica 4.19 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.

4.6.3 Condiciones de Operación.

Es importante señalar, que en este circuito se trabajó con las 4 últimas unidades de control, y estas describen la siguiente parte del proceso: El agua amarga procedente de

varios puntos de la planta y se recibe en el tanque de balance de agua amarga 33-F. De aquí, a la succión de las bombas 39-J/JA (4216), para que la descarga de estas, se envíe a recibir calor de los fondos de la torre agotadora 10-E en los intercambiadores 44-C1/C2, (4217) y luego se caliente con vapor de baja presión en el precalentador 45-C (4218), para después entrar a la parte superior de la torre agotadora 10-E (4219). Asimismo, la unidad 4217, también forma parte de la sección que es enviada al límite de baterías de aguas amargas.

Con estos puntos obtenidos, mostrados en la tabla 4.37, se inquiera que es necesario cambiar las condiciones de operación de varias unidades de control, como en el circuito anterior, para que los equipos puedan cumplir con su función, además de darle coherencia al proceso. Ya que por ejemplo, en la unidad 4219, no existe un incremento de temperatura, a pesar de que el flujo es pasado por un precalentador con vapor de baja, además de que en la unidad 4217, la presión en la descarga de las bombas, es menor a la de succión.

Las condiciones del primer punto corresponderían a implementarse en la unidad 4216, donde se optaría por la adecuada operación del circuito, en conjunto de la reducción del Dprom observado, a expensas de modificar drásticamente la temperatura de salida en el tanque de balance de aguas amargas, ya que se disminuirá 73 °C de lo establecido anteriormente, donde el daba a entender por la temperatura de 113°C y presión de 1 Kg/cm², que el flujo salía en la fase vapor, ya sin la necesidad de calentarlo, sino al contrario, con la necesidad de enfriarlo y expandirlo para reducir su presión, además de que si fuera el caso de enfriarlo y tener un gas, no se tendrían que usar intercambiadores, bombas y un precalentador en esta sección del circuito, como lo describe el censo.

Para el segundo punto, se concluyó que deberían ser las condiciones con la que se trabajase en la unidad 4219, adoptando el flujo una temperatura mayor a la que sale en el intercambiador 44-C2, y una presión un cuanto menor de la observada en la unidad 4218, ya que en los equipos existe una leve caída de presión por el diseño de los mismos. Lo que implicaría que la bomba perteneciente a la unidad 4216, se adecuara para generar una presión de descarga mayor a las 3.3 Kg/cm², en primera instancia para que la presión con la que sale del intercambiador 44-C2 sea un cuanto menor y concuerde con el censo

en esta sección, y en segunda, para que el proceso recobre sentido, teniendo una mayor presión de descarga que a la succión. Con esto se asegura que la corriente adsorbe el calor del vapor de baja en el precalentador, aumentando su temperatura de 68 °C a 84.218 °C, entrando a mejores condiciones a la torre agotadora, además de reducir el desgaste en la unidad de control en 0.125 mpa, nuevamente dando mayor seguridad, vida útil, calidad y sentido al circuito.

Tabla 4.37 Condición de Operación encontrada en el CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.

Puntos	T°C	P Kg/cm ²	Dprom [mpa]
1	40.000	0.800	1.733
2	84.218	3.097	1.582

4.7 CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO, Servicio: Gas ácido

En el capítulo anterior, para este circuito, se habló de los 3 principales procesos donde se obtiene y se separa el gas ácido (del regenerador de aminas, de la sección de tratamiento con amina y de la sección de tratamiento de aguas amargas). Donde después de separarlo mediante agotadores, es enviado como carga a la planta de azufre.

4.7.1 Resumen de propiedades.

Como ya era sabido, solo el 35% de las posiciones tienen una velocidad de desgaste, siendo el circuito con el mayor porcentaje con posiciones que presentaron un incremento de diámetro con respecto a su última medición, con un total de 63%, lo que nos dice que el nivel prevención y desgaste en este circuito, mediante el emplazamiento de tubería y accesorios es alto, debido al fluido que maneja.

En la tabla 4.38, se observan que ese 35%, de las 676 posiciones totales del circuito, existe una mayor contribución del diámetro de 4", siendo este también, el de mayor empleo. No obstante, a pesar de tener mayor número de elementos con d, no cuenta con el mayor desgaste promedio, ya que este apartado le corresponde al diámetro de 6", el cual solo contiene 32 elementos. Además, nuevamente el diámetro más pequeño del circuito, no contiene elementos que aporten al Dprom del circuito y al estudio en general, ya que se observa que contiene 41 elementos que presentan un aumento del espesor de más de 5 mpa.

Tabla 4.38 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.

Diámetros en función de las características de las posiciones del circuito 44. GAS ÁCIDO								
Diámetros del circuito en "	0.75	1.5	3	4	6	8	10	
Cédula	80	80	40	40	40	40	40	
Espesor nominal (mils)	154	200	216	237	280	322	365	
Límite de retiro (mils)	90	100	100	120	150	180	190	TOTAL
Total de posiciones	44	4	36	436	96	16	44	676
Posiciones con obstrucción	3	0	2	5	3	0	0	13
Posiciones con -	41	1	4	201	34	7	3	291
Posiciones con valor de 0	0	2	11	90	27	5	2	137
Posiciones con velocidad de desgaste	0	1	19	140	32	4	39	235
Promedio velocidad de desgaste	0	3.600	1.492	3.582	4.990	4.028	15.145	5.531
Estos 235 elementos con una velocidad de desgaste, se distribuyen de la siguiente manera:								
Posiciones con Norte	0	0	2	28	2	0	5	37
Posiciones con Sur	0	0	2	26	5	0	5	38
Posiciones con Oriente	0	0	4	16	4	1	8	33
Posiciones con Poniente	0	0	6	16	4	2	6	34
Posiciones con Arriba	0	1	3	18	3	0	2	27
Posiciones con Abajo	0	0	2	20	7	1	4	34
Posiciones con Dentro (Garganta)	0	0	0	5	6	0	4	15
Posiciones con Fuera (Codo)	0	0	0	11	1	0	5	17
Posiciones con Posición 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 2	0	0	0	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Posiciones con Posición 4	0	0	0	0	0	0	0	0

De las 325 posiciones con velocidad de desgaste, el par norte-sur, contiene más elementos respecto a los demás, pero referente al desgaste, la posición oriente con 260.55 mpa y 33 elementos que suman este resultado, sufre el mayor deterioro, seguido de su par, poniente con 185.25 mpa y sus 34 elementos. Después de este par de posiciones, la posición abajo ocupa el tercer lugar con el desgaste mayor con 170.88 mpa y 34 elementos, y para las posiciones que claramente pertenecen a los codos, la posición dentro tiene un desgaste de 10.4 mpa en promedio, valor muy grande comparado con su par fuera, que tiene un desgaste de 6.174 mpa en promedio, a pesar de que este último tiene 2 elementos de más con velocidad de desgaste.

En relación al tipo de nivel que pertenecen estas posiciones, el mayor desgaste para tubería, codo, reducción y tee, son: TuOPAB 3. Tubería horizontal paralela al eje Norte-Sur (5.560 mpa), CoOPDF 6. Codo en el plano perpendicular al eje Oriente-Poniente

(8.485 mpa), ReNSOP 7. Reducción vertical (8.137 mpa) y TeNSXB 17. T horizontal con salida hacia Arriba (13.808 mpa).

