



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE SISTEMAS DE  
SELLADO MECÁNICO EN LA INDUSTRIA QUIMICA  
Y DEL PETRÓLEO

MEMORIA DE DESEMPEÑO  
PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
QUIMICO  
PRESENTA

MARIO ALBERTO JULIAN CRUCES DE GYVES

ASESOR: Q. JESUS FERNÁNDEZ MADRIGAL

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2005

M. 340473



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: M. A. JULIAN

CRUCES DE GYVES

FECHA: 26 IX 2004

FIRMA: *af*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE



ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos:

La memoria de desempeño Profesional "Selección y aplicación  
de sistemas de sellado mecánico en la industria Química y del  
petróleo".

se presenta el pasante: Mario Alberto Julian Cruces de Gyves  
número de cuenta: 7308761-6 para obtener el título de:  
Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de Septiembre de 2004

PRESIDENTE Q. Jesús Fernández Madrigal

VOCAL Q. Juan José Mendoza Flores

SECRETARIO Q. Celestino Silva Escalona

PRIMER SUPLENTE IQ. Ariel Bautista Salgado

SEGUNDO SUPLENTE Q. Sonia Rincón Arce

*En memoria de mi madre:*

*Paulina de Gyves*

*Con todo mi cariño para mi segunda madre  
mi tía:*

*Luzita de Gyves*

*Para las que mas que primas son hermanas:*

*Nora y Ju*

*Para mis hijos:*

*Andrea Lilith y  
Luis Orlando*

*Un agradecimiento muy especial a mi amigo  
Joaquín Mendoza cuya ayuda fue invaluable en la  
realización de este trabajo*

*A mis queridos amigos Carlos Cals y Alex Ruiz.*

## INDICE

1.- PROLOGO	2
2.- OBJETIVOS GENERALES	3
3.- INTRODUCCIÓN	4
4.- GENERALIDADES	7
4.1) BOMBAS	7
4.2) EMPAQUETADURA	10
4.3) SELLOS MECÁNICOS	11
4.4) DISEÑOS BÁSICOS	14
4.5) ARREGLOS DE SISTEMAS DE SELLADO	21
4.6) MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	24
4.7) AMBIENTACIÓN	31
4.8) SELECCIÓN Y APLICACIÓN	37
4.9) NORMATIVIDAD	41
5.- DESEMPEÑO PROFESIONAL	47
5.1) ASESORÍA TÉCNICA	47
5.2) ANÁLISIS DE FALLAS	52
5.3) RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS	64
5.4) CAPACITACIÓN	73
5.5) COMERCIALIZACIÓN Y COSTO	74
6.- PROBLEMÁTICA Y DISCUSIÓN	77
7.- CONCLUSIONES	79
8.- BIBLIOGRAFÍA	80

## 1) PROLOGO

La modalidad de memoria de desempeño profesional es una alternativa de titulación que brinda la Universidad Nacional Autónoma de México. Nos da la oportunidad de plasmar los conocimientos y experiencias adquiridos en el desempeño profesional, así como de transmitirlos a las generaciones ulteriores.

Al presentar en este trabajo mi desempeño profesional describo la asesoría técnica que se ha dado a las diferentes industrias incluyendo a PEMEX en la selección y aplicación de sistemas de sellado, así como en el análisis de fallas para la resolución de problemas que se presentan mucho más a menudo de lo que se pudiera pensar en el sistema bomba-sello mecánico.

Asimismo se menciona la capacitación dada a los Ingenieros encargados del mantenimiento mecánico en las diferentes empresas en donde se han comercializado los sistemas de sellado, así como la aplicación de las normatividades en los diferentes procesos que se manejan en la industria.

La parte de discusión y conclusión se enfoca principalmente en la importancia clave que tienen los sistemas de sellado en el control de las emisiones contaminantes y lo relevante que es el servicio postventa a los ingenieros de mantenimiento mecánico, ya que establece una relación profesional que prácticamente no termina nunca. La conclusión de esto es que los sellos mecánicos son un campo relativamente inexplorado y a su vez son un factor determinante en la operación de una planta química o de petróleo.

## 2) OBJETIVOS GENERALES

- 1) Describir la importancia de los elementos y accesorios que componen e intervienen en los sistemas de sellado.
- 2) Mencionar la Tribología y su relevancia como una ciencia relativamente joven en el proceso de selección aplicación y análisis de fallas de los sellos mecánicos.
- 3) Presentar en base a todo lo anterior lo que significa la asesoría técnica y el servicio a los Ingenieros de mantenimiento mecánico.
- 4) Elaborar un informe de trabajo en el que se describe la correcta selección aplicación y análisis de fallas de los sellos mecánicos.
- 5) Estimular líneas de investigación (tesis) en el área del sellado mecánico con especial interés en la relación e influencia reciproca entre las carreras de Ingeniería Química, Ingeniería mecánica y Química.



### 3) INTRODUCCIÓN

Si se le pregunta a un Ingeniero de Mantenimiento mecánico de cualquier planta Química, Petroquímica o Refinería acerca de cual parte de sus equipos falla con más frecuencia, la respuesta será en la mayoría de los casos los sellos mecánicos. Sin embargo la mayoría de las fallas no son culpa del sello, pero nos dan líneas para encontrar ya sea una selección impropia del sello, una falla en el equipo de bombeo o una instalación incorrecta. Casi todos los problemas de reparación resultan de un pobre entendimiento de cómo los diversos tipos de sellos operan y de una instalación deficiente, estas áreas serán discutidas.

#### DEFINICIÓN

Un Sello mecánico es un mecanismo diseñado para limitar o impedir el paso de fluido en una bomba hacia el exterior y que consta de una unidad rotatoria y de una parte estacionaria que tienen caras que están en contacto y en movimiento relativo una con la otra.

#### HISTORIA DEL SELLO MECÁNICO

La verdadera historia del sello mecánico nunca ha sido documentada, y lo más probable es que nunca pueda serlo, pero algunos hechos nos pueden ofrecer una indicación.

Con anterioridad a la revolución Industrial las fuentes de 'potencia' que propulsaban a la industria tal como era entonces eran:

- Humana - Directa (rotativa o alternativa)  
Molinos de rueda
- Animal - Rotación directa  
Molinos de rueda
- Agua - Ruedas de agua
- Viento - Molinos de viento

La maquinaria que propulsó la Revolución Industrial fue el motor de vapor y el movimiento básico o movimiento alternativo. Estos no cedieron su lugar en ningún grado hasta la aparición del motor eléctrico, cuando gradualmente se hizo cargo el movimiento rotativo.

Cuando se requería, el sellado de maquinaria y mecanismos alternativos, se efectuaba y aun en la actualidad se lleva a cabo por medio de empaquetaduras de compresión o mejoras efectuadas sobre lo mismo como los anillos de Chevron. Los materiales utilizados para este propósito eran materiales naturales, cuero, algodón, cáñamo, etc.

Los equipos anticuados que persisten todavía se sellan de la misma forma, aunque ahora los materiales sintéticos han sustituido a los naturales.

La forma más temprana de transporte de fluidos en cantidad fue por fuerza de gravedad y muchas de las plantas construidas después de la revolución industrial todavía se constrúan sobre declives naturales que proporcionarían esto y era aun mejor si existía una vía fluvial al final de este declive como medio de transporte.

Sin embargo, gradualmente, por varias razones, entre otras la falta de localizaciones naturales, la bomba se hizo prominente como medio para el transporte de fluidos, primero con movimiento alternativo y luego con movimiento rotativo.

La forma original de empaquetar la bomba rotativa fue también la empaquetadura de compresión, que como ya lo mencione todavía está presente entre nosotros en la actualidad.

Sin embargo, hacia la década de los años 30 los fabricantes de bombas y empaquetaduras de compresión comenzaron a experimentar con la idea de crear un sello de fluido mediante un disco rotativo que se moviese contra otro estacionario, siendo así como surge finalmente el sello mecánico.

Al principio los fabricantes de bombas creyeron que habían desarrollado un sello mecánico práctico y ciertamente Pulsometer Pumps de Reading, desarrolló y utilizó su primer sello con anterioridad a la guerra de 1939-45. Aunque de apariencia visual ruda el diseño del primer sello mecánico se reconoce inmediatamente en su más sofisticado sucesor de hoy. El principio básico y las partes componentes son funcionalmente similares. Los materiales utilizados entonces eran bronce o latón.

Las décadas de los años 40 y 50 vieron grandes avances conforme la industria petrolera, química y petroquímica y las demandas de maquinaria aumentaron, con lo que el sellado adquirió una consideración mayor. De forma que el sello mecánico se fue desarrollando para mantenerse al ritmo del mercado, pero este desarrollo es más la historia de los materiales utilizados en la construcción que la historia de su diseño. Es Dupont quien desarrolla dos modelos de sellos mecánicos (el tipo 9 y el tipo RO) y luego vende los diseños a Durametallic y John Crane que en ese tiempo fabricaban, los cuales se convertirían en dos de los más grandes fabricantes de sellos mecánicos a nivel mundial.

De forma que llegamos al sello mecánico de hoy, verdaderamente una pieza de ingeniería extremadamente importante y sofisticada, con una función cada vez más esencial debido a las consideraciones medioambientales.

## 4) GENERALIDADES

En este apartado se describen la importancia de los elementos y accesorios que componen e intervienen en los sistemas de sellado

### 4.1) BOMBAS

Una bomba es una máquina que toma la energía de un motor móvil primario (motor eléctrico, motor de combustión, turbina, etc.) y la convierte en energía contenida dentro del medio que se está bombeando. Esta energía puede ser:

- a. Una energía de velocidad
- b. Una energía de presión
- c. Una combinación de (a) y (b).

En una bomba centrífuga tipo over-hung el fluido entra a la succión de la bomba en el centro del impulsor. Los álabes del impulsor sacan el fluido del área del impulsor a través de la carcasa. El producto bajo presión deja así la bomba a través de la descarga de la bomba.

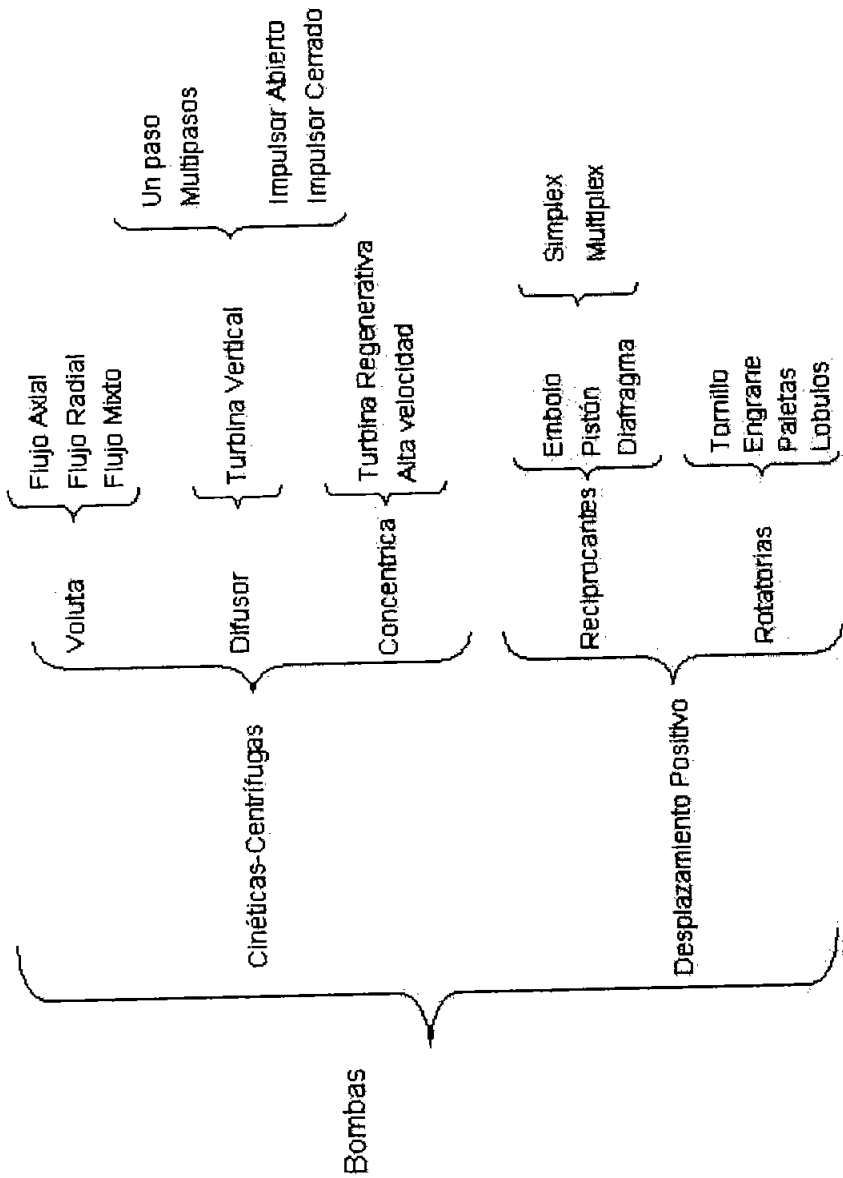
La presión de descarga forzara que algo del producto bombeado pase por la parte de atrás del impulsor y entre a la caja estopero o cámara del sello. Se puede regular la presión en esta zona añadiendo álabes en la parte de atrás del impulsor o practicándole agujeros de balance, asimismo se reduce el riesgo de excesiva carga axial en los baleros.