A continuación, en la tabla 4.39, se presentan los niveles de cada unidad de control con el máximo desgaste. Asimismo, los diámetros que lo contienen y los tipos de posiciones, que son parte del nivel, además de los resultados en general.

Tabla 4.39 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.

UC FINAL	UC-FCCI-4401	UC-FCCI-4404	UC-FCCI-4406
Forrado	NO	SI	SI
CLASE	1P5	1P3	1P3
Material	A53 Gr. B	A53 Gr. B	A53 Gr. B
Niveles de Tuberías	42	14	113
Temperatura de operación (°C)	43	65	113
Presión de operación (Kg/cm2)	0.5	0.9	1.0
Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	4.794	14.435	2.708
Máximo velocidad de desgaste	54.9	40.02	14.05
Mediana	2.95	12.42	1.76
Desviación típica poblacional σ	8.749	8.769	2.876
Moda	4.76	10.12	1.32
\emptyset con el promedio de desgaste mayor	6	10	1.5
Promedio [mpa]	4.990	15.145	3.600
\emptyset con el promedio de desgaste menor	4	4	3
Promedio [mpa]	1.590	11.918	1.492
Tipo de nivel con el máximo valor de velocidad de desgaste	TeNSXB 17. T horizontal con salida hacia Arriba	TuOPAB 3. Tubería horizontal paralela al eje Norte-Sur	CoNSDF 5. Codo en el plano perpendicular al eje Norte-Sur
Posición con el máximo valor de velocidad de desgaste	Abajo	Oriente	Fuera (Codo)
\emptyset con máximo valor de velocidad de desgaste	6	10	4

UC FINAL	UC-FCCI-4401	UC-FCCI-4404	UC-FCCI-4406
Elementos con velocidad de desgaste critica > 15 mpa	1	19	0
Promedio de velocidad de desgaste critica	54.900	23.291	0.000
Promedio de velocidad de desgaste del circuito	5.531		

También se observa que la unidad 4406, comparada con la unidad 4216 del circuito anterior, contienen las mismas condiciones de operación, pero esta última con un desgaste mayor. Asimismo, las condiciones de operación llaman la atención, al tener un intervalo de presión de operación demasiado estrecho, el más corto de todos los circuitos. Además el diámetro de 10" es el más revelador en relación al desgaste de la pared de la línea, ya que presenta 18 elementos con velocidad de desgaste crítica. Además, 18 de esos elementos corresponden a la unidad 4404, que tiene 19 elementos críticos, de los 50 que tiene esta unidad con velocidad de desgaste, asimismo, esta unidad opera con las condiciones intermedias, teniendo del Dprom de mayor valor observado a través de todos los circuitos. Y por último, nuevamente aparece el codo como parte de la línea con el valor de máximo velocidad de desgaste puntual, con diferente posición y tipo de nivel, cabe aclarar.

Al prescindir de varios elementos para cada unidad de control, como se observa en la tercera columna de la tabla 4.40, era de esperarse que la unidad que tuviese un mayor número de elementos excluidos para el posterior procedimiento, tuviese el mayor valor del promedio de velocidad de desgaste en este circuito, y aun así, demuestra que la muestra es representativa y puede ser utilizada. Asimismo, es importante aclarar, que para la unidad 4404, se seleccionó ese intervalo en particular, debido a que ese si se tomaba el usual, el indicador proporciona un numero negativo de -0.115, lo que nos indica que el Dprom de la unidad, no es representativo o característico, además de que solo se contarían con 4 elementos, representando el 8% del total de elementos de la unidad de control que cuentan un valor de velocidad de desgaste, y se hubiese tomado en cuenta el intervalo (0.01,9.99) de mpa, se cuenta con un valor de 0.546 para el indicador, inferior al 0.801, que presenta el intervalo seleccionado, lo que nos dice que es más confiable y prudente el trabajar con este intervalo, ya que representa mejor al circuito, al mismo

tiempo que cuenta con 31 elementos con d, a diferencia de los 17 elementos para el intervalo habitual empleado. Por último, referente a esta unidad tan peculiar, se encontró que tiene la mayor cantidad de elementos con d, se encuentra en el intervalo con un desgaste crítico, con una suma de 442.52 mp, para los 19 elementos que generan un promedio de 23.291 mpa con una desviación de 7.278, que indica que esta muestra no está dispersa, y posteriormente entre los valores de 14.99 mpa y 10 mpa, con un total de 14 posiciones, presentando un valor en su suma de 171.mpa con un promedio de 12.256 mpa, teniendo como moda el valor de 10.12 mpa.

Tabla 4.40 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.

Unidad de control	Intervalos	Porcentaje de la cantidad de elementos respecto al total	Suma velocidad de desgaste [mpa]	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Moda	Promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa]	Desviación típica muestrals	Prom/2 - s
UC-FCCI-4401	(0.01,4.99)	73%	64.18	0.23	4.76	2.27	4.76	2.377	1.044	0.145
UC-FCCI-4404	(0.01,14.99)	62%	279.22	0.92	14.72	9.2	10.12	9.007	3.702	0.801
UC-FCCI-4406	(0.01,4.99)	84%	208.15	0.2	4.83	1.32	1.32	1.665	0.826	0.007

Es importante señalar, que en este caso, el ordenamiento de las unidades de control, referente al valor de Dprom, de mayor a menor o viceversa, queda en el mismo orden que para los valores presentados en la tabla 4.39, donde el primer lugar de mayor a menor, lo ocupa la unidad 4404, la cual es la más crítica del circuito y del trabajo en general.

4.7.1.1 Ordenamiento de las UC, en función de T y P.

Subsiguientemente de haber seleccionado los intervalos representativos, se observa en la tabla 4.41, que el ordenamiento para ambas clasificaciones, quedan constituidas de la misma manera, por lo que se tiene la misma cuestión que para el circuito 31, la cual pertenece al servicio de propileno.

Tabla 4.41 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.

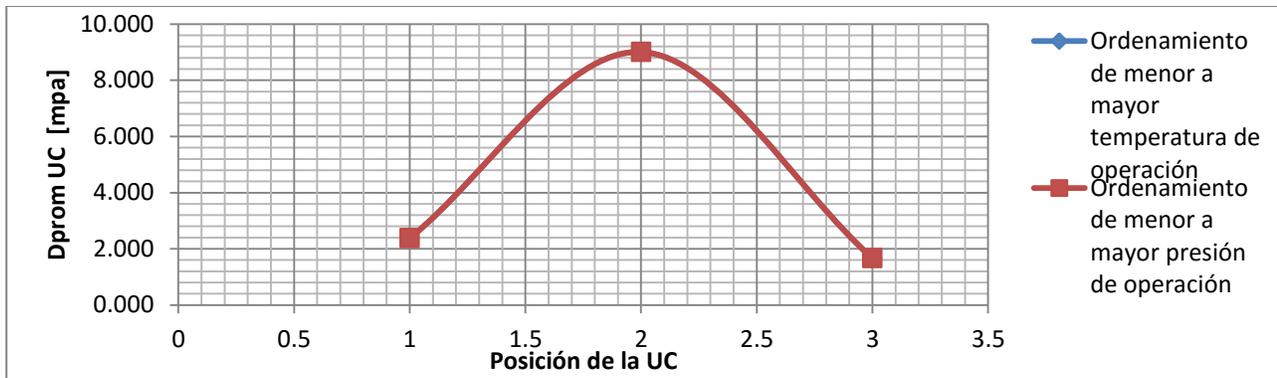
Posición de la unidad de control, acorde al ordenamiento	Ordenamiento de menor a mayor temperatura de operación				Ordenamiento de menor a mayor presión de operación			
	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] T	Temperatura de operación (°C)	Presión de operación (Kg/cm2)	UC	promedio velocidad de desgaste de la unidad [mpa] P
1	43	0.5	UC-FCCI-4401	2.377	43	0.5	UC-FCCI-4401	2.377
2	65	0.9	UC-FCCI-4404	9.007	65	0.9	UC-FCCI-4404	9.007
3	113	1.0	UC-FCCI-4406	1.665	113	1.0	UC-FCCI-4406	1.665

4.7.2 Obtención de las condiciones de operación óptima.

Al no obtener puntos para establecer una mejora en este circuito, se concluye nuevamente que, tal y como opera, es lo mejor para el proceso en función del desgaste de pared, como se indicó también para el circuito 31, aunque aquí obviamente existe otra tendencia en relación al desgaste. Claramente, en este circuito existe un comportamiento parecido al que genera una distribución normal, como se observa en la gráfica 4.20, en relación al desgaste del material y sus condiciones de operación. Aquí es importante señalar la implementación estratégica de las condiciones de operación para la unidad más larga del circuito y una más largas de esta planta, y que corresponde a la sección del separador de agua/gas residual 35-F a L.B. de gas ácido, donde el gas ácido es separado del vapor de agotamiento, los cuales salieron como producto del domo de la torre agotadora 10-E, la cual se mencionó en el circuito anterior, donde este flujo es enviado como carga a la planta de azufre, ya que esta unidad y con las condiciones de operación más elevadas en el circuito, contiene un Dprom bastante dócil, que le permite operar adecuadamente para la alimentación de la otra planta, sin tener que hacerle bastante mantenimiento como se pensaría en un principio, por el tipo de fluido que transporta. Para el caso de la unidad 4404, que presento demasiados elementos críticos y sub-críticos, es interesante el poder

encontrar el motivo del porque presenta este fenómeno. Para empezar, esta unidad comienza, según el censo de unidades de control, en la salida del domo de la torre agotadora 10-E, y termina en el intercambiador 46-C (cuerpo). Ahora bien, guiándose con la descripción del proceso, en esta torre, entra agua amarga, y por el fondo sale agua desflemada a unos 116 °C, y por el domo salen los productos agua desflemada y vapor de agotamiento a unos 107 °C, donde a la salida del domo deben de pasar por el condensador 46-C. Ya con esta descripción, es posible explicar del porqué de estos valores, y se debe a que los gases H₂S y CO₂, desprendidos del gas LP lavado, forman ácidos en presencia del agua, en este caso con el vapor de agua que sale por el domo, aumento en gran número por la concentración y el flujo, el grado de corrosión de la línea de proceso. Por lo que también se espera que la siguiente unidad de control presente un Dprom alto, ya que esta va del condensador 46-C, al separador, y como es sabido, a la salida del separador, estos gases reducen el grado de corrosión en gran medida sin la presencia de agua.

Por último, la hipótesis propuesta para el circuito 31, que también no presenta puntos de mejora, se podría seguir tomando en cuenta, ya que a partir del circuito 31, el rango de presiones es pequeño, y los circuitos 35 y 42, presentaron intersecciones principalmente porque las condiciones de operación que tenía registrado el censo, no resultaban congruentes con el proceso y tal vez, si se hubiese prestado mayor atención al censo desde el principio junto con la descripción del proceso, a los diagramas de diseño mecánico, lista de equipos y en los levantamientos en la planta, probablemente hubieran cambiado y se tendría unas condiciones de operación con sentido para las unidades de control de los 2 circuitos anteriormente mencionados, y así, de esta manera, se podría estar comprobando esta hipótesis de la presión.



Gráfica 4.20 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.

4.8 Análisis general.

En este apartado, se realizará un análisis enfocado con el cumplimiento de los objetivos planteados, debido a que a través de los circuitos y la información presentada en este capítulo, se realizó dicho análisis de manera general y no tan particular, por lo tanto, no se tendría un estudio completo, con el que se pudiese asegurar que se cumplió con el propósito del trabajo.

4.8.1 Encontrar un factor en común en el desgaste de las líneas para los diferentes circuitos.

De acuerdo con los resultados, en general se logró encontrar diferentes factores en común que contribuyen al desgaste, en este caso se está hablando de las posiciones, diámetros y tipo de niveles. En el caso de las posiciones especiales, se dejaron de lado, ya que contienen una cantidad de elementos insuficientes para poder indagar en su desgaste y encontrar un posible factor.

Diámetro: se encontró que existen 2 diámetros que trabajan con el material A53 Gr. B, los cuales sufren un mayor desgaste dentro de la planta, siendo los diámetros de 6" y 8" respectivamente. Ya que son los más empleados juntos con el diámetro de 4", con la diferencia de que este último no se desgasta en una proporción similar, respecto a los primeros diámetros señalados.

Posición: las posiciones que dan un mayor deterioro en el espesor de pared, están dadas por la posición oriente, dentro o garganta y secundariamente por la posición abajo. Como estas posiciones no determinan los tipos de niveles que generan un mayor desgaste y

problema en el proceso, también se decidió investigar esos niveles y se dividieron en 4 categorías; nivel de tubería, nivel de codo, nivel de reducción y nivel de te. Para la tubería el nivel; TuNSAB 2. Tubería horizontal paralela al eje Oriente-Poniente, es el que genera mayores problemas al estar presente con mayores valores de desgaste en 6 de los 7 circuitos. En relación al codo, el nivel que es factor de desgaste es; CoABDF 4. Codo en el plano perpendicular al eje Arriba-Abajo, al estar presente 5 de los 7 circuitos con el mayor deterioro. Referente a las reducciones, la posición; ReNSOP 7. Reducción vertical, presente este mismo problema, ya que esa única que se encuentra en los desfuegos por lo general. Y por último, las tees, para este accesorio, la posición; TeNSXP 11. T vertical con salida al Oriente, tienen el primer lugar en desgaste en general de la planta. Cabe aclarar ya sea posiciones, diámetros y niveles aquí mencionados, no son los que cuentan con el mayor número de elementos con una velocidad de desgaste, por lo que han de ser considerados como factores de desgaste en general para este material.

En relación a las condiciones de operación, la teoría únicamente proporciona una referencia de la fatiga admisible del material y de la corrosión en general, mas no del comportamiento en particular de estos 7 diferentes fluidos, respecto a la corrosión que sufre este material a diferentes condiciones de operación, por lo que generalizar sería imprudente, ya que sería necesario realizar un estudio a diferentes condiciones establecidas y tener controlados todos los factores que pudiesen contribuir a errores y resultados. Lo único que se puede comentar al margen, tras lo observado a través de graficar el desgaste en función de las condiciones de operación, es que el comportamiento da indicios de como los fluidos afectan a la línea de proceso.