Existen mecanismos de sellado que limitan la fuga del fluido en el punto donde la flecha deja el alojamiento de la bomba. Todos los diseños de bombas y variaciones de ellos tienen un dispositivo de sellado de eje, los más comunes son:

- Sello mecánico
- Empaquetadura de compresión

Antes de especificar cualquiera de los dos, cada aplicación debe ser estudiada para determinar presión, temperatura, corrosividad, viscosidad, composición química, instalación y requerimientos de mantenimiento.

**Tabla 1. CLASIFICACIÓN DE BOMBAS**



Existe un número de diseños básicos de bombas, pero también hay muchas variaciones de estos diseños lo que resulta en una gran clasificación, que en general es innecesaria.

Las definiciones más aceptadas sobre el tipo de bomba a tratar, es por su movimiento y básicamente son dos: Bombas de desplazamiento positivo y bombas Centrífugas

Si extendemos estos tipos de movimiento a sus tipos individuales por diseño, encontraremos la clasificación que se muestra en la tabla 1

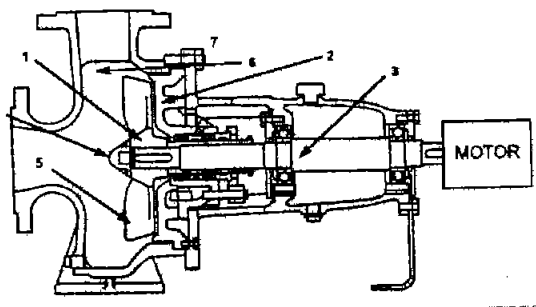
En la actualidad, las bombas reciprocantes casi no se usan. No obstante, para ciertas tareas específicas este tipo es todavía el diseño más eficaz. El sellado del eje normalmente se efectúa por empaquetaduras de compresión o diseños sofisticados de éstas, como son los anillos de Chevron, pero las bombas rotatorias y las centrífugas son las de más uso, sin embargo estas últimas son más versátiles y por lo tanto más comunes.

#### 4.1.1) BOMBAS CENTRÍFUGAS

Una bomba centrífuga horizontal sencilla, está formada por un elemento rotativo, llamado impulsor (1) contenido en una voluta (2). El impulsor está montado sobre el extremo de un eje de rotación (3). El líquido entra en el centro u 'ojo' (4) del impulsor y es rotado por medio de las aletas del impulsor (5).

Entonces, la fuerza centrífuga arroja el líquido desde el centro del impulsor a su periferia con una considerable velocidad y presión. Dentro de la voluta hay un pasillo helicoidal (6)

de cada vez más áreas transversales, éstas recogen el líquido y convierten parte



de su velocidad en mayor energía de presión.

El pasillo helicoidal termina en la brida del lado de la descarga (7). Este diagrama explica gráficamente lo referido.

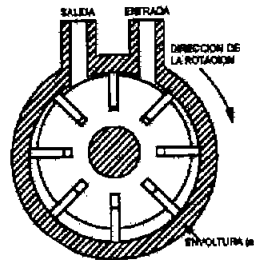
#### 4.1.2) BOMBAS ROTATIVAS

Si se compara con la bomba centrífuga, el principio de la bomba rotativa es simple.

Una bomba rotativa está compuesta de engranes, lóbulos, aletas, tornillos sencillos, dobles, triples, etc. Funcionando en una envoltura muy ajustada, es una máquina de desplazamiento positivo.

El líquido, en vez de girar según entra en la envoltura, es atrapado por rotación en su elemento de rotación, como en el caso de la bomba centrífuga, lo fuerza alrededor del interior de la envoltura y lo expulsa a través de la descarga.

Ejemplo: bomba de paletas **Principio de Funcionamiento:** El eje gira y las paletas se impulsan contra la superficie interior de la envoltura (a). Esto crea un vacío parcial en la entrada de la bomba, que atrae el líquido a la cámara de bombeo y llena los huecos entre las aletas individuales. Según el líquido se transporta alrededor de las venas, se comprime y presuriza y se expulsa a través del orificio de salida de la bomba.



#### 4.2) EMPAQUETADURA

El más antiguo de los dos métodos de sellado, se conoce como empaquetadura de compresión y consiste de un material resiliente enrollado alrededor de la flecha para crear un sellado a lo largo del eje. Al apretar la brida se comprime la empaquetadura, reduciendo el claro entre la flecha y el empaque. Cuando la flecha va rotando, existe un desgaste que da lugar a un claro el cual es compensado por un ajuste de la brida.

La fricción entre la flecha y la empaquetadura genera calor, causa desgaste que resulta en un rápido deterioro de la flecha o manga. Si se permite gotear una

mínima cantidad de fluido desde la caja estopeño, se lubrican la flecha y el empaque, prolongando así la vida de la flecha o manga.

Los constantes paros para ajustar el empaque y reempacar la bomba, incrementan el tiempo de mantenimiento. Asimismo la frecuencia de paros es mayor en bombas con empaquetadura debido a problemas de corrosión, fallas de baleros y reemplazos de flechas o mangas.

Las bombas mal empacadas consumen más energía que las bombas con sello mecánico. De hecho una bomba con empaque puede usar de dos a doce por ciento más de su potencia para arrastrar la empaquetadura, en comparación con la cantidad mínima de potencia usada con los sellos mecánicos.

En adición al costo asociado con los constantes ajustes del empaque, mantenimiento, pérdida de producto y consumo adicional de energía, las diversas agencias de protección al ambiente han emitido regulaciones que limitan las fugas de los fluidos comúnmente bombeados a rangos de partes por millón. Como la empaquetadura no cumple con esas regulaciones, los sellos mecánicos son la alternativa adecuada de protección al ambiente.

### **4.3) SELLOS MECANICOS**

Existen dos tipos básicos de sellado: estático y dinámico.

Los sellos estáticos se emplean cuando no ocurre movimiento en la unión que se va a sellar. Juntas y o-rings son típicos sellos estáticos.

Los sellos dinámicos se emplean donde las superficies tienen movimiento relativo una con otra. Los sellos dinámicos se usan por ejemplo donde una flecha recíprocante o rotativa transmite potencia o movimiento a través de la pared de un tanque. Ejemplo: mezcladores, agitadores, compresores, molinos bombas, etc.

El sello mecánico fue desarrollado para superar las desventajas de la empaquetadura. Las fugas se pueden reducir a un nivel que cumpla con los requerimientos ambientales; también se reducen los costos de mantenimiento.

Un diseño simple (sin importar el fabricante) posee dos caras de sellado con superficies planas. Una de las caras rota con la flecha y roza con la segunda cara, la cual está fija en un alojamiento. Este alojamiento puede ser ya sea una parte integral de la bomba o un componente llamado brida, fabricado por el fabricante del sello o el



de la bomba. El propósito de la brida es retener la cara estacionaria del sello y cerrar la cámara del sello.

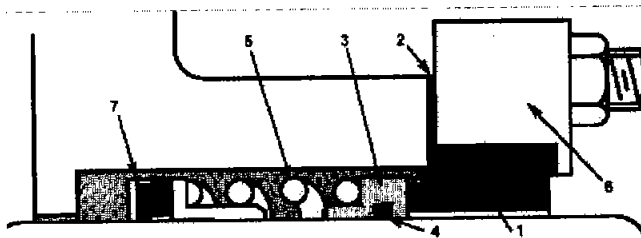


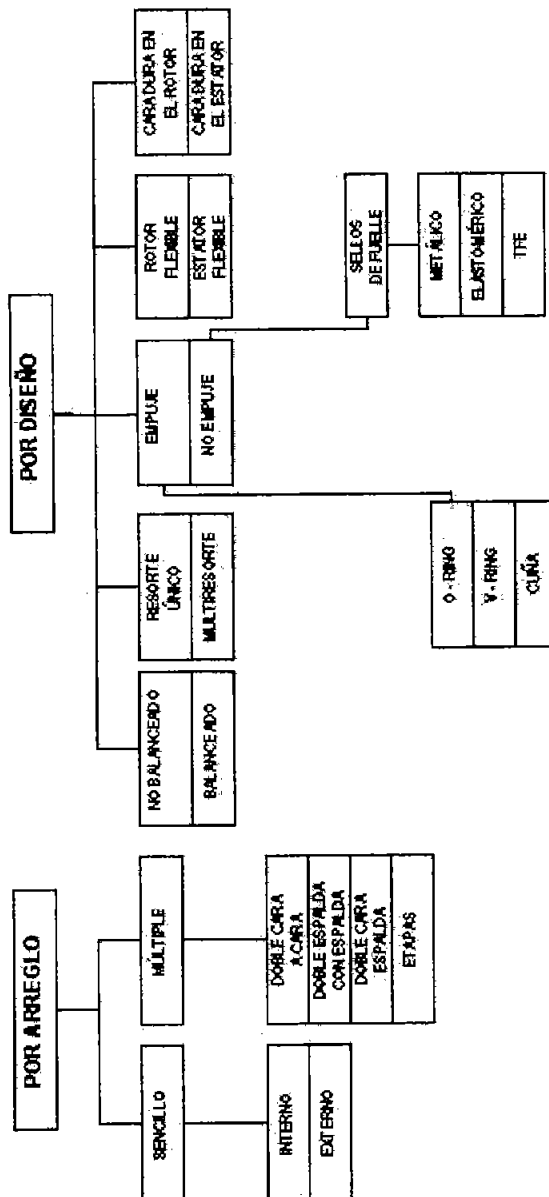
Figura 3 Diagrama de sello mecánico. 1.-Componente estacionario, comúnmente llamado "asiento" o "inserto". 2.-Elemento de sellado del componente estacionario. 3.-Cara rotatoria. 4.-Elemento de sellado del componente rotatorio. 5.-Resorte. 6.-Brida. 7. Collar de compresión

#### 4.3.1) Componentes

Los sellos mecánicos están contruidos en tres conjuntos básicos de partes independientemente del tamaño, materiales de construcción, complejidad o fabricante.

- a) Cara rotativa – es una cara de sellado plana, lapeada y sujeta a la flecha.
- b) Mecanismo de cierre – consiste usualmente de: de resorte único, de resorte múltiple o fuelle metálico o de teflón. Este componente nos da la carga axial requerida para conservar las caras del sello en contacto una con otra, especialmente durante periodos de paro o de ausencia de presión hidráulica. También permite al sello soportar algunos desalineamientos y movimientos de la flecha.
- c) Cara estacionaria – otra cara de sellado plana, lapeada y retenida en una posición fija en la bomba o el alojamiento maquinado. Puede ser de dos tipos flotante o clamped.
- d) Empaques secundarios – empaques secundarios estáticos – son de dos clases: sellos entre la cara estacionaria y el alojamiento y sellos entre la brida y el cuerpo de la bomba – empaques de cara rotatoria – nos dan el sellado entre la cara rotativa y la flecha o manga.

**Tabla 2. CLASIFICACIÓN DE SELLOS MECÁNICOS**



Existen diversas formas de empaques secundarios que se usan en las caras rotativas. Los más comunes son: o-rings, cuñas de teflón, anillos-V y copa-U.

#### **4.3.2) Puntos de sellado**

Un ensamble de sello mecánico tiene cinco puntos de sellado:

4.3.2.1) El punto principal de sellado es entre la cara rotativa y la cara estacionaria.

4.3.2.2) Otro punto de sellado ocurre alrededor de la cara estacionaria por medio de un O-ring, junta plana o anillos de grafol.

4.3.2.3) Otro punto de sellado ocurre entre la unidad rotativa y la flecha por medio de un o-ring, V-ring, cuña, copa-U, fuelle de elastómero o anillo de grafol.

4.3.2.4) Otra área de sellado esta en el punto de contacto entre la brida y el cuerpo de la bomba, el cual es sellado por medio de un o-ring, junta plana o junta flexitallic.

#### **4.3.3) Funcionamiento del sello.**

Las caras de sellado están en contacto debido a la fuerza axial del mecanismo de cierre (resorte único, resortes múltiples, fuelle) y por la presión del producto en la cámara del sello.

### **4.4) DISEÑO BASICO DE UN SELLO MECANICO**

Una clasificación de los sellos mecánicos se define de manera primaria de dos maneras: sellos de empuje y sellos de no empuje. Los sellos de empuje incluyen los de resorte único y resortes múltiples mientras que los sellos de no-empuje incluyen los de fuelle elastomérico, fuelle de teflón y fuelle metálico. En la tabla 2 mostramos la clasificación de los sellos mecánicos

#### **4.4.1) Sellos de empuje**

Los sellos de empuje se llaman así porque utilizan un empaque secundario que debe ser empujado hacia atrás y hacia delante de manera axial en cada revolución de la flecha para mantener las caras de sellado en contacto y compensar el desalineamiento. Este sello secundario "dinámico" usualmente se desliza sobre la flecha o manga; sin embargo en unos pocos diseños, el empaque se desliza sobre un componente integral del sello. Existe gran variedad de tipos y estilos, de los cuales algunos serán mencionados brevemente en el desarrollo del trabajo.

## Ventajas

El sello de empuje es el más común en la industria a causa de sus bajos costos de manufactura y su adaptabilidad para configuraciones especiales de diseño. Estos sellos son relativamente baratos ya que no tienen complicados requerimientos de maquinado ni tolerancias muy estrechas. Se utilizan en una amplia variedad de equipos. Los sellos secundarios fabricados de elastómeros o de teflón se pueden utilizar en rangos moderados de temperatura.

## Desventajas

Los sellos de empuje tienen algunas desventajas de diseño que pueden llevar a una falla temprana en el sello. Las fallas más comunes son el atascamiento de los resortes y de los empaques secundarios. El movimiento constante hacia adelante y hacia atrás de los empaques secundarios dinámicos permite que partículas abrasivas del fluido queden en el elastómero. Así en vez de tener superficies lisas en contacto una con otra, el empaque secundario actúa ahora como una lija o una rueda de molino y desgasta la flecha o la manga. Esta abrasión se conoce como "desgaste de la flecha". La superficie rugosa que deja la abrasión estorba el movimiento del sello secundario y permite que las caras del sello abran de lo que resulta una falla prematura del sello.