Por último, en relación a estos gráficos, se realizó una comparación tras ordenar las unidades de control de los circuitos de menor a mayor temperatura y presión, de la población total y de las muestras seleccionadas para representar dichas unidades, se encontró que la mayoría de los circuitos poseían el mismo comportamiento de desgaste para el grafico del Dprom en función de la presión, además de que el circuito 44, perteneciente al servicio de gas ácido, se observó el mismo comportamiento, con esto se concluye que si existe una notable diferencia en representar las unidades y los circuitos con los valores representativos y los dispersos.

4.8.2 Determinar para cada circuito, las condiciones de operación óptimas con relación a su velocidad de desgaste.

Este objetivo se trató en los apartados para cada circuito de este capítulo, por lo que solo quedaría comentar que todos los puntos de mejora, fueron establecidos para modificar a alguna unidad de control ya sea para darle sentido y mejora al proceso o para mejorar la seguridad y disminuir los costos de mantenimiento a costa de optar por unas presiones y temperaturas diferentes de las que están estipuladas.

4.8.3 Obtener el promedio de velocidad de desgaste del diámetro del mayor y menor deterioro para cada unidad de control que conforma al circuito.

Esta información se plasmó para cada circuito en su respectiva tabla titulada “Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO X”, donde se apreció que algunas unidades de control no contenían información para el diámetro y su valor de velocidad de desgaste promedio, debido a que solo se contaba con un diámetro que aportaba información al circuito a pesar de existir otros, los cuales repartían sus elementos en posiciones con obstrucción, aumento de espesor o la combinación de estas.

4.8.4 Establecer el porcentaje de posiciones que cuentan con una medición de espesor con respecto al total que se encuentra en el circuito.

De acuerdo a la tabla 4.42, que incorpora la información para este punto, se conoce que el circuito 9, perteneciente al aceite cíclico ligero, es aquel que proporcionó más elementos con d, en relación a su total. Además, en concordancia al % de las elementos con un valor de velocidad de desgaste, para los primeros 6 circuitos, el porcentaje de posiciones con esta característica, siempre supero a las otras 3 características de posiciones presentes en él estudió, por lo que se puede decir que se contó con más información para la generación de resultados, que información sin trascendencia.

Tabla 4.42 Porcentajes de las 4 condiciones de posiciones que conforman los circuitos estudiados.

CIRCUITO/CARACTERIS-TICA DE CASILLA	01 CARGA	09 ACEITE CICLICO LIGERO	15 NAFTA	31 PROPILENO	35 LPG LAVADO	42 AGUA AMARGA	44 GAS ÁCIDO
Posiciones con velocidad de desgaste	43%	56%	41%	39%	48%	47%	35%
Posiciones con obstrucción	3%	3%	2%	1%	3%	2%	2%
Posiciones con -	30%	15%	27%	36%	25%	15%	43%
Posiciones con valor de 0	24%	26%	30%	24%	24%	36%	20%

4.8.5 Obtener el promedio de velocidad de desgaste para cada circuito

Es cierto que los Dprom de las unidades de control son importantes en general e indispensables cuando se quiere encontrar algún punto de optimización, pero con lo que respecta al poder hacer una comparación relevante que englobe los circuitos y se pueda decir cual tiene un desgaste menor y por qué o caso contrario, es necesario obtener el promedio del circuito.

Para esto, se presenta la tabla 4.43, donde se observa en primera instancia que los promedios más altos se encuentran en el primer y último circuito, debido a que el circuito 1, correspondiente al servicio de mezcla de gasóleos, este fluido presenta una gran viscosidad respecto a los demás fluidos, y a pesar de operar con condiciones altas, la fricción entre superficie y fluido viscoso, logra provocar daños importantes en el espesor de la tubería y accesorios. Referente al último circuito, se comentó que sobre cierta sección del circuito, la formación del ácido sulfhídrico y ácido carbónico que son altamente corrosivos y por ende, se presentan demasiados valores críticos y sub-críticos.

Tabla 4.43 Promedios de velocidad de desgaste para cada circuito del estudio.

	Dprom circuito [mpa]	Rangos de Temperaturas de Operación °C	Rangos de Presiones de Operación Kg _f /cm ²
CIRCUITO 01 CARGA	6.401	65 - 288	1.4 - 17
CIRCUITO 09 ACEITE CÍCLICO LIGERO	3.129	55 - 248	1.6 - 15.2
CIRCUITO 15 NAFTA	2.720	38 - 43	1.4 - 20.7
CIRCUITO 31 PROPILENO	2.579	38 - 63	19 - 23.3
CIRCUITO 35 LPG LAVADO	3.835	38-43	13.4 - 20.7
CIRCUITO 42 AGUA AMARGA	2.719	40-113	0.8 - 3.3
CIRCUITO 44 GAS ÁCIDO	5.531	43-113	0.5 - 1

En el caso del agua amarga, es sabido que es parte de los problemas de corrosión, y año con año se han establecido estudios que se apegan a las condiciones de operación, debido a que las características del crudo cambian, dando como resultado ambientes

corrosivos más agresivos que antes. Es interesante observar su Dprom, ya que esta agua está compuesta de amoníaco, fenoles, hidrocarburos, compuestos de azufre de bajo peso molecular y principalmente de sulfuro de hidrogeno que en medio acuoso se denomina acido, por lo que se esperaría que el desgaste de la línea de proceso, tuviese uno de los valores más altos, caso contrario al valor obtenido, y esto pudiera deberse por un valor neutral o poco básico del pH, ya que se ha encontrado que para acero al carbono, en presencia del medio amargo, si presenta valores de pH 8.5 o mayores, los productos de corrosión favorecen la presencia de picaduras o cavidades que ocasionan daños muy severos al material, donde al menos tres etapas

Conforme a gas LP lavado, es de esperarse que tenga un Dprom intermedio, ya que pasa por varias etapas de endulzamientos, para quitarle los contaminantes ya que si este posee como producto H_2S , CO_2 y los famosos mercaptanos, que son corrosivos, además cabe aclarar que en presencia de oxígeno, el medio se hace oxidante, generando una mayor corrosión en la superficie.

Y para los últimos 3 circuitos, con los valores más suaves, se le atribuye por la combinación de la naturaleza del fluido (productos ligeros y sin componentes agresivos que afecten la integridad mecánica de la tubería y accesorios), y las condiciones de operación, ya que es donde se manejan presiones elevadas, y en combinación con la temperatura, se reduce la resistencia a fluir y por ende la fricción.

4.8.6 Determinar el servicio con el mayor y menor desgaste con respecto a los demás.

Menor: Propileno, debido principalmente a la fase y naturaleza del fluido, que genera valores de viscosidad menores de $7.813E-05$ cps, además de que no se caracteriza por ser un compuesto orgánico corrosivo.

Mayor: Gas ácido, debido a la agresividad del medio acido, aunado con el gas ácido en combinación con agua, que se incrementa aún más el entorno corrosivo.

4.8.7 Establecer una base fundamentada del porqué de la disminución de espesor de las líneas en función de los datos recopilados y los resultados obtenidos, así como proporcionar una hipótesis para disminuir el efecto de este fenómeno.