El mecanismo de cierre de un sello de empuje es típicamente por resortes, ya sea con un diseño de resorte único o con un arreglo de resortes múltiples.

### 4.4.2) Sellos de no empuje

Los sellos de no empuje o sellos de fuelle como se les conoce normalmente comparten un principio de diseño común, el empaque secundario de la flecha en todos estos tipos de sellos es estático, o de no movimiento, y con esto no causa desgaste de la flecha o manga ni permite que el sello se atasque. Estos sellos se clasifican en dos tipos, de alta y baja temperatura:

- Sellado de baja temperatura. Este tipo de diseño es para aplicaciones en donde el producto bombeado no rebasa los 200° C. Esto permite a los fabricantes usar empaques secundarios elastoméricos o de teflón. Las dos clases de sellos que se utilizan principalmente son los sellos de fuelle elastomérico y sellos de fuelle de teflón, aunque también se utilizan los sellos de fuelle metálico.

- Sellado de alta temperatura. O sellos de fuelle metálico soldado, estos consisten en una serie de laminas soldadas en los diámetros externo e interno. Dos láminas se sueldan en su diámetro interno para crear una convolución. Las convoluciones se unen en sus diámetros externos para crear un núcleo de fuelle. El espesor de las láminas y el número de convoluciones varían de acuerdo al fabricante. En estos sellos se pueden eliminar los sellos secundarios de elastómeros para acomodar empaques de grafoil. Esto permite que el sello soporte temperaturas del orden de 450° C. Cuando se utilizan diseños especiales con fuelles dobles pueden soportar presiones muy elevadas (69 bar).

#### **4.4.3) Otras formas de clasificación**

A continuación se definen cuatro formas secundarias de los sellos mecánicos que se pueden presentar en cualquiera de las dos formas primarias de clasificación: de empuje y de no empuje

##### **4.4.3.1) Rotativo o estacionario**

Como ya sabemos, un sello mecánico consta de dos componentes básicos, la unidad rotatoria y el asiento estacionario, como se muestra a continuación.

En la figura 3, la unidad de compresión está situada sobre el eje, por lo tanto gira con el este y se le conoce como sello rotativo (el elemento rotativo contiene los resortes). Esta es la disposición más común de las dos disposiciones.

Similarmenete si las posiciones de los dos componentes se invierten y la unidad de compresión (que contiene los resortes) se mantiene estacionaria fija en la brida, se denomina sello estacionario

Pasamos de una situación de unidad rotativa a otra de unidad estacionaria cuando las velocidades de rotación se aproximan o están por encima de los 25m/seg. (5000 f.p.m.). A estas velocidades, las fuerzas dinámicas superan las limitaciones de la unidad de rotación. Un sello estacionario evita el movimiento excesivo del empaque secundario, mantiene de forma satisfactoria el recorrido del componente primario de sellado y maneja los altos pares de torsión implicados. A estas velocidades, si la unidad estuviera girando, su peso, mayor que el del inserto acentuaría cualquier movimiento del eje o distorsión.

#### 4.4.3.2) Balanceados o no balanceados

Los sellos mecánicos se conocen también como balanceados o no balanceados. Más correctamente, deberían ser hidráulicamente balanceados o hidráulicamente no balanceados.

Consideremos la figura 4 que representa la forma más sencilla de una unidad de sello mecánico rotatorio con asiento estacionario.



Fig. 4 Sello no balanceado

La presión en la caja del sello (más la presión del resorte) tiende a empujar a las caras y al asiento de la unidad hacia sí. Sin embargo, hay una película de fluido entre las caras, sujeta a un gradiente de presión hidráulica entre la presión de la caja y la presión atmosférica. Se supone que el gradiente de presión es lineal.

Según la presión en la caja del sello aumenta, la presión que actúa sobre el área de sellado de las caras aumenta, la cuña se hace menos eficaz hasta que finalmente la película de fluido de la cuña se rompe y no hay lubricación. Las caras se destruyen entre sí y se dice que el sello primario ha fallado.

La presión máxima que un sello sin balancear puede soportar depende del diámetro del eje, la velocidad, los materiales de las caras y la naturaleza del fluido que se está sellando, pero siempre es inferior a la presión de un sello balanceado.

Se dice que un sello mecánico está balanceado, cuando las fuerzas que actúan para cerrar sus caras de sellado están en equilibrio con respecto a las fuerzas que actúan para abrirlas, y por tanto sus caras están operando bajo una fuerza óptima de contacto. No debe olvidarse que el sello mecánico está sometido a la acción simultánea de fuerzas mecánicas e hidráulicas.

A continuación se considera un sello balanceado. La presión en la caja del sello permanece igual y la utilizaremos para reducir la presión sobre las caras.

En la figura 5 hemos puesto un eje con un escalón de reducción del diámetro. Las condiciones hidráulicas son las mismas que para el sello no balanceado.

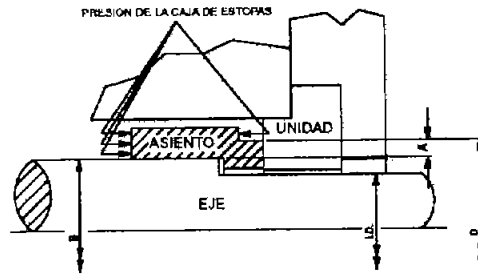


Fig. 5 Balance de un sello mecánico

La diferencia es que la unidad rotativa está sujeta a una presión igual más allá del diámetro 'D' que permite el balance hidráulico en esta área. La presión en la caja del sello ahora actúa sobre el área 'A' del sello entre el eje y el diámetro 'D'. Puesto que el área de la cara permanece igual, la carga de la cara se reduce.

El fabricante del sello debe diseñar las caras y la relación de balance del sello para minimizar el calor generado en las caras del sello de tal manera que sea consistente con el tiempo de vida esperado y los requerimientos de emisiones contaminantes. Para poder decir que un sello es balanceado su relación de balance debe ser menor de 1.

Para sellos presurizados en su diámetro externo la relación de balance del sello esta definida por la ecuación:

$$\frac{(OD^2 - BD^2)}{(OD^2 - ID^2)} < 1 \text{ el sello es balanceado}$$

Para sellos presurizados en su diámetro interno la relación de balance del sello esta definida por la ecuación:

$$\frac{(BD^2 - ID^2)}{(OD^2 - ID^2)} \geq 1 \text{ el sello no es balanceado}$$

Donde en ambas ecuaciones:

OD Es el diámetro externo de la cara rotativa (D en la figura 5).

ID Es el diámetro interno de la cara rotativa (ID en la figura 5).

BD es el diámetro de balance del sello (B en la figura 5).

#### 4.4.3.3) Montado horizontal o verticalmente

Esto se relaciona con la posición de funcionamiento del sello mecánico del que la pieza de equipo rotativo forma parte, es decir, si la bomba es horizontal tiene un eje horizontal y por lo tanto el sello se describe como horizontalmente montado. De forma similar, si la bomba es vertical, el sello se describe como verticalmente montado.

En agitadores o mezcladores, las disposiciones más comunes son las verticales (eje entrada superior o inferior), y la horizontal (eje entrada lateral).

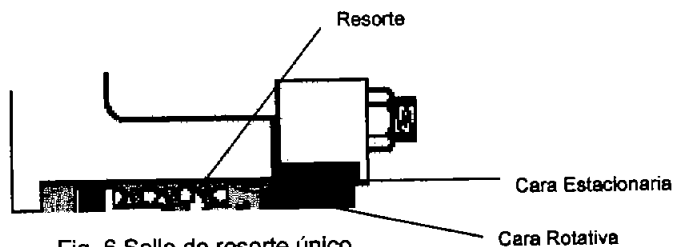
#### 4.4.3.4) Característica de diseño

Esto normalmente se relaciona con:

- Si la fuerza estacionaria del sello primario es por resorte único, multiresorte o fuelle.
- Si el empaque secundario es una 'cuña' o similar o un o-ring.
- Separación de la sección metálica del sello del producto.
- Una combinación de las tres primeras.

##### 4.4.3.4.1) Resorte único

Normalmente de bajo precio, especialmente en tamaños de sello más pequeños y (no siempre es el caso) relativamente fáciles de colocar. Sólo pueden utilizarse con presiones de bombeo bajas hasta un máximo de 80 p.s.i. y velocidades bajas de superficie de eje cuando se trata de un diseño normal sin balancear. El resorte sencillo tiene un área de baja presión de apoyo en la cara, que da como resultado un desgaste desigual de la cara. Dependiendo de su diseño, a veces sólo puede girar en una dirección.





#### 4.4.3.4.2) Resortes múltiples

Puede tolerar velocidades de eje y presiones mayores que la versión de resorte sencillo. Proporciona carga uniforme de la cara. Puede girar en ambas direcciones. Normalmente más fácil de balancear hidráulicamente. Limitaciones – límites de temperatura del elastómero. Puede resultar más caro.

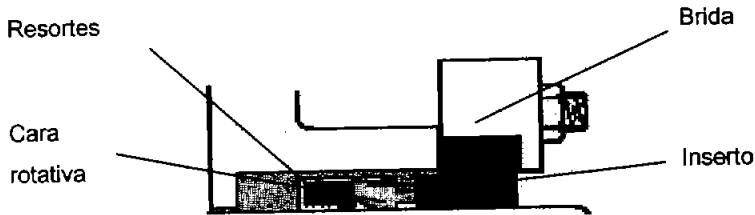


Fig. 7 Sello de resorte múltiple

#### 4.4.3.4.3) Sello no metálico

Diseñado para remover cualquier componente metálico del líquido y evitar el ataque químico. Normalmente la cara es de carbono o teflón, también es conocido como sello químico o externo. Será mencionado en el próximo apartado con más detalles.

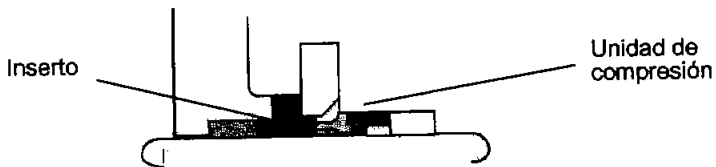


Fig. 8 Sello externo

#### 4.4.3.4.4) Sello de fuelle metálico

Es un sello de fuelle metálico. Desarrollado para la industria del petróleo e industrias relacionadas. Ya Mencionado en el apartado anterior. Puede obstruirse con facilidad y si el fuelle se rompe, puede dar como resultado una gran pérdida del producto.

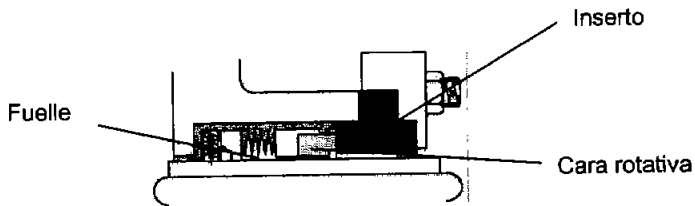


Fig. 9 Sello de fuelle metálico

## 4.5) ARREGLOS DE SISTEMAS DE SELLADO

Los sellos mecánicos se pueden clasificar por arreglo en sencillos o múltiples:

### 4.5.1) Sellos sencillos.

Estos sellos pueden ser instalados en dos arreglos; internos o externos como se ilustra en las figuras 7 y 8. Si el producto bombeado está en el diámetro externo del sello se considera sello interno y si el producto bombeado está en el diámetro interno el sello se considera externo. Este tipo de arreglo es el arreglo 1 en el API 682 2ª ed.

#### 4.5.1.1) Sello Interno.

Este sello ofrece las siguientes ventajas:

- La Presión de la cámara del sello añadida a la fuerza de cierre que da el mecanismo de arrastre ayudan a conservar las caras del sello en contacto.
- El sello interno tiene la tendencia a limpiarse a si mismo por acción centrifuga.
- El empaque secundario de la flecha en los sellos de empuje es dinámico y se desliza hacia una sección limpia de la flecha cuando se desgastan las caras de los sellos. Sin embargo si se bombea un fluido con abrasivos, al pasar entre las caras y acumularse en la parte inferior puede provocar que el empaque secundario en un sello de empuje se atasque causando que el sello falle. Esto no pasa en los sellos de fuelle metálico.

#### 4.5.1.2) Sello externo

Estos sellos solo se recomiendan cuando la cámara del sello es muy pequeña para acomodar el sello o cuando el producto bombeado es altamente corrosivo y las partes metálicas de un sello interno puedan ser atacadas. Sus ventajas son las siguientes

- Adecuado para fluidos extremadamente corrosivos ya que los resortes no están en contacto con el fluido.
- Fácil instalación en unidades donde el sello se desliza desde la caja de baleros.

#### 4.5.2) Sellos duales

Son dos sellos colocados uno tras de otro y pueden ser colocados en tres orientaciones:

**4.5.2.1) Cara-espalda:** Donde una cara de acoplamiento se coloca entre dos elementos flexibles y un elemento flexible se monta entre dos caras de acoplamiento. (Fig. 10)

**4.5.2.2) Espalda-espalda:** Un sello dual en el cual los dos elementos flexibles están colocados entre las dos caras de acoplamiento. (Fig. 11)

**4.5.2.3) Cara-cara:** Sello dual en el cual las dos caras de acoplamiento están montadas entre los elementos flexibles. (Fig. 12)

Al sello que esta en el lado del producto se la llama sello primario y al que esta en el lado atmosférico se le llama sello secundario.

El espacio entre los sellos puede estar a una presión menor que la de la cámara del sello, en este caso hablamos de un arreglo 2 (según API 682 2ª ed.) y corresponde según la vieja terminología a los sellos tandem, El espacio entre los sellos puede estar inundado con un líquido o un gas con lo que hay que instalar un sistema de alimentación del fluido, ya sea un tanque o una fuente externa, o puede estar vacío con una conexión a un drenaje o a un quemador y el sello secundario debe estar diseñado para correr en seco.

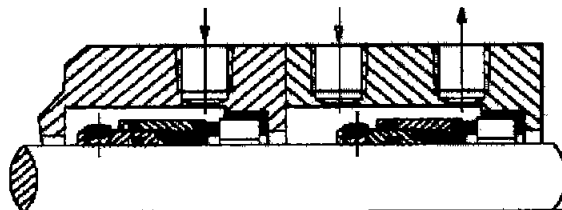


Figura 10 Configuración cara-espalda

También el espacio entre los sellos puede estar a una presión mayor que la de la cámara del sello, en este caso hablamos de un arreglo 3 (según API 682 2ª ed.) El espacio entre los sellos debe estar inundado con un líquido o un gas por lo que hay que instalar un sistema de alimentación del fluido, ya sea un tanque o una fuente externa.

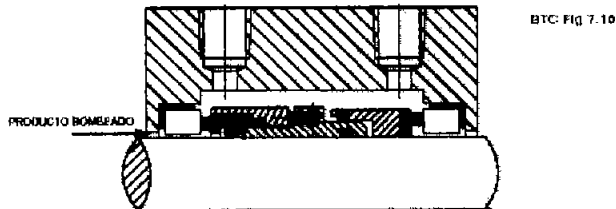


Fig. 11 Configuración Espalda-espalda

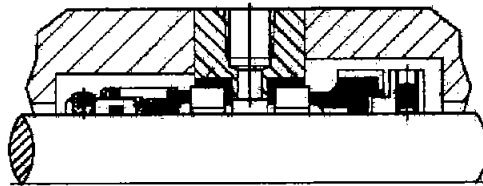


Fig. 12 configuración cara-cara

Los sellos duales se usan en

- a. Productos no lubricantes.
- b. Fluidos tóxicos.
- c. Fluidos peligrosos.
- d. Productos cancerígenos.
- e. En general cualquier fluido contaminante del ambiente.

Los sellos duales a pesar de ser más caros están cobrando más auge en la actualidad sobre todo en la industria petrolera lo que contribuye a mayor seguridad en la operación de las plantas y menor emisión de contaminantes.

Se puede debatir sobre la existencia de un cuarto arreglo de sello, el cartucho (Fig. 13) pero estrictamente hablando, ésta es una unidad auto contenida y

puede contener sellos en disposiciones sencillas y duales (incluso triples). Tiene las ventajas de que no hay que hacer mediciones ni ajustes ya que estos sellos únicamente se colocan sobre la flecha y se les da el apriete de costumbre.

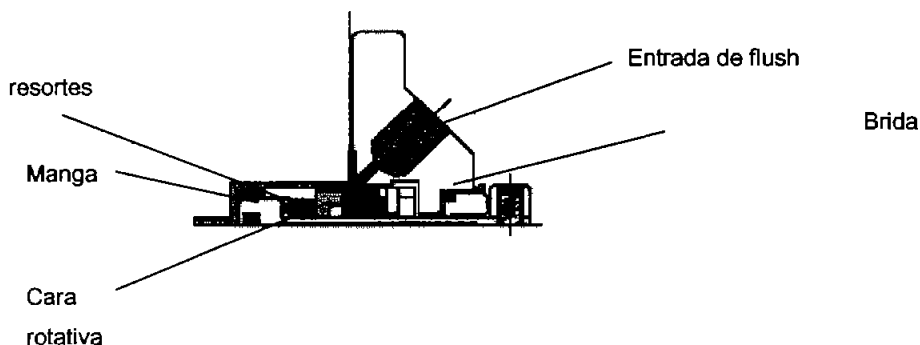


Fig. 13 Sello cartucho

#### 4.6) MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Para poder efectuar una selección correcta de sellos mecánicos es necesario tener un conocimiento de los materiales de construcción de los sellos mecánicos.

Los sellos están expuestos a un amplio rango de aplicaciones, por esto es esencial una cuidadosa selección de materiales compatibles con el fluido bombeado. Cada material es seleccionado por sus propiedades particulares. Corrosión, calor, abrasividad, viscosidad, gravedad específica y lubricidad son algunos de los principales factores a tomar en cuenta en la selección de materiales.

##### 4.6.1) Materiales de las caras

Uno de los pasos principales en la selección de sellos es escoger materiales de las caras de desgaste que funcionen bien en operación. En este capítulo describiremos los materiales de caras disponibles y sus características. Factores tales como densidad, conductividad térmica, modulo de elasticidad, dureza, rugosidad y compatibilidad química deben ser cuidadosamente considerados.

Durante la operación, caras del mismo material pueden exhibir un patrón rápido de desgaste debido a la fricción por contacto. Si se usan en aplicaciones

equivocadas, la acumulación de calor por fricción que ocurre entre dos caras del mismo material puede causar falla del sello.

Al elegir dos materiales diferentes (uno más blando que el otro) tales como Carbón-grafito vs. Carburo de Silicio, minimizamos el daño potencial de la acumulación del calor por fricción. Sin embargo en servicios abrasivos, es mejor usar dos caras duras, tales como el carburo de tungsteno vs. Carburo de silicio. La lubricación entre dos caras duras es especialmente importante para proteger al sello del calor por fricción.

Las combinaciones de los materiales de las caras deben ser seleccionadas en base a su resistencia a la corrosión, dureza y P.V. (Presión-Velocidad), esta es una medida que representa la presión de la cara de contacto y la velocidad de la cara rotatoria que nos indica una medida de la severidad del servicio referido a desgaste del sello. Cuando se incrementa P.V. la selección de la cara del sello se vuelve más crítica.

#### **4.6.1.1) Caras blandas**

Entre las caras blandas la única que se utiliza es el Carbón, que es mencionado inmediatamente:

##### **4.6.1.1.1) Carbón-Grafito**

El Carbón-Grafito es el material de uso más común como cara de sello. Las ventajas que ofrece incluyen excelentes características de fricción y desgaste, es compatible con un amplio rango de temperaturas y ambientes corrosivos, bajo costo y fácilmente maquinable. Pero es un material blando y esta sujeto al desgaste abrasivo. A causa de su bajo modulo de elasticidad, las caras de Carbón grafito se pueden torcer y distorsionar bajo presión.

Se forma combinando Carbón grafito con un aglomerante de residuo de petróleo. Esta mezcla es sinterizada, causando la carbonización del aglutinante. La estructura que resulta es impregnada luego con una resina para llenar los huecos en el material base.

Aunque químicamente el Carbón es químicamente inerte, se descompone en presencia de algunos agentes oxidantes fuertes, como el Ácido Nítrico o el Hipoclorito de Sodio.

Este material es más fuerte cuando está comprimido. La combinación Carbón vs. Carburo de Silicio tiene las mejores características de fricción y desgaste que cualquier combinación de caras de sello.

#### **4.6.1.2) Caras duras**

Existen muchos materiales que se usan actualmente para aplicaciones de sellos, pero las principales son tres: Oxido de aluminio (Cerámica), Carburo de Tungsteno y Carburo de Silicio.

##### **4.6.1.2.1) Oxido de Aluminio**

El Oxido de Aluminio o cerámica, exhibe una tendencia hacia el shock térmico, y tiene una dureza relativamente baja comparada con el Carburo de Silicio. Es quebradizo. Una cara de cerámica, sólida de alta pureza contiene 99.5% de Oxido de Aluminio. Es químicamente inerte y puede ser aplicado a casi cualquier producto. Esta limitado a velocidades y presiones moderadas. Se encuentra comúnmente en aplicaciones poco severas como servicios ligeros de agua.

##### **4.6.1.2.2) Carburo de Tungsteno**

Las caras de Carburo de Tungsteno se fabrican por sinterización de partículas de Carburo de Tungsteno en una matriz de metal, la que actúa como aglutinante. El rendimiento de este material depende en gran medida del tamaño de las partículas, la distribución y el tipo de aglutinante usado.

El Carburo de Tungsteno es un material, pesado, duro, resistente a la abrasión con buena conductividad térmica. Funciona bien en servicios abrasivos, especialmente cuando corre contra Carburo de Silicio. Sin embargo en aplicaciones de alta velocidad con lubricación marginal, se puede generar excesivo calor en la interfase, causando grietas en la superficie conocidas como "heat checking". El Carburo de Tungsteno está sujeto al ataque corrosivo al aglutinante, causando así fallas prematuras. Se usa de rutina en aplicaciones para alta presión donde su alto modulo de elasticidad ayuda a evitar distorsiones de la cara. También funciona muy bien en presencia de líquidos con propiedades de lubricación muy pobres.

##### **4.6.1.2.3) Carburo de Silicio**

El Carburo de Silicio es el material que exhibe el más alto grado de dureza de todas las caras de sellos y tiene una excelente conductividad térmica. Es un material duro, resistente al calor y casi inerte al desgaste.

Existen dos tipos de Carburo de Silicio: Unido por reacción y sinterizado. En los materiales unidos por reacción, las partículas de Carburo de Silicio están rodeadas por Silicio libre. El proceso de siliconización limita la porosidad del material, lo que ofrece ciertas ventajas en algunas aplicaciones de sellos. Sin embargo a causa de que el Silicio libre es más susceptible a la corrosión y a la erosión, las aplicaciones con materiales unidos por reacción deben ser cuidadosamente seleccionadas.

El Carburo de Silicio sinterizado es un material alfa-base policristalino que no contiene Silicio libre. Y mientras que tiene una excelente resistencia a la corrosión, es quebradizo y debe ser cuidadosamente manejado.

#### **4.6.2) Empaques secundarios (O-rings y juntas)**

Las dos características más críticas de los empaques secundarios son las limitaciones de temperatura y compatibilidad química del producto bombeado.

Cuando se selecciona un empaque secundario del tipo O-ring, hay que consultar la guía de selección de un fabricante. Estas guías nos dan las limitaciones químicas y de temperatura en la mayoría de los compuestos elastoméricos producidos.

Cuando elegimos los empaques secundarios hay que considerar si van a operar de forma dinámica o estática. Algunos compuestos no se recomiendan para aplicaciones dinámicas. Otros compuestos se hinchan en ciertas aplicaciones provocando que se atasquen.

##### **4.6.2.1) Aflas**

Es un fluoroelastomero cuya base es un copolímero alternante del Tetrafluoroetileno y del Propileno. Tiene excelente resistencia a la temperatura y una gran resistencia química, sin deterioro o muy poco aun en contacto con ácidos y bases fuertes a temperaturas altas. Su rango de temperatura es de -18°C a 260°C.

##### **4.6.2.2) Buna-N**

Es un copolímero del Butadieno y el Acrilonitrilo con excelente resistencia a los productos del petróleo y una amplia aplicación en aplicaciones de agua. La Buna N tiene baja resistencia al Ozono, la luz del sol y el clima, por lo que debe ser almacenado en áreas protegidas con poca exposición a la luz del sol o al equipo



eléctrico generador de Ozono. Su rango de temperatura es de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $120^{\circ}\text{C}$ . Se conoce comúnmente como nitrilo.

#### **4.6.2.3) Creavey**

Este es el nombre de una marca registrada para O-rings de Vitón o de Silicón encapsulados en teflón. Este producto ofrece las propiedades elastoméricas de los O-rings y las cualidades de resistencia al calor del teflón. Su rango de temperatura va desde  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $180^{\circ}\text{C}$ . No se recomienda para servicio dinámico.

#### **4.6.2.4) Chemraz**

Un miembro de la familia polimérica de los perfluoroelastómeros. Los químicos especialistas en polímeros describen la base de los perfluoroelastómeros como polímeros de tres o más monómeros en los cuales todas las posiciones de los hidrógenos han sido reemplazadas con flúor. La sorprendente resistencia de estos perfluoroelastómeros vulcanizados al calor y a la mayoría de los productos químicos y solventes es el resultado del estado de completa fluorinación. Su rango de temperatura es de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $232^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.6.2.5) Etileno propileno (EPR)**

El EPR es un copolímero hecho de monómeros de etileno y propileno. El EPR tiene excelente resistencia a la corrosión para ácidos diluidos y álcalis, cetonas, alcoholes, agua, vapor y fluidos hidráulicos de fosfatos de esteres. No es recomendable para fluidos con base de hidrocarburos o lubricantes de base di Ester. El rango de Temperatura es de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $180^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.6.2.6) Grafoil**

Este material de grafito expandido se forma en anillos para dar un sellado secundario estático en aplicaciones de alta temperatura. Este material tiene una excelente resistencia a la corrosión. Su rango de temperatura va desde  $-240^{\circ}\text{C}$  a  $700^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.6.2.7) Kalrez**

Es un perfluoroelastómero que es un copolímero del Tetrafluoroetileno y el Perfluorometil vinil éter. El Kalrez tiene muchas de las propiedades elastoméricas del Vitón y la resistencia química y ala temperatura del teflón. El Kalrez tiene una excelente resistencia ala corrosión de los solventes, ácidos orgánicos e inorgánicos y a las bases, agentes fuertemente oxidantes, compuestos de halógenos, Mercurio caliente, Cloro, combustibles y fluidos de transferencia de calor. No se recomienda

su uso con aminas o solventes fluorinados. Su rango de temperatura es de  $-18^{\circ}\text{C}$  a  $260^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.6.2.8) Neopreno**

Es un homopolímero del Cloropreno y del Clorobutadieno. Se utiliza para sellar refrigerantes como el freon y Amoniaco. Tiene una resistencia muy buena a los lubricantes de petróleo. Su rango de temperatura es de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $120^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.6.2.9) TFE sólido**

El TFE o teflón tiene un uso muy amplio ya sea como empaquetadura, material para juntas y a menudo se considera para aplicaciones de O-rings para sellos mecánicos aunque se maneja preferentemente como cuña o como V-ring. La mayor desventaja en el uso del teflón como empaque de sello mecánico es su carencia de elasticidad en comparación con los elastómeros. Esto creara problemas a menudo cuando el teflón debe ser estirado y acomodado en un surco o donde debe ser comprimido. El teflón virgen no es afectado en lo más mínimo por todos los fluidos comunes. Su rango de temperatura va de  $-73^{\circ}\text{C}$  a  $232^{\circ}$ .