La disminución de espesor en estas líneas de proceso, se debe principalmente a la corrosión, en donde se deteriora el material principalmente por un ataque electroquímico del entorno, y la velocidad en que esta suceda, dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del medio, la composición del material en cuestión. Otras causas que favorecen a este deterioro, corresponden al desgaste por fricción, la erosión y factores mecánicos.

Una característica importante de los procesos de corrosión, es que la oxidación ocurre espontáneamente, debido a que los metales empleados para las aleaciones en el acero, tienden a regresar a su forma estable, ya que la mayoría de los metales empleados se encuentran como menas en forma de óxidos, sulfuros, cloruros, fosfatos y carbonatos en los minerales y estos, para ser empleados en la forjación del acero, tienden a tener un tratamiento preliminar donde se excluyen impurezas del mineral donde están presentes y se preparan para la posterior reducción, donde el compuesto metálico se reduce para obtener el metal libre y así , estar listo para la etapa de refinado, donde se purifica el metal.

Respecto al material, estrictamente, el acero inoxidable no existe, simplemente adquiere el nombre debido a la presencia de al menos un 12% de cromo, así como de contener níquel, molibdeno y otros elementos anticorrosivos en la composición del acero. Para el caso del acero A53.Gr. B, su aleación, como se observó en el segundo capítulo, contiene carbono, manganeso, fósforo, azufre, cobre, níquel, cromo, molibdeno y vanadio, los cuales como ya es sabido, hacen que el material sea el menos caro, además de contrarrestar la corrosión con una concentración alta y bien distribuida de C, Mn, P, S, respecto a los materiales A106 Gr. B, A333 P5 Y A335 P5, los cuales también son usados en esta planta. Referente a la composición, solamente cabe aclarar que no siempre es recomendable aumentar la concentración, ya que implica un efecto contraproducente en alguna de las propiedades. Por ejemplo, si se aumenta el % de titanio, el material se

vuelve más caro, si se aumenta el níquel, decrece la soldabilidad que es fundamental, por lo que el meterse en el asunto de modificar % y contrarrestar la corrosión y mejorar el material, resulta una tarea exhaustiva de la metalurgia que no le concierne al presente trabajo, pero que resulta interesante y que seguramente existen trabajos respecto al tema, ya que siempre se busca las mejoras en función de costos, seguridad y viabilidad.

Nuevamente, retomando la teoría, es sabido que la corrosión ordinaria es un proceso redox, por el cual los metales se oxidan por medio del oxígeno (O_2), en presencia de humedad. El oxígeno en estado gaseoso es un agente oxidante, y la mayoría de los metales tienen potenciales de reducción menores que éste, por lo tanto son fácilmente oxidables. Además, se sabe que la oxidación de los metales tiene lugar más fácilmente en puntos donde la tensión es mayor (donde los metales son más activos). Así, un clavo de acero, que en su mayor parte es hierro, se corroe primero en la punta y en la cabeza. Un clavo doblado se corroe más fácilmente en el recodo. Teniendo esto en cuenta, y con los resultados obtenidos, se sabe comprende el por qué los codos sufren el mayor desgaste.

En relación a la corrosión atmosférica, es la causa más frecuente de la destrucción de los metales y aleaciones. El mecanismo de corrosión es de naturaleza electroquímica, donde el electrolito es una capa de humedad sobre la superficie del metal cuyo espesor varía desde capas muy delgadas (invisibles), hasta capas que mojan perceptiblemente el metal. La duración del proceso de corrosión depende sobre todo del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica, y como la planta se encuentra en las costas del Oaxaca, el % de humedad relativa es mayor, provocando que el vapor de agua tienda a formar estas capas de humedad más fácilmente con una disminución de temperatura en la superficie y el ambiente. La resistencia óhmica entre la zona anódica y catódica de las minúsculas pilas de corrosión que se distribuyen sobre el metal es grande cuando el espesor de la capa de humedad es pequeño.

Investigando, se encontró una relación entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica. Con lo cual se concluye que en espesores pequeños de humedad la corrosión es insignificante, pues la resistencia óhmica de la capa del electrolito sobre la superficie metálica es muy grande y la disolución del metal es difícil. Al aumentar el espesor disminuyen la resistencia de la capa del electrolito y la polarización

catódica, lo que origina un aumento en la velocidad de corrosión hasta que alcanza un nivel máximo, que disminuye después con el aumento del espesor. En esta zona, la reacción catódica es determinante en el proceso de corrosión; el factor óhmico y la polarización anódica pierden importancia, pues la difusión de oxígeno en la superficie metálica es muy lenta y por tanto determinante del proceso global.

En general, la corrosión atmosférica puede ser clasificada en:

- I. Corrosión seca: Se produce en los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa; en el caso de los metales de este material, se conoce que termodinámicamente, este proceso es natural en ellos.
- II. Corrosión húmeda: Requiere de la humedad atmosférica, y aumenta cuando la humedad excede de un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%; en el caso de la ubicación de la planta, la humedad relativa es mucho mayor a la de la Ciudad de México, por lo que allá, la corrosión se presenta con un mayor impacto, además de que por ejemplo, consultando la humedad en este estado, sobrepasa el 70% de humedad relativa en 14 hrs de las 24 hrs de un día.
- III. Corrosión por mojado: Se origina cuando se expone el metal a la lluvia o a otras fuentes de agua.

Por último, para dejar de hablar de la disminución de espesor debido a la corrosión atmosférica, se debe tener en consideración contaminación, donde el NaCl y el SO₂ son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. El primero es un contaminante natural y llega a la atmósfera proveniente del mar (atmósfera marina), donde el grado de contaminación salina es dependiente de la distancia al mar, y puesto que la planta se encuentra a orillas del océano pacífico, es factor en cuanto al deterioro del material. Respecto al SO₂, éste se encuentra en el aire, y es originado principalmente por la combustión de combustibles fósiles y por lo tanto, se tiene niveles altos de contaminación sulfurosa en esta zona por el giro de la planta. Además, las partículas de polvos en suspensión en la atmósfera, en conjunción con la humedad, forman celdas de corrosión por aireación diferencial en la superficie y, a través de la absorción de SO₂, también pueden acelerar la corrosión en la zona de contacto con el metal.

Ya se ha hablado sobre los factores que generan el deterioro del espesor de pared, por lo que respectaría establecer la hipótesis para disminuir el efecto de este fenómeno. Este asunto resulta un cuanto difícil de proporcionar, ya que se necesitaría contar con más elementos, aparte de las mediciones de espesor de pared, velocidad de desgaste, los niveles y posiciones, debido a que solamente esta planta maneja 54 circuitos, y se tendrían que hacer pruebas para cada circuito y cada sección de este, y como es conocido, se manejan diversos tipos de material. Así que más proporcionar una hipótesis, se opta por establecer algunos aspectos de mejora; como realizar estudios aislados sometiendo al material a pruebas de pH, condiciones de operación (temperatura, presión, flujo), entornos y ambientes, para generar resultados referentes a la corrosión y deterioro por el fluir de los diferentes servicios en las refinerías, esto para implementar los valores óptimos en las secciones largas, de límites de baterías o de suministro, ya que implementarlos en las salidas y entradas de equipos no es viable y se interpondría en el proceso, debido a que solo se encontraron estudios realizados para sistemas amargo en función del pH, además de que la literatura solo se encuentra información enfocada a la fatiga del material, resistencia a la tracción y fluencia, mas no a la exposición del material a diferentes entornos donde se estudie la corrosión y los diversos factores del desgaste.