#### **4.6.2.10) Vitón**

También conocido como fluorocarbón, el vitón es un copolímero del fluoruro de vinildieno y del hexafluoropropileno. Sus aplicaciones incluyen lubricantes de petróleo, lubricantes de base di Ester, fluidos de silicio, hidrocarburos halogenados. Agua, vapor de baja temperatura y una amplia variedad de ácidos. El Vitón no es resistente a las aplicaciones con cetonas, Amoniaco anhidro, Ácido Fluorhídrico caliente, Ácido Clorosulfúrico u otros cáusticos fuertes. Su rango de temperatura es de  $-18^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.6.3) Metalurgias de los sellos mecánicos**

Las partes metálicas de un sello mecánico son seleccionadas de acuerdo a su dureza y resistencia a la corrosión y a la capacidad para dar el arrastre de la unidad rotatoria del sello. Si las partes de la bomba en contacto con el fluido son de acero al carbón, fierro, o de acero inoxidable, las partes metálicas del sello deben ser de acero inoxidable. Si la bomba es de una aleación especial el sello debe ser fabricado de la misma aleación que la bomba.

Los resortes y los fuelles pueden ser fabricados de acero inoxidable, pero pueden estar sujetos a corrosión por estrés en presencia de Cloro, Bromo, Yodo y algunos fluidos cáusticos. Una atmósfera de Hidrogeno en base Azufre puede

afectar también al Inoxidable. Con estos fluidos se recomienda usar Hastelloy C, Inconel o Monel. A continuación mencionamos las metalurgias más comunes:

#### **4.6.3.1) SS 304 y 316**

Estos son los materiales más comunes usados en sellos mecánicos en bridas, mangas y partes rotatorias. Ambas aleaciones son muy similares en composición, aunque el 316 SS es ligeramente más resistente al ataque químico. Se usan muy poco para la fabricación de fuelles.

#### **4.6.3.2) Carpenter 20 SS**

Se utiliza en aplicaciones que requieren gran resistencia a la corrosión, y se utiliza específicamente para las aplicaciones de ácido sulfúrico. Algunos sellos de fuelles son fabricados en todas sus partes metálicas de este material.

#### **4.6.3.3) AM-350 SS**

Este es un material especialmente tratado térmicamente y tiene una resistencia a la corrosión similar a la del 304 SS.

Este material es usado comúnmente en la fabricación de fuelles soldados. Cuando tiene un buen tratamiento térmico, es una aleación de alta resistencia en los fuelles, y tiene tres veces la resistencia del Carpenter 20 o del Hastelloy.

#### **4.6.3.4) Hastelloy C**

Es un material de níquel-molibdeno y es una de las aleaciones más universales con una resistencia excepcional a una amplia variedad de ambientes de procesos químicos.

#### **4.6.3.5) Inconel**

Los materiales 600, 718 y X750 de inconel son aleaciones de Níquel-Cromo hierro y son excelentes para uso en ambientes corrosivos y temperaturas elevadas.

Estas aleaciones tratadas térmicamente tienen excelentes propiedades mecánicas sobre un alto rango de temperatura.

#### **4.6.3.6) Monel**

Es una aleación de níquel-cobre usada para fuelles, resortes y otros materiales metálicos del sello cuando se requieren propiedades especiales de resistencia a la corrosión, como en el caso del Ácido Fluorhídrico. Debido a su bajo contenido de hierro el Monel es más resistente a la corrosión en algunas aplicaciones que el Carpenter 20.

#### **4.6.3.7) Titanio**

El titanio CP grado 2 comercialmente puro ha sido usado con gran eficiencia en aplicaciones de fuelles. Tiene una excelente resistencia a la corrosión combinada con una alta relación de Fuerza/peso. Las aplicaciones recomendadas incluyen Cloruro de Amonio, Hipoclorito de Calcio, Cloro, Dióxido de Cloro, Ácido Nítrico y Cloruro de potasio.

### **4.7) AMBIENTACIÓN**

El control ambiental de los sellos mecánicos es tan importante para la correcta operación y vida útil del sello como el diseño y material elegidos. La ambientación del sello comprende a la temperatura, condiciones abrasivas, viscosidad o las cualidades de lubricación del fluido entre las caras y las condiciones mecánicas del equipo como cavitación, vibración y deflexión.

Cuando se selecciona un sello mecánico con sus materiales adecuadamente, los controles ambientales son el siguiente factor prioritario que determina la operación y la vida útil del sello.

#### **4.7.1) CONTROL DE LA TEMPERATURA**

Cuando se bombea un producto a temperatura alta se debe seleccionar un sello mecánico diseñado especialmente para temperaturas elevadas, los sellos de fuelle rotatorio o preferentemente los de fuelle estacionario soportan temperaturas de hasta 450 °C y son los más recomendables para este tipo de servicios.

Sin embargo, la vida útil de cualquier sello en una aplicación de temperaturas elevadas, dependerá siempre de los materiales de construcción y la naturaleza de los mecanismos de control ambiental utilizados. A continuación enumeramos los factores que son afectados por la temperatura.

##### **4.7.1.1) Desgaste de elastómeros**

Los empaques secundarios de elastómeros se pueden deteriorar cuando se exponen a temperaturas demasiado altas. Los límites de temperaturas de los empaques secundarios se mencionan en el apartado anterior. Como una regla general la temperatura en la cámara del sello se debe mantener al menos 28° C debajo de los límites de temperatura citados.

##### **4.7.1.2) Expansión térmica**

En algunos sellos sus partes están compuestas de diferentes materiales, Los límites de temperaturas para estos sellos deben estar calculados para permitir la diferencia en los coeficientes de expansión térmica. Cuando se exceden estos límites pueden ocurrir distintos fenómenos, como separación, congelación, atascamiento o fractura de los componentes críticos del sello.

#### **4.7.1.3) Corrosión**

Las caras de los sellos, los empaques secundarios y la metalurgia del sello deben resistir el ataque químico del producto, además la temperatura es un factor en la resistencia a la corrosión. La corrosividad de un producto químico normalmente se duplica cada 10 °C. Un adecuado sistema de enfriamiento nos ayuda a proteger a los componentes del sello del ataque corrosivo.

#### **4.7.1.4) Presión de vapor y punto de ebullición**

El punto de ebullición de un producto es una consideración importante. Un producto no puede ser bombeado arriba de su punto de ebullición, pero las pequeñas cantidades de calor generado entre las caras y en los límites de la cámara del sello se pueden acumular para elevar la cámara del sello arriba del punto de ebullición. La vaporización del fluido entre las caras del sello puede causar un desgaste de las caras muy rápido, así como la precipitación de sales, minerales, y otras impurezas abrasivas, cuya presencia también acelera el desgaste de las caras. La temperatura del líquido en la cámara del sello se debe mantener al menos 28 °C abajo del punto de ebullición del producto en la caja del sello.

#### **4.7.1.5) Viscosidad**

La viscosidad de la mayoría de los fluidos decrece cuando la temperatura se incrementa, y a temperaturas muy elevadas el producto se puede volver tan ligero que pierde sus cualidades lubricantes entre las caras del sello.

El agua tiene una viscosidad de 1 cp a 20 °C, pero a 82 °C su viscosidad es solo 0.35 cp, y a 100 °C su viscosidad es 0.28 cp. El heptano que es el hidrocarburo mas ligero con el cual las caras de sello comunes pueden operar satisfactoriamente, tiene una viscosidad de 0.41 cp a 20 °C.

Un producto de baja viscosidad bombeado a temperaturas elevadas requiere invariablemente de consideraciones especiales de diseño.

#### **4.7.1.6) Vida del fluido sellante**

Las temperaturas altas pueden causar una descomposición del fluido sellante. La vida del aceite SAE # 10 como fluido de sellos se corta bruscamente a la mitad con cada 11 °C de incremento en la temperatura, ya que el calor acelera la oxidación que puede cambiar el aceite en un lodo semejante a un barniz, laca o breá. La vida del aceite de sellos a 93 °C es un 16% del mismo aceite a 49 °C. Al descomponerse el fluido sellante se produce un rápido desgaste de las caras y también se pueden atascar las partes móviles del sello mecánico.

#### **4.7.1.7) Punto de fusión**

Algunos productos tales como la cera o el azufre tienen excelentes cualidades lubricantes cuando están calientes en el estado líquido, pero solidifican cuando llegan a enfriarse.

Tales productos deben ser mantenidos a temperaturas arriba de su punto de fusión para asegurar un ambiente líquido que lubrique bien las caras de los sellos.

#### **4.7.1.8) Generación de gas**

Un líquido puede absorber gases hasta su punto de saturación, el cual es inversamente proporcional a su temperatura. Un incremento de temperatura de 22°C o más puede liberar moléculas de gas de una solución. La presencia de burbujas de gas conocidas como "espuma", en un fluido sellante puede destruir la capacidad de transferencia de calor y crear temperaturas altamente perjudiciales en la cavidad del sello. La formación de espuma en el fluido del sello es una causa común de fallas prematuras del sello.

#### **4.7.1.9) Límites de temperatura**

Las temperaturas en la cámara del sello deben ser:

1. 28 °C abajo del límite de temperatura de cualquier material de construcción del sello.
2. Al menos 28 °C abajo del punto de flasheo o de ebullición del fluido sellante.
3. No más de 22 °C arriba de la temperatura del fluido del sello.
4. Arriba del punto de solidificación del fluido sellante.

#### **4.7.1.10) Carga de Calor**

La carga de calor depende de los siguientes factores:

**4.7.1.10.1) Calor generado por el sello.** Los márgenes citados anteriormente son necesarios ya que el calor generado por el sello puede incrementar

significativamente la temperatura en la caja del sello. El calor se genera cuando se rompe la película líquida entre las caras del sello y cuando el sello mecánico gira con poca tolerancia en la caja del sello. Las variaciones en la cantidad de calor, son el resultado de diferencias en el diseño del sello, relaciones de balance y cargas sobre las caras. Se pueden realizar estos cálculos para tipos y tamaños específicos de sellos mecánicos.

**4.7.1.10.2) Absorción de calor.** El calor se absorbe por fuera o por dentro de la cavidad del sello, dependiendo del diferencial de temperatura en la cámara del sello y el producto en la bomba o en el contenedor. Una temperatura mayor que la del producto resultara en perdida en la caja del sello. Una temperatura menor que la del producto resultara en absorción en la cámara del sello. También se pueden realizar los cálculos de este parámetro.

**4.7.1.10.3) Carga de calor.** La carga de calor en el sistema de sellado es la suma del calor generado por el sello y el calor absorbido. Los cálculos basados en la carga de calor ayudan a determinar el mejor método para disipar el calor para prevenir daños en el sello. Se requieren a menudo sistemas de tubería para asegurar que la temperatura se mantenga en los límites requeridos.

#### **4.7.2) Tribología y película líquida**

El termino tribología proviene de la palabra griega tribos que significa fricción y de la palabra logos que significa ley. Tribología se define como "la ciencia y tecnología de las superficies interactuantes en movimiento relativo una con otra. La tribología comprende la fricción, lubricación y desgaste. La tribología es la ciencia que permite el movimiento, y es frecuentemente la clave para desarrollar nuevos productos.

La Tribología en los sellos mecánicos estudia la lubricación entre las caras, por lo que su importancia en el diseño de estas y la aplicación de nuevos materiales es relevante. No vamos a entrar en detalle porque sería hacer consideraciones de carácter teórico que no son el objetivo de este trabajo, sin embargo en la bibliografía se mencionan artículos que exploran a fondo la tribología en los sellos mecánicos. En esta sección se cumple con el apartado número dos de nuestros objetivos generales

#### 4.7.2.1) Película líquida.

Uno de los factores más importantes en el diseño de un sello mecánico es la película líquida entre las caras. Todos los sellos requieren de un fluido entre las caras para su correcto funcionamiento ya que de otra manera el sello se sobrecalentaría.

La película líquida es necesaria para:

- Controlar el calor por fricción generado por las caras.
- Disminuir el desgaste entre las caras.
- Prevenir que las caras del sello se sobrecalienten.

Los principales factores que afectan la película líquida entre las caras son los siguientes:

- Temperatura. La temperatura del fluido sellado y lo cercana que esta a su punto de ebullición el punto al cual solidifica.
- Cambio del estado del producto a través de las caras. Son productos que tienden a cambiar de estado al contacto con la atmósfera, (p.e. cristalización). También aplica a productos que se endurecen o solidifican cuando se calientan. Todas las caras de sello generan calor; productos termosensitivos pueden cambiar sus características a través de las caras, lo que puede acortar la vida del sello.
- La viscosidad del producto sellado. Algunos productos con viscosidad alta atraviesan con dificultad el pequeño gap que existe entre las caras, mientras que productos con baja viscosidad lo atraviesan con relativa facilidad.

Existen otros factores como son : las propiedades de lubricación del producto sellado, los sólidos abrasivos contenidos en el producto, la presión actuante entre las caras, la velocidad y tamaño de la flecha, la distorsión entre las caras, las vibraciones del sistema y el desalineamiento o daño mecánico. La lista anterior es destinada a dar una breve indicación de cómo diferentes factores afectan la película líquida.

#### 4.7.2.2) Condiciones de lubricación

Una vez examinado algunos de los factores que afectan la película líquida entre las caras rotatoria y estacionaria de un sello mecánico, es importante entender como se comporta la película líquida de lubricación a través del ancho de la cara del sello en términos del gradiente de presión resultante.



Las condiciones de lubricación que se consideran normalmente en operación son los siguientes:

**4.7.2.2.1) Película hidrostática.** La lubricación hidrostática es dada por el producto cuando el equipo esta en condiciones estáticas, y se asume que la presión tendrá una caída lineal desde la presión en la cámara del sello hasta cero. Considerando que las caras son completamente paralelas.

**4.7.2.2.2) Película hidrodinámica.** A velocidades elevadas se incrementa una presión hidrodinámica tal que las asperezas quedan completamente separadas por una película líquida. Como no hay contacto entre las caras no se produce desgaste y la vida del sello tiende a ser muy larga a menos que otros factores ocasionen fallas del sello. Una característica de la lubricación hidrodinámica es que la carga y la presión hidrodinámica están en equilibrio. La caída de presión también tiende a cero aunque en ciertos casos la presión se mantiene a lo largo de las caras del sello.

**4.7.2.2.3) Lubricación mixta.** La presión hidrodinámica se fortalece en el lubricante cuando la velocidad se incrementa. Una característica de la lubricación mixta es que la carga es llevada por una combinación de la presión hidrodinámica y la presión de contacto entre las asperezas de ambas superficies. Es una región intermedia entre la lubricación en el límite y la lubricación hidrodinámica.

**4.7.2.2.4) Lubricación en el límite.** Cuando no hay nada que fortalezca la presión hidrodinámica toda la carga es llevada por la presencia de una capa fina de material lubricante que se adsorbe en las asperezas e irregularidades en el área de las caras del sello. Las capas finas en la lubricación en el límite se comportan como cuerpos plásticos y tienen una determinada resistencia al cortante. Las investigaciones han demostrado que ellas poseen capacidad para disminuir la fricción, protegiendo así a las superficies. Este efecto se debe a que en las capas límites muy finas surgen presiones que no solo evitan el acercamiento y contacto entre las superficies sino una tendencia a separarlas. Una característica de la lubricación en el límite es la ausencia de presión hidrodinámica. El contacto en seco no se considera en la lubricación en el límite. En la industria Química y Petroquímica este es el modo principal de lubricación para las aplicaciones de sellado.

En la mayoría de los casos anteriores la fuga del sello se produce en forma de vapores, pero en el caso de fluidos como los gases licuados de petróleo estos pueden flashear de líquido a gas entre las caras del sello antes de salir. El término

que describe las características inusuales de lubricación de estos fluidos se conoce como transformación de fase, la curva de caída de presión que normalmente es una recta en este caso se convierte en una parábola muy pronunciada con lo que nos da un elevado soporte de carga. El perfil de presión en esta manera de lubricación requiere una evaluación compleja de las propiedades del fluido y las características de diseño del sello.

#### **4.7.3) PLANES DE LUBRICACIÓN API Y ANSI PARA EL SELLO (FLUSH)**

El flush al sello es la introducción de un fluido a través de la cámara del sello a un rango de flujo escogido para mantener un ambiente adecuado en el sello. Para ser efectivo este líquido debe fluir desde el alojamiento del sello con una presión suficientemente alta para prevenir que el producto de atrás del impulsor entre a la cámara del sello. Ya que la mayoría de las cajas de sello están restringidas en el fondo o garganta, la velocidad se transmite al flujo cuando este deja el alojamiento.

Las maneras de introducir este flush a la cámara del sello, se conocen como planes de lubricación y son descritas en los estándares desarrollados tanto para bombas (API 610 9th ed.) como para sellos mecánicos (API 682 2nd ed.) por el Instituto Americano del Petróleo (API) para la industria del petróleo.

El Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI) utiliza los mismos planes de lubricación con el único cambio de que les añade inicialmente el prefijo 73.

Existen 21 planes de lubricación en el API 682 (2nd ed.) para asegurar la operación del sello y por tanto de la bomba. En la tabla 3 presentamos los planes de lubricación más comúnmente usados en la industria actualmente.

#### **4.8) SELECCIÓN Y APLICACIÓN**

La selección del sello adecuado para una aplicación específica actualmente ya no se realiza únicamente por el fabricante de sellos mecánicos. En años recientes fabricantes de equipo original, contratistas de ingeniería y el usuario final están implicados en el proceso de selección. Todas las personas implicadas en la selección del sello deben estar conscientes de todos los factores que deben ser considerados para la selección del sello que cumpla mejor con los requerimientos para el tiempo más largo en operación con el mínimo de mantenimiento.

Los factores que deben tomarse en cuenta son: el tamaño de la flecha, velocidad de la bomba, presión en la cámara del sello y las características físicas y químicas del fluido manejado y del fluido barrera considerado en la selección. La selección final se basa en una evaluación de todos estos factores así como las especificaciones del cliente, que incluyen costo, limitaciones dimensionales y disponibilidad de condiciones ambientales.

A causa de que las diferencias de diseño, de estandarización de partes y materiales y económicas, los fabricantes de sellos no siempre están de acuerdo en la selección de diseño y de materiales para una aplicación dada. Mientras algunas combinaciones de materiales pueden ser más costosas inicialmente, estas nos pueden dar una extensión en la vida del sello a través del uso de mejores materiales resultando con esto en un ahorro a lo largo de la vida del sello, especialmente cuando se implican procedimientos costosos de mantenimiento.

Cuando más de una combinación de materiales es adecuada para determinadas condiciones de operación, la selección del sello esta influenciada por las preferencias y experiencia del usuario.

#### **4.8.1) El líquido de proceso**

El líquido de proceso es determinante en la selección y aplicación de los sellos mecánicos a continuación se analizan algunas características que influyen.

##### **4.8.1.1) Corrosividad**

El grado de corrosividad de un producto determinará la metalurgia del sello así como la selección de materiales para las caras y los empaques secundarios. Sin embargo las características de desgaste de los materiales de construcción también deberán ser tomadas en cuenta. Algunos materiales poseen excelente resistencia a la corrosión pero tienen pobres capacidad de desgaste, mientras que otros tienen excelentes características de desgaste pero exhiben pobre resistencia a la corrosión.

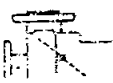
##### **4.8.1.2) Temperatura**

La temperatura de un producto afecta la temperatura de operación de un sello mecánico y también afecta la corrosividad, la densidad, y la viscosidad del producto.

Las propiedades físicas y químicas de la mayoría de los productos cambian con la temperatura. Los productos con altos puntos de fusión o productos que tienden a cristalizar cuando se exponen a la atmósfera requieren control de temperatura para prevenir la solidificación del producto en las caras.

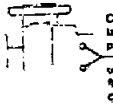
# Tabla 3. Planes de Lubricación API

## API Plan 1 ANSI Plan 7301



Recirculación integral (interna) de la descarga de la bomba al sello.

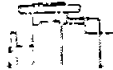
## API Plan 2 ANSI Plan 7302



Conexiones separadas para permitir que fluya con fluido circulante.

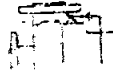
Caja del sello sin salida, sin circulación de fluido de descarga. Se requiere caja del sello con camisa enfriada con agua y conmute de garganta a menos que se especifique algo diferente.

## API Plan 11 ANSI Plan 7311



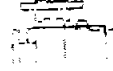
Recirculación de la envoltura de la bomba a través del orificio hacia el sello.

## API Plan 12 ANSI Plan 7312



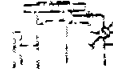
Recirculación de la envoltura de la bomba a través del filtro y del orificio hacia el sello.

## API Plan 13 ANSI Plan 7313



Recirculación de la cámara del sello a través del orificio y regreso a la succión de la bomba.

## API Plan 21 ANSI Plan 7321



Cuando se especifica

Recirculación de la envoltura de la bomba a través del orificio y el enfriador hacia el sello.

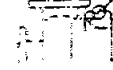
## API Plan 22 ANSI Plan 7322



Cuando se especifica

Recirculación de la envoltura de la bomba a través del filtro, el orificio y el enfriador hacia el sello.

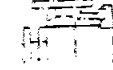
## API Plan 23 ANSI 7323



Cuando se especifica

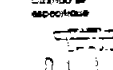
Recirculación del sello con anillo de bombeo a través del enfriador y regreso al sello.

## API Plan 31 ANSI Plan 7331



Recirculación de la envoltura de la bomba a través del ciclón separador que suministra fluido limpio al sello y fluido con sólidos de regreso a la succión de la bomba.

## API Plan 32 ANSI Plan 7332



Cuando se especifica

Recomendado por el fabricante del compresor. Inyección al sello desde una fuente externa de fluido limpio.

## API Plan 41 ANSI Plan 7341



Cuando se especifica

Recirculación de la envoltura de la bomba a través del ciclón separador que suministra fluido limpio a través del enfriador al sello y regresa fluido con sólidos a la succión de la bomba.

## API Plan 51 ANSI Plan 7351



Cuando se especifica

Bloqueo sin salida.

## API Plan 52 ANSI Plan 7352

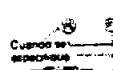


Cuando se especifica

Normalmente abierto  
Tipo de flange  
Indicador de nivel  
Recipiente  
Cuando se especifica (Puede ser del tipo de sello)  
Válvula de drenaje

Recipiente externo de fluido sin presurización, circulación forzada.

## API Plan 53 ANSI Plan 7353

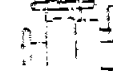


Fuente de presión externa

Normalmente abierto  
Tipo de flange  
Indicador de nivel  
Recipiente  
Cuando se especifica (Puede ser del tipo de sello)  
Válvula de drenaje

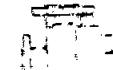
Recipiente externo de fluido presurizado, circulación forzada.

## API Plan 54 ANSI Plan 7354



Circulación de fluido limpio desde un sistema externo.

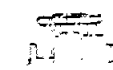
## API Plan 61 ANSI Plan 7361



Ventilación (abierta o cerrada)  
Drenaje (abierta)

Conexiones con roscas para uso del compresor.

## API Plan 62 ANSI Plan 7362



De fuente externa

Llevado con fluido externo (vapor, gas, agua, etc.)

Cuando se ha determinado que el producto nos da una adecuada lubricación de las caras del sello, que el diseño del sello es el adecuado para la presión y velocidad dadas, y que los materiales de construcción soportan la naturaleza corrosiva del producto, las limitantes de temperatura de los componentes del sello deberán ser tomados en cuenta.

En el pasado la necesidad de usar elastómeros como empaques secundarios, limitaba la temperatura en la cámara del sello. Los recientes avances en la tecnología de los fuelles y de los materiales flexibles no elastoméricos como el grafito, han incrementado los límites de temperatura de los sellos mecánicos a los límites de temperatura de los sistemas de proceso. Para maximizar la relación costo beneficio, la temperatura en la cavidad del sello deberá ser disminuida únicamente hasta el punto necesario para la correcta operación del sello.

#### **4.8.1.3) Gravedad específica**

La gravedad específica es la relación del peso de una sustancia al peso de un volumen igual de agua a 4 °C. El Agua pesa 1 gm/cc a 1 bar absoluto y 4 °C lo que es equivalente a una gravedad específica de 1.

La gravedad específica es importante para calcular cabezas de bombas que están expresadas en pies de agua. Se necesitan factores de corrección para convertir cabezas de productos que son más ligeros o más pesados que el agua a presión barométrica

La gravedad específica se utiliza para estimar la lubricación de hidrocarburos ligeros como el GLP (gas licuado de petróleo). Estos gases con gravedad específica menor que la del heptano (0.68 a 29 °C) usualmente requieren que una de las caras sea de carbón y que además tenga un balance especial.

La gravedad específica solo debe ser usada como una guía para las propiedades de lubricación de ciertos productos específicos tales como el LPG. La selección final se deberá basar en datos más específicos.

#### **4.8.1.4) Presión de vapor y punto de ebullición**

La presión de vapor de un líquido depende de la capacidad de las moléculas de la superficie del líquido para superar el efecto de atracción de las fuerzas intermoleculares que las retienen en la superficie. Si las moléculas tienen energías cinéticas suficientemente grandes, aquellas fuerzas serán superadas. Por consiguiente la presión de vapor es función de la energía cinética. De la misma

manera la energía cinética es función de la temperatura y, por lo tanto la presión de vapor también es función de la temperatura. Todo líquido tiene su propia presión de vapor, por ejemplo el agua a 100 ° C tiene una presión de vapor de 1 bar absoluto.

Si un producto debe ser manejado a/o cerca de su punto de ebullición, su presión de vapor debe ser considerada en relación a la presión y temperatura en la cámara del sello. Si el calor generado por el sello causa que el fluido hierva a la presión de la cámara, la película líquida entre las caras vaporizará. Los hidrocarburos ligeros especialmente los gases licuados de petróleo requieren de una presión en la caja del sello de al menos 1.5-2 bar más grande que la presión de vapor del producto a la temperatura de la cámara del sello para así poder mantener la película líquida entre las caras del sello.