Referente a la hipótesis, como ya se sabe, este material contiene elementos que hacen la acción de protección catódica, con lo cual su valor de desgaste se aprecia que es pequeño en relación a los años, además de que las proporciones en porcentaje de los metales en el metal, juegan un papel importante para combatir el desgaste y la pérdida de material por oxidación, por lo que una alteración sería una hipótesis, lo cual resulta difícil de predecir y aun mas de proponer porcentajes o variables de cambio, ya que es un asunto que le incumbe a los expertos y al área de investigación de la metalurgia. Otra forma de augurar la vida útil sería implementando protección catódica por corriente impresa a la tubería, donde se une eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua y el polo positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito, la cual ya está implementada, pero debido a la información restringida no se tiene noción del voltaje, de la masa y forma de los electrodos auxiliares y de la eficiencia que esto genera. Pero aun así, se podría proponer un sistema de protección, combinando la corriente impresa con ánodos de sacrificio, sabiendo que la

conjunción de ambos protege aún más al material, equilibrando las ventajas y desventajas de ambas protecciones.

5. Conclusiones

Los resultados mostrados en este trabajo indican que el desgaste no resulta ser un factor crítico que ponga en riesgo la seguridad de la planta, además de que los circuitos contienen bastantes elementos reemplazados, ya que al menos el 40% de las posiciones en cada circuito, presentan un engrosamiento de espesor, validando que existe un sistema eficiente de medición y control, el cual permite identificar las anomalías y disminuye el error humano en la toma de decisiones para los emplazamientos de material en las zonas de alto riesgo por la disminución del espesor. Aun así, es posible establecer una mejora a este sistema.

La primera, sería homologar los criterios de medición de espesor para fechas similares en los circuitos para fluidos con propiedades similares, ya que así se tendría un mejor panorama de control y comparación, que permitiría proyectar el comportamiento del fluido, teniendo como resultado el conocimiento de la conducta del deterioro del material con mayor inferencia, así como la realización de pronósticos válidos y reales sin necesidad de valores de velocidad de desgaste puntual, que son demasiados específicos, además de que su actualización es un proceso tardado.

La segunda, contar con una herramienta en SIMECELE que pudiera identificar errores de importación de valores y resultados, relacionados con el proceso, ya se observó que existen un par de unidades de control que contienen condiciones de operación inadecuadas según los requerimientos.

Y por último, la tercera sería implementar una capacitación más allá de la técnica, para que al momento de capturar y realizar el trabajo que establece todo SIMECELE, se pueda tener un mejor criterio y entendimiento de lo que se realiza y del proceso mismo.

Por otra parte, en relación con algunas peculiaridades encontradas, más allá de las relatadas en el análisis general, se descubrió que son los mismos 3 circuitos, aquellos que poseen un desgaste mayor independiente del grado de desgaste, ya sea con todas las

posiciones involucradas para el promedio, o con los intervalos seleccionados que representaban de mejor manera el circuito, siendo estos:

- CIRCUITO 01. CARGA, Servicio: Mezcla de Gasóleos.
- CIRCUITO 35. LPG LAVADO, Servicio: LPG lavado.
- CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO, Servicio: Gas ácido.

Con este hallazgo, es oportuno sugerir el prestar una mayor atención a estos circuitos, ya que se comprobó que son los más propensos al desgaste, pudiendo ocasionar algún accidente, tanto al personal como al proceso.

Asimismo, el circuito con un mayor desgaste el de gas ácido y el de menor es propileno, y de las 29 unidades de control de los 7 circuitos, 27 describen perfectamente su comportamiento de desgaste en el intervalo de (0.001-4.99) mpa, con lo que se demostró que el desgaste no es ni subcrítico en estos circuitos para el material en cuestión. Pero se propone que se conciban trabajos similares para los otros tipos de material y posteriormente del mismo material en las otras refinerías del país, y así tener un panorama más claro del desgaste en las líneas de proceso, con evidencias y conductas válidas, con el fin de generar más reportes, comportamientos, proyecciones e información de dominio público con relación al desgaste, ya sea para futuros trabajos y labores de investigación, así como para complementar los indicadores de riesgo, tener mayor margen control, asentar la seguridad, optimizar el proceso, y económicamente reducir los gastos de mantenimiento, encontrando un punto de equilibrio entre el desgaste y factor de servicio.

Referente a comportamiento del desgaste de los fluidos en función de las condiciones de operación, no se encontró una similitud con la cual se pudiese generalizar, por lo que es prudente realizar acciones de estudio por separado para cada circuito, hasta que se encuentre otra variable que ayude a alguna generalización, cabe mencionar que el flujo sería la siguiente variable de estudio, que aunque probablemente no ayúdense a generalizar en el comportamiento, generaría una menor incertidumbre de la conducta del fluido junto el presente trabajo, al ser más meticulosos en la descripción del fenómeno y generación de resultados.

Además, resultó interesante que el codo se encontró como factor común de desgaste, pero obviamente hay un motivo claro, que reafirma y concuerda con la teoría, que nos dice que la corrosión por erosión de los metales tiene lugar más fácilmente en puntos donde la tensión es mayor, y la tensión en las líneas de proceso es mayor en los codos, donde aunado a este fenómeno, es donde suele aumentar la fricción de la tubería con el fluido, debido al cambio de orientación que se realizan, además que ahí existe una gran energía por fuerza de fricción que se pierde y aumenta el valor del coeficiente de fricción.

Asimismo, se apreció que a pesar de tener un finito número de celdas sin valor, aquellas que si lo tenían, resultaron ser la mayoría con amplio margen de cantidad, con lo que se le da soporte y validez al presente trabajo, presentando resultados confiables, información correcta, un análisis verídico y propuestas válidas.

Igualmente, a lo largo del cuerpo de este trabajo, se afirma que se cumplieron con los objetivos planteados, además de que se le dio sentido los resultados, los cuales pudiesen ser más completos si se contara con mayor información sobre el tema en particular.

También se detectó y se patentizó como dice la literatura, que la ubicación y el giro de la planta, es factor para el aumentar el grado de corrosión, ya que la corrosión atmosférica y la contaminación en combinación, incrementan la velocidad de corrosión. Además, se logró detectar incongruencias en el censo de unidades de control, así como augurar un desgaste dócil, a condiciones que se podrían implementar en el proceso.

En relación a los valores críticos, el número total de elementos contabilizados fueron 81, representando el 3.43 % de los 2,359 elementos con velocidad de desgaste, por lo que nuevamente esto comprueba que existe un desgaste dócil, además de que se logró detectar los puntos críticos, dando a conocer la unidad de control a la que pertenecen y cuál es su promedio, y la posición con el mayor desgaste en general para cada unidad de control.

También se generó y presentó información única, la cual resume el circuito presentando los diferentes resultados para cada unidad de control que lo conforma, complementando al reporte generado por SIMECELE, ya que este solo genera el siguiente análisis mostrado en la tabla 5.1, para cada unidad de control.

Tabla 5.1 Resultados que genera SIMECELE para los niveles de tubería y críticos.

Análisis de niveles normales	Análisis de niveles críticos
Inspección	Inspección
Suma de las velocidades de desgaste (mpa)	Suma de las velocidades de desgaste (mpa)
Número de velocidades de desgaste consideradas	Número de velocidades de desgaste consideradas
Velocidad de desgaste promedio (mpa)	Velocidad de desgaste promedio (mpa)
Velocidad de desgaste máxima ajustada (mpa)	Velocidad de desgaste máxima ajustada (mpa)
Velocidad de desgaste utilizada en el análisis (mpa)	Velocidad de desgaste utilizada en el análisis (mpa)
Vida útil estimada mínima (años)	Vida útil estimada mínima (años)
Fecha de próxima medición de espesores (FPME)	Fecha de próxima medición de espesores (FPME)
Fecha de retiro probable (FRP)	Fecha de retiro probable (FRP)
Espesor mínimo encontrado (mils)	Espesor mínimo encontrado (mils)
Fijada con base en la lectura del nivel	Fijada con base en la lectura del nivel
En la posición	En la posición
	Niveles críticos

Se puede apreciar que existen campos que se repitieron en el presente trabajo, aunque la mayoría de los presentados en el capítulo 4, son demasiados particulares y novedosos en función de los diámetros, posición y los tipos de niveles. Así como el análisis llevado a cabo es una creación que resalta y le da sentido a los números y letras, lo cual es valioso en el campo ingenieril, ya que se crea un panorama real de la conducta de la tubería para cada fluido.

Por último, debido a que no se presentó un panorama con la mayoría de valores críticos de D_{prom} para cada circuito, este material resulta ser el ideal para estar implementados en las líneas de proceso con estos fluidos y condiciones de operación. Además, tal como se citó en el segundo capítulo, los factores de tomar en cuenta para la implementación de cierto material para líneas de procesos, en el caso del material ASTM A53 gr B tipo E, aquí se confirma que es el óptimo, ya sea por el desgaste, precio y las ventajas de las propiedades mecánicas, que disminuyen en menor proporción al exponerlo a condiciones más severas.

6. Índice de ecuaciones

Ecuación 1	37
Ecuación 2	39
Ecuación 3	41
Ecuación 4	42
Ecuación 5 Espesor de la medición	62
Ecuación 6	71
Ecuación 7	118
Ecuación 8	118
Ecuación 9	119
Ecuación 10	119
Ecuación 11	122
Ecuación 12	122
Ecuación 13	123
Ecuación 14	123

7. Índice de gráficas

Gráfica 4.1 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 01. CARGA	117
Gráfica 4.2 Líneas de tendencia de la función cuadrática de la primera intersección del CIRCUITO 01. CARGA	118
Gráfica 4.3 Líneas de tendencia de la función lineal de la primera intersección del CIRCUITO 01. CARGA	119
Gráfica 4.4 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 01. CARGA	121
Gráfica 4.5 Líneas de tendencia de las funciones cuadráticas para la obtención de T y P del CIRCUITO 01. CARGA	122
Gráfica 4.6 Líneas de tendencia de las funciones lineales para la obtención de T y P del CIRCUITO 01. CARGA	123

Gráfica 4.7 Líneas de tendencia de las funciones mayores de primer grado, para la obtención de Dprom y posición de la segunda intersección en el CIRCUITO 01. CARGA.	125
Gráfica 4.8 Líneas de tendencia de las funciones mayores de primer grado, para la obtención de T y P de la segunda intersección en el CIRCUITO 01. CARGA.....	126
Gráfica 4.9 Líneas de tendencia de las funciones mayores de primer grado, para la obtención de Dprom y posición de la tercera intersección en el CIRCUITO 01. CARGA.	126
Gráfica 4.10 Líneas de tendencia de las funciones mayores de primer grado, para la obtención de T y P de la tercera intersección en el CIRCUITO 01. CARGA.	127
Gráfica 4.11 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.	136
Gráfica 4.12 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.	137
Gráfica 4.13 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 15. NAFTA.	145
Gráfica 4.14 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 15. NAFTA.....	146
Gráfica 4.15 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 31. PROPILENO.	154
Gráfica 4.16 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.	159
Gráfica 4.17 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.	160
Gráfica 4.18 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.	168
Gráfica 4.19 Temperaturas y Presiones del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.....	168
Gráfica 4.20 Comportamientos de los Dprom del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.	177

8. Índice de tablas

Tabla 1.1 Aproximaciones a los costos de la corrosión.	3
Tabla 1.2 Datos de corrosión del acero al carbono correspondiente a un año de exposición (Series 11,12 y 13), dos años de exposición (Serie 21), tres años de exposición (Serie 31) y cuatro años de exposición(Serie 41).....	4
Tabla 1.3 Circuitos seleccionados.	6
Tabla 2.1 Cuantificación de los tipos de corrosión.....	26
Tabla 2.2 Comparación de propiedades físicas y mecánicas para varios materiales utilizados en tuberías a 23°C.	50

Tabla 2.3 Comparación de fatigas admisibles, presiones y temperaturas (Base tubería 2" "pulgadas").	51
Tabla 2.4 Fatigas admisibles en plantas de proceso.	52
Tabla 2.5 Composición química.	53
Tabla 2.6 Propiedades mecánicas.	55
Tabla 2.7 Actividades generales.	58
Tabla 2.8 Nomenclatura de las posiciones.	64
Tabla 3.1 Censo de Unidades de Control.	72
Tabla 3.2 Tabla de Material	73
Tabla 3.3 Circuitos seleccionados.	74
Tabla 3.4 Unidades de control del CIRCUITO 01. CARGA	77
Tabla 3.5 Características y propiedades de la UC-FCCI-101	79
Tabla 3.6 Comparativo de inspecciones de UC-FCCI-101	80
Tabla 3.7 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 01. CARGA, en correspondencia a sus unidades de control.	82
Tabla 3.8 Unidades de Control del CIRCUITO 09. ACEITE CICLICO LIGERO.	84
Tabla 3.9 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO, en correspondencia a sus unidades de control.	85
Tabla 3.10 Unidades de Control del CIRCUITO 15. NAFTA.	87
Tabla 3.11 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 15. NAFTA, en correspondencia a sus unidades de control.	88
Tabla 3.12 Unidades de control del CIRCUITO 31. PROPILENO.	90
Tabla 3.13 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 31. PROPILENO, en correspondencia a sus unidades de control.	91
Tabla 3.14 Unidades de control del CIRCUITO 35. LPG LAVADO.	93
Tabla 3.15 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO, en correspondencia a sus unidades de control.	94
Tabla 3.16 Unidades de control del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.	96
Tabla 3.17 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA, en correspondencia a sus unidades de control.	97
Tabla 3.18 Unidades de control del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.	100