Una relación presión temperatura adecuada puede ser lograda en la cámara del sello ya sea incrementando la presión o disminuyendo la temperatura.

Una línea de recirculación y un mecanismo de restricción en la garganta pueden ser usados para mantener la presión requerida en la cámara del sello.

La presión de vapor de un producto es importante también por consideraciones de seguridad. Pueden ser indicadas ciertas consideraciones como venteo y drenado, buje de restricción o una caja estopero auxiliar en la brida.

#### **4.8.1.5) Viscosidad**

La viscosidad puede ser usada como un indicador de las propiedades de lubricación de un producto. Generalmente mientras más grande la viscosidad, mejores las propiedades de lubricación. Un producto con una viscosidad menor de 5000 cp puede ser sellado con un diseño estándar de sello mecánico, mientras que uno con una viscosidad más alta requiere de un sello de arrastre positivo con unidad de compresión para trabajo pesado para compensar el incremento de resistencia entre las caras del sello.

#### **4.8.1.6) Abrasivos**

Los productos que contienen sólidos abrasivos y productos que tienden a solidificar o cristalizar se encuentran en casi todos los procesos industriales. Sellar estos productos representa el reto más serio para la aplicación exitosa de un sello mecánico y requiere una comprensión clara de las características físicas de fluidos abrasivos y su efecto en el rendimiento del sello.

Un sello mecánico sometido a un producto abrasivo esta sujeto a cinco tipos comunes de falla: 1) Desgaste excesivo de la cara, 2) Atasque del lado del producto, 3) Atasque del lado atmosférico, 4) Erosión, 5) Desgaste del mecanismo de arrastre.

Existen 4 tipos de productos abrasivos, clasificados según su efecto: 1) Lodos abrasivos no fibrosos, 2) Lodos fibrosos, 3) Lodos disueltos y 4) Fluidos termosensibles.

Se analizarán algunas aplicaciones en la parte del desempeño profesional.

#### **4.8.2) PRESIÓN EN LA CAMARA DEL SELLO**

A continuación se menciona la manera de determinar la presión en la cámara del sello, y se hace referencia a la relación presión-velocidad y las curvas referidas.

##### **4.8.2.1) Determinación de la presión en la cámara del sello**

La presión se define como fuerza por unidad de área. Si la presión se aplica a la superficie de un líquido, esta se transmite igualmente en todas direcciones. En esta memoria se expresa en bar ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ).

La presión en la cámara que debe ser soportada por el sello mecánico, varía con el diseño del equipo. Normalmente la caja en las bombas centrífugas horizontales con una línea de succión esta sometida a la presión de la bomba en la succión más un pequeño porcentaje de la presión diferencial entre la presión de succión y presión de descarga. En una bomba vertical la presión en la caja es normalmente la presión de descarga. En el caso de las bombas multipasos tienen una caja sometida a la presión de succión mientras que la otra caja esta sometida ya sea a la presión de un paso intermedio o a la presión de descarga.

Es necesario conocer con exactitud la presión en la cámara del sello, para saber la presión que debe soportar este. El fabricante del equipo puede proporcionar este dato, cuando esto no sea posible la mejor manera es instalar un manómetro en la caja. En los cuadros 1 y 2 tenemos las presiones asociadas a la bomba y las guías para tener datos aproximados de la presión en la cavidad del sello.

##### **4.8.2.2) Límites de presión velocidad.**

Aunque se han establecido limitaciones de presión para cada diseño de sello mecánico y para cada material de las caras, es necesario considerar la velocidad de rotación de estas cuando se determinan los límites de presión en la selección del sello. La velocidad es tan importante como la presión para determinar el rendimiento de un sello mecánico. Los sellos no balanceados pueden ser usados a presiones

## Cuadro 1 Presiones en la bomba

### **PRESIÓN DE SUCCIÓN**

La presión medida con un manómetro en la conexión de succión de la bomba.

### **PRESIÓN DE DESCARGA**

La presión medida con un manómetro en la conexión de descarga de la bomba.

Es igual a la presión de succión más la cabeza total desarrollada por la bomba.

### **PRESIÓN EN LA CAJA ESTOPERO**

Es la presión que hay en la caja estopero, es la que debe sellarse.

Es función del diseño del impulsor de la bomba.

## Cuadro 2 Diseños de impulsor y presiones en la cámara del sello

### **ALABES TRASEROS**

Presión de succión + 25% de la presión diferencial = Presión en cámara del sello

### **AGUJEROS DE BALANCE**

Presión de succión + 10% de la presión diferencial = Presión en cámara del sello

### **DOBLE SUCCIÓN**

Presión de succión = Presión en la cámara del sello

Presión diferencial = Presión de descarga – Presión de succión



relativamente altas si las velocidades son bajas pero si las velocidades son altas, se requieren normalmente sellos balanceados aunque las presiones sean bajas.

Se ha establecido una relación de P-V midiendo las características de desgaste de las más comunes combinaciones de caras de sellos, basadas en una vida del sello de 15,000 horas en servicio continuo o intermitente. La relación P-V junto con los límites de carga unitaria del material, los límites de torque del diseño del sello, los límites de presión de la cápsula del fuelle, el tamaño del sello y la velocidad se utilizan para graficar una curva de presión- velocidad.

#### **4.8.2.3) Curvas P-V**

Las curvas de P-V se utilizan para determinar si un diseño y una selección de materiales propuestas para un sello pueden lograr una vida normal del sello para una aplicación específica. En la figura 14 se muestran dos ejemplos.

#### **4.8.2.4) Servicios de vacío**

El vacío es generalmente usado para expresar presiones inferiores a la presión atmosférica. Se puede aplicar un sello mecánico en este tipo de servicios pero se requieren controles ambientales como un sello doble o una recirculación de producto para presurizar la cámara del sello. Con controles ambientales adecuados, los sellos mecánicos externos pueden ser aplicados para soportar vacíos muy elevados.

### **4.9) NORMATIVIDAD**

El instituto americano del petróleo (API) desarrolla estándares y especificaciones para la industria del petróleo. El estándar para bombas centrífugas usado en servicios generales en refinerías es el API 610 (9th ed.) y el estándar para sellos mecánicos es el API 682 (2nd ed.).

Cuando la primera edición del API 682 se editó en octubre de 1994, represento el estándar más completo para sellos mecánicos jamás publicado. Nació de la experiencia de los Ingenieros de mantenimiento y equipo rotatorio en las refinerías de petróleo.

Lo que esas personas lograron fue más allá de de sus intenciones. El estándar se convirtió gradualmente en un acercamiento sistemático a la selección y diseño de sellos. También funcionó como un libro de texto en sellos, aplicaciones y sistemas de lubricación.

Desde los años de su aparición, la industria del sellado ha seguido evolucionando. Diferentes tipos de sellos han demostrado un funcionamiento exitoso. Nuevos planes de lubricación se han desarrollado para soportar a estos sellos. Además los usuarios finales solicitaban que el estándar se expandiera para incluir los sellos para las bombas ANSI/ASME y otras bombas usadas en la industria Química

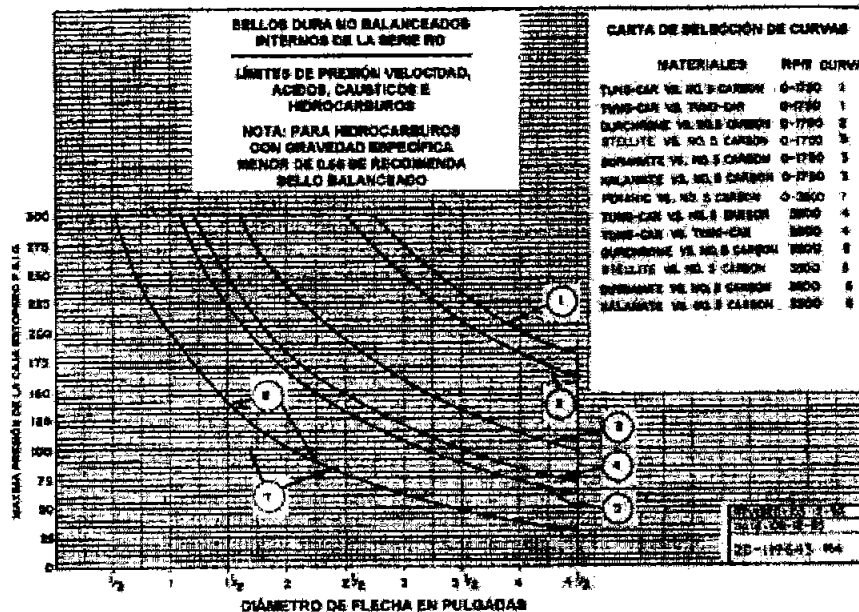
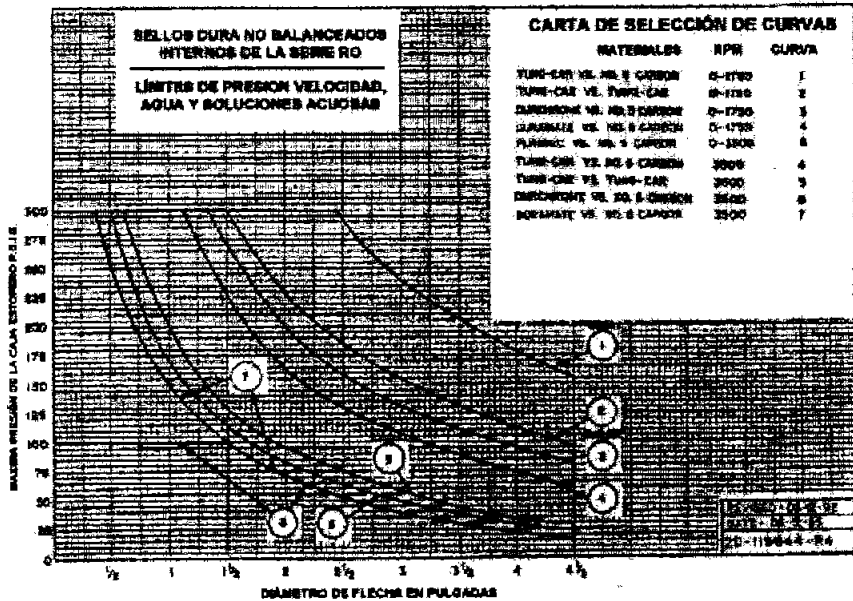
Para enfrentar los nuevos retos en 1998 se forma el equipo de trabajo para desarrollar la segunda edición. Este equipo de trabajo estaba formado por miembros de la industria del petróleo, la industria química y fabricantes de sellos mecánicos y equipo de bombeo. Durante su desarrollo, la segunda edición evoluciono como un verdadero estándar internacional enfrentando los nuevos retos en las industrias del petróleo, química y de gas natural. A pesar de que ha tenido numerosos cambios, las metas del estándar permanecen constantes: Proporcionar al usuario los medios de seleccionar y especificar un sello mecánico con una alta probabilidad de lograr 25,000 horas de servicio continuo, cumpliendo simultáneamente con las regulaciones de emisiones contaminantes.

La segunda edición del API 682 se publicó como documento del API en julio de 2002. Se espera que para finales del año 2004 se publique como el estándar internacional ISO 21049, completamente reformado como un estándar ISO.

La primera edición reconoció que ningún estándar podía cubrir con todas las aplicaciones, tipos de equipos o condiciones de operación. Se hizo pensando en cubrir los servicios, tamaños y condiciones más comunes. La segunda edición proyectó su alcance para abarcar un número más grande aplicaciones. El API 682 ha ganado aceptación internacional como el estándar para sellos mecánicos en las refinerías de petróleo en todo el mundo.

Cabe mencionar que en México nunca se ha desarrollado ningún estándar para sellos mecánicos y que si se desarrolla en un futuro este será una mala copia del estándar API como lo son la gran mayoría de los estándares NOM y NMX.

Figura 14. Curvas de Presión Velocidad



## 5) DESEMPEÑO PROFESIONAL

### 5.1) ASESORÍA TÉCNICA

A lo largo del desempeño profesional la parte medular ha sido la asesoría técnica a los diferentes clientes en todos los sectores de la industria, desde los comienzos como representante técnico de ventas hasta la gerencia de ventas. Este trabajo ha sido realizado a lo largo de los años en diferentes empresas: Durametallic Mexicana S.A. de C.V. que después se convirtió en la empresa de sellos y bombas más grande del mundo: Flowserve, posteriormente en AESSEAL México S:A. de C.V. y actualmente en Machspare Internacional Business S. A. de C. V. En el desempeño de las labores se ha impartido asesoría técnica principalmente a los ingenieros de mantenimiento que son los encargados del funcionamiento de los equipos, también he impartido asesoría técnica a la gente de Ingeniería de proyectos, a los Ingenieros de producción, a los encargados de los proyectos ambientales e inclusive a la gente de procuración.

Normalmente la asesoría se da como una recomendación en base al proceso así como a los siguientes factores. Tamaño del sello, propiedades físicas del producto, condiciones de operación como son la presión de succión, de descarga, de la cámara del sello, la temperatura, la viscosidad, la gravedad específica, también se toman en cuenta el equipo y condiciones de seguridad, todos estos factores deben ser tomados en cuenta para hacer la mejor selección del sello. Se tienen que verificar las dimensiones del alojamiento del sello mecánico. Otros factores importantes son las especificaciones del usuario, el control de inventario, mantenimiento, economía y la disponibilidad de controles ambientales. Los sellos mecánicos no deben ser seleccionados a sus límites máximos ya que la combinación de condiciones de operación puede causar fallas prematuras del sello.