Tabla 3.19 Resumen de las posiciones del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO, en correspondencia a sus unidades de control.....	101
Tabla 4.1 Unidades de control en Excel.	103
Tabla 4.2 Promedio de la UC-FFCI-101.	104
Tabla 4.3 Confrontación del promedio con la dispersión de los valores del CIRCUITO 01. CARGA.....	106
Tabla 4.4 Intervalos de los elementos con velocidad de desgaste de la UC-102.....	107
Tabla 4.5 UC-FFCI-101 diámetros.....	108
Tabla 4.6 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 01. CARGA.	110
Tabla 4.7 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 01. CARGA.	112
Tabla 4.8 Información de los intervalos seleccionados para modelado del circuito 01. CARGA.....	114
Tabla 4.9 Posiciones de las unidades de control, acorde al ordenamiento del CIRCUITO 01. CARGA.....	115
Tabla 4.10 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 01. CARGA.....	116
Tabla 4.11 Dprom's y posiciones calculadas de la primera intersección del CIRCUITO 01. CARGA.....	120
Tabla 4.12 Valores calculados de T y P de la primera intersección del circuito 01. CARGA.	123
Tabla 4.13 Condiciones de Operación encontradas en el CIRCUITO 01. CARGA.	129
Tabla 4.14 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.....	132
Tabla 4.15 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.....	133
Tabla 4.16 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.....	135
Tabla 4.17 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.....	136

Tabla 4.18 Condición de Operación encontrada en el CIRCUITO 09. ACEITE CÍCLICO LIGERO.	138
Tabla 4.19 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 15. NAFTA.	140
Tabla 4.20 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 15. NAFTA.	141
Tabla 4.21 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 15. NAFTA.	143
Tabla 4.22 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 15. NAFTA.	144
Tabla 4.23 Condición de Operación encontrada en el CIRCUITO 15. NAFTA.	148
Tabla 4.24 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 31. PROPILENO.	149
Tabla 4.25 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 31. PROPILENO.	150
Tabla 4.26 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 31. PROPILENO.	152
Tabla 4.27 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 31. PROPILENO.	153
Tabla 4.28 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.	156
Tabla 4.29 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.	157
Tabla 4.30 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.	158
Tabla 4.31 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.	159
Tabla 4.32 Condición de Operación encontrada en el CIRCUITO 35. GAS LP LAVADO.	161
Tabla 4.33 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.	162

Tabla 4.34 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.	164
Tabla 4.35 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.	166
Tabla 4.36 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 42. AGUA AMARGA.	166
Tabla 4.37 Condición de Operación encontrada en el CIRCUITO 42. AGUA AMARGA. .	170
Tabla 4.38 Diámetros en función de las características de las posiciones del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.	171
Tabla 4.39 Resumen de las propiedades obtenidas para el CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.	172
Tabla 4.40 Información de los intervalos seleccionados para modelado del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.	174
Tabla 4.41 Valores de Dprom en función del ordenamiento de T y P del CIRCUITO 44. GAS ÁCIDO.	175
Tabla 4.42 Porcentajes de las 4 condiciones de posiciones que conforman los circuitos estudiados.	179
Tabla 4.43 Promedios de velocidad de desgaste para cada circuito del estudio.	180
Tabla 5.1 Resultados que genera SIMECELE para los niveles de tubería y críticos.	189

9. Índice de imágenes

Imagen 2.1 Imagen de la petrolera “El águila” en México.	12
Imagen 2.2 Corrosión por corrientes parasitas.	33
Imagen 2.3 Corrosión por tensión.	34
Imagen 2.4 Comportamiento elástico.	35
Imagen 2.5 Corrosión intergranular.	35
Imagen 2.6 Valores orientativos de la viscosidad cinemática de petróleos en función de la temperatura (densidad referida a 15°C).	39
Imagen 2.7 Relación de costo en tubería metálica fabricada en taller.	47
Imagen 2.8 Proceso con SIMECELE.	57
Imagen 2.9 Niveles de líneas.	65

Imagen 2.10 Niveles para tees verticales y horizontales.	66
Imagen 2.11 Niveles para tees, orientación: oriente-poniente, poniente-oriente.	66
Imagen 2.12 Niveles para tees, orientación: norte-sur, sur-norte.	67
Imagen 2.13 Nivel para codo, orientación: oriente-poniente, arriba-abajo.....	67
Imagen 2.14 Nivel para codo, orientación: norte-sur, arriba-abajo.	68
Imagen 2.15 Nivel para codo, orientación: norte-sur, oriente-poniente.	68
Imagen 2.16 Niveles para codos reforzados.....	69
Imagen 2.17 Ejemplo de niveles de medición de tuberías en un diagrama de inspección técnica.	70
Imagen 3.1 Calibraciones de la Unidad de control para exportar a Excel.	75
Imagen 3.2 Características de la unidad de control.....	75

10. Índice de Figuras

Figura 2.1 Efectos de la corrosión sobre el ambiente.....	27
Figura 2.2 Influencia del espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión.....	29
Figura 2.3 Formas de corrosión que afectan a las tuberías de proceso.	31

11. Trabajos citados

1. **Cano, Fabio Barbosa.** *Exploración y reservas de hidrocarburos en México.* México,DF : Porrúa, 2000. pág. 5.
2. **Benítez, Josué Salgado.** *Higiene y Seguridad Industrial.* México, DF : s.n., 2002.
3. **Mora, Beatriz Irais Arias.** *Implementación del Sistema de Medición y Control de Espesores en Líneas y Equipos (SIMECELE), en un proceso de Hidrodesulfuración de Combustible.* México,DF : s.n., 2014.
4. *NORMA Oficial Mexicana NOM-028-STPS-2004, Organización del trabajo-Seguridad en los procesos de sustancias químicas.* 2004.

5. **Rase, Howard F.** *Diseño de Tuberías para Plantas de Proceso.* Madrid, España : Blume, 1973.
6. **Herning, Fritz.** *Transporte de Fluidos por Tuberías.* Barcelona, España : Labor, S.A., 1975.
7. **Barderas, Antonio Valiente.** *Problemas de Flujo de Fluidos.* México, D.F. : Limusa, S.A de C.V., 2002.
8. **INDUSTRIAL, PEMEX-REFINACIÓN SUBDIRECCIÓN DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD.** *GUÍA PARA EL REGISTRO, ANÁLISIS Y PROGRAMACIÓN DE LA MEDICIÓN PREVENTIVA DE ESPESORES.* 2010.

12. Bibliografía

- Henao Robledo Fernando, *Riesgos Fisicos I, Ruido, Vibraciones y Presiones Anormales,* Ediciones Ltda, 1ra Edición, 2007
- Janania Abrahan Camilo, *Manual de Seguridad e Higiene Industrial,* Limusa, 2da Edición, 1993
- Fernández Mancera Mario, Mancera Ruíz María Teresa, *Seguridad e higiene industrial, Gestión de Riesgos,* Alfaomega, 1ra Edición, 2012
- Ramírez Cavassa César, *Seguridad Industrial,* Limusa, 2da Edición, 1991.
- P.A. Carson, C.J. Mumford, *The Safe Handling of Chemical in Industry,* Longman scientific and technical, First Edition, 1988
- L. Streeter Victor, *Mecánica de los Fluidos,* Mc Graw-Hill, 2da Edición, 1963
- B. Franzini Joseph, *Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería,* Mc Graw-Hill, 2da Edición, 1999
- Avila Javier, Genescá Joan, *MÁS Allá de la Herrumbre II, La Lucha Contra la Corrosión,* Fondo de cultura económica, 1989