En este capítulo se presenta lo que significa la asesoría técnica y el servicio a los Ingenieros de mantenimiento mecánico con lo que queda cumplida la parte 3 de los objetivos generales, así como la elaboración de un Informe de trabajo en donde se describa la correcta selección, aplicación y análisis de fallas de los sellos mecánicos, que corresponde a la parte 4.

### 5.1.1) INDUSTRIA DEL PETROLEO

1) En la plataforma marina Nonoch de PEMEX en Ciudad del Carmen, una bomba Sulzer ZE100-3315 API 610. La bomba opera con presión de descarga de 19 bar (275 psi), presión de succión de 5 bar (73 psi) a 3600 RPM y una temperatura de 70°C. El producto bombeado es agua con 1000ppm de aceite, H<sub>2</sub>S (agua amarga) con un alto contenido de arena.

Se instalo un sello cartucho sencillo de 1.890 con caras de carburo de silicio contra Carburo de Silicio y O-rings de Etileno-Propileno. Este sello es de resorte múltiple, con balance hidráulico y autoalineable. La razón para usar los O-rings de Etileno-Propileno en vez de O rings de Vitón es que estos no resisten el ataque químico del H<sub>2</sub>S lo que nos llevaría a una falla prematura del sello, así mismo se selecciono una combinación de caras duras ya que esta soporta mejor la abrasión de las partículas de arena que están presentes en el producto bombeado.

2) En la plataforma marina Akal-J de PEMEX en Ciudad del Carmen en una bomba Warman 3/2 CCHH. La bomba opera con una presión en la cámara del sello de 16.5 bar (239 psi) a 2100 RPM y una temperatura de 70°C, El producto bombeado es agua con metanol, petróleo y alto contenido de arena.

Se instalo un sello cartucho dual de acuerdo a especificación API 682 de resortes múltiples con caras de Carburo de Silicio contra Carburo de Silicio en el sello primario y caras de Carburo de Silicio contra Carbón en el sello externo, los sellos secundarios son de Aflas. Este sello es hidráulicamente balanceado y autoalineable. La razón de proponer un sello doble es que el Metanol esta clasificado como un contaminante muy peligroso del ambiente, la razón del Aflas es que el Vitón es atacado por el Metanol y el Aflas tiene una resistencia química mucho más amplia que los otros elastómeros que podríamos utilizar, la razón de las caras duras es otra vez el elevado contenido de arena en el fluido.

3) En la refinería "Lázaro Cárdenas" en la Ciudad de Minatitlan, Ver. una bomba Worthington 10HNI API 610, que opera con una presión de descarga de 13 bar (189

psi) y una presión de succión de 0.6 bar (9 psi) con una temperatura en la cámara del sello de 282°C. El producto bombeado es gasolina pesada.

Se instaló un sello API 682 tipo C de "3.346" que es un sello sencillo de fuelle metálico estacionario, tipo cartucho con fuelle de acero AM-350, caras en Carburo de Silicio vs. Carbón y empaques secundarios en grafito. La razón de proponer este tipo de sello es ordenada por la normatividad API 682 para altas temperaturas, ya que si la presión en la cámara del sello es baja, la temperatura si es lo suficientemente alta como para afectar la vida del sello. El grafito como empaque secundario soporta temperaturas de hasta 500 °C.

4) En la terminal de gas de Tula Hgo. Una bomba PSI (Process System International), opera con una presión de succión de 12.2 bar(177 psi) y una presión de descarga de 20.2 bar (293 psi) con una temperatura de 219 °C a 2950 RPM. El producto bombeado es condensado de hidrocarburos con una gravedad específica de 0.527.

Se instaló un sello doble de empuje de resortes múltiples con balance hidráulico y autoalineable. Las caras son de Carburo de Silicio vs. Carbón en ambos sellos y los empaques secundarios son de Kalrez en el sello primario y Aflas en el sello secundario. La razón de los empaques secundarios en Kalrez es que este material es el que mejor resiste la temperatura.

### **5.1.2) INDUSTRIA PAPELERA**

1) En Kimberly Clark en su planta de Orizaba, un depurador rotatorio vertical marca Herman Finckh. Esta maquina extrae la arena y gravilla de la pulpa de papel y gira a 1500 rpm, la presión de entrada es de 2.5 bar y la de salida es de 1.8 bar. Previamente el cartucho de los baleros a la mitad del ensamble estaba sellado con empaquetadura, esta se atascaba con la arena y con la gravilla con lo que se rasgaba rápidamente y fugaba hacia los baleros. Esta unidad se ajustaba semanalmente lo que implicaba desmontarla casi por completo. Se instaló un sello interno tipo componente con resortes ocultos para evitar el atasco de los resortes, la combinación de las caras fue de Carbón contra Oxido de Cromo y empaques

secundarios en Vitón. Este sello se instaló en diciembre de 1994 y dura en la actualidad un promedio de dieciocho meses.

2) En Mexicana de papel periódico (MEXPAPE) en abril de 1992 una bomba SIHI Ryland manejando resina en el rango de temperatura de 140°-220° C, (resina dura). Se instaló un sello doble con caras en ambos sellos de Carburo de Silicio vs. Carbón, con empaques secundarios de Kalrez. El plan de lubricación elegido fue el 52 y el fluido barrera fue ácidos grasos calientes en un sistema de termosifón. El sello dio buen servicio hasta junio de 1995. El sello fue devuelto para reparación varias veces pero esto fue siempre debido a un error de operación causando que el producto solidificara y dañara el sello. Otra nueva bomba SIHI Ryland con el mismo tipo de sello y sistema de lubricación fue instalada en junio de 1995 y sigue dando buen servicio hasta la fecha.

3) En Kimberly Clark en su planta de San Juan del Río en la división química en Reactores discontinuos con servicio de Dímeros más varios aditivos como ácidos grasos, Ácido Fosfórico y resinas. Se instalaron sellos dobles tipo cartucho en configuración cara-espalda con caras en ambos sellos de Carburo de Silicio vs. Carbón, con empaques secundarios de Vitón.

En total se convirtieron tres reactores discontinuos, El tercero fue cambiado a una configuración espalda-espalda de 3.500" de diámetro de sello, el cual fue convertido en un alojamiento de reactor Lightning a partir de un sello John Crane 109. Todos los sellos han dado un buen servicio y todos los equipos nuevos están especificados con la misma marca de sellos.

### **5.1.3) INDUSTRIA ALIMENTICIA (MAIZ)**

1) En la empresa Cargill de México en su planta procesadora de maíz en Atitalaquila Edo. De Hidalgo dos bombas Allis Chalmer 12 x10 x 17 manejando licor saturado de maíz a 62° C y 8 bar de presión a 980 rpm y conteniendo aproximadamente 55% de sólidos en suspensión a través de la fase final del evaporador. Estos equipos tenían instalados sellos tipo cartucho sencillos de resorte único los cuales se atascaban y tenían una vida útil de cuatro a cinco meses. Se instalaron sellos dobles de 3.000"

de diámetro, de resortes múltiples estacionarios, con caras en el sello interno de Carburo de tungsteno contra Carburo de tungsteno, caras de Carburo de silicio contra carbón en el sello externo y empaques secundarios de vitón. Estos sellos se instalaron en octubre de 1995 con un plan API 54 usando agua como fluido barrera a 10 bar. La vida de los sellos es de un año y medio a dos en promedio.

2) En la planta de Productos de maíz (actualmente UNILEVER) en Lerma Edo. de México, en noviembre de 1996 en unas bombas Girdlestone. Estas bombas giran a 3000 r.p.m. y transfieren aceite vegetal caliente con trazas de catalizador de Níquel a través de filtros. El producto está a 210° C de temperatura y 8 bar de presión en la caja del sello. Originalmente tenía instalado un sello de fuelle metálico con cara de Carburo de Silicio corriendo contra una estacionaria de Ni-resist que duraba de 2 a 3 semanas antes de fallar.

Se instalaron sellos dobles de 35 mm de diámetro, de resortes múltiples estacionarios, con caras en el sello interno de Carburo de Tungsteno contra Carburo de Tungsteno, caras de Carburo de Silicio contra Carbón en el sello externo y empaques secundarios en el sello interno de Kalrez y de Vitón en el sello externo. Se instaló un plan API 54, el fluido barrera utilizado es de aceite vegetal y el sello tiene un promedio de vida de 18 meses.

#### **5.1.4) INDUSTRIA MINERA (LODOS ABRASIVOS)**

Por la naturaleza del proceso, en el negocio del procesamiento de minerales el usuario final se encuentra con que tiene que reciclar o deshacerse de los residuos. En Industrial Minera México en Nacoziari, Sonora una de sus plantas tenía un problema con una bomba Warman de plástico en línea para transferencia de residuo de arcilla de China. Este residuo contiene cantidades variables de arena, cuarzo, mica y feldespato. El arreglo original era de un sello de expulsor o sello hidrodinámico que consiste en un pequeño impulsor montado en una pequeña cámara atrás de la carcasa principal y soportado por sellos de labio operando sobre una manga de cerámica, este arreglo duraba no más de dos o tres semanas. Esto incidía en pérdida de producción y reconstrucciones de equipos muy costosas.



Dos fabricantes originales intentaron adaptar un sistema de sellado a esta unidad pero ambas fallaron, entonces nos contactaron para asistencia. Lo primero que se encontró fue que la brida y su alojamiento estaban sujetos a una corrosión excesiva y los componentes externos del sello cartucho estaban contaminados a causa del atascamiento.

La bomba fue convertida con partes estándares Warman y se acomodó un sello sencillo con resortes ocultos y caras de Carburo de Silicio vs. Carburo de Silicio con empaques secundarios en Vitón con buje antichispa para quench. Para terminar con el problema de erosión regresamos al modelo estándar de soporte de brida (Cambiando el alojamiento del expulsor), esto redujo la velocidad del fluido alrededor de las partes metálicas estacionarias del sello.

Esta primera aplicación duró 3 meses por lo que finalmente se instaló un sello sencillo con sello de respaldo de baja presión para utilizar el venteo y drenado a un flujo de aproximadamente 2 litros por minutos a una presión de 2/3 bar. El cambio de ambientación en esta aplicación permitió a la unidad operar por 18 meses sin problemas.

## **5.2) ANALISIS DE FALLAS**

El análisis de fallas de sellos es una herramienta poderosa para el diagnóstico, corrección y prevención de problemas mayores encontrados en el mantenimiento de sellos. Después de hacer acopio de la información disponible que se había recolectado en las diferentes plantas se procedió a elaborar un manual de fallas de sellos mecánicos, lo siguiente es una parte de ese trabajo.

El proceso de selección de un sello se da a partir de información proporcionada por el ingeniero de mantenimiento o por el comprador. En muchos casos el proceso de selección se realiza durante el diseño de la planta y los datos en los cuales se basa son puramente teóricos, incompletos y no toman en cuenta todas las fases de operación de la planta. La mayoría de los problemas de sellado son causados por factores externos al sello, p.ej. cambios en la presión del fluido, temperatura, fluctuaciones en el suministro del fluido sellante debido a variaciones en el proceso, etc. Es casi imposible para el profesional de servicio detectar esas

causas y debe apoyarse adecuadamente en el personal de la planta. Un error cometido durante la selección culmina usualmente en una especificación incorrecta del material y se hace evidente en la inspección posterior a la falla del sello. Los sellos instalados de manera incorrecta tales como un resorte en dirección contraria, un carbón roto o un O-ring prensado se pueden apreciar desde el arranque y también se hacen claramente evidentes en la inspección.

Una vez que se identifica la falla del sello se debe corregirla eliminando la causa que la provoca. Sin embargo esto no es del todo sencillo ya que existen problemas que no es posible solucionar aunque se tenga la falla localizada.

Las fallas que son más frustrantes y difíciles de analizar son las que no tienen ninguna causa aparente, p.ej. fugas después de haber operado un tiempo, fugas a velocidades específicas, en bombas de doble apoyo solo uno de los sellos instalados fuga, etc. Estos son los tipos de falla los cuales requieren ir a través de una serie de chequeos en el equipo y en las condiciones de operación para encontrar la falla o la solución al problema. Este tipo de problemas provocan por lo general vidas cortas de los sellos, (de 1 a 3 meses) y se vuelven repetitivos llegando a ser normales para los encargados durante el transcurso de los años. También se dan a menudo en puntos específicos de un proceso, ya sea en donde las condiciones son más severas, en donde los productos intermedios no son muy conocidos, partes donde pueden variar las condiciones de operación o los equipos no dan el rendimiento teórico para el que están destinados.

Un sello mecánico falla cuando la fuga se vuelve excesiva. A continuación se mencionan las causas comunes de fallas de un sello mecánico.

- Maltrato de los componentes. Esto incluye permitir que los componentes de los sellos se ensucien, se astillen, se raspen o se dañen de otra manera antes o durante el ensamble.
- Ensamble incorrecto del sello. Esto incluye una colocación incorrecta de los sellos en su alojamiento.
- Selección incorrecta del sello. Consiste en seleccionar incorrectamente los materiales o un diseño de sello para la combinación de condiciones de operación.

- Arranque incorrecto. Incluye que cuando se va arrancar un sello doble este no se presuriza antes de arrancar la bomba o correr inadvertidamente el sello en seco.
- Controles ambientales inadecuados. Incluye la omisión de controles ambientales como los planes de lubricación o el flush.
- Contaminación de fluidos. Incluye la presencia de partículas sólidas dañinas en la cavidad del sello.
- Condiciones del equipo pobres. Incluye deflexión de la flecha, vibración, etc.
- Sello desgastado. Cuando un sello ha cumplido su ciclo de vida.

Las cuatro preguntas básicas en el análisis de fallas son:

1. ¿Como se muestra el daño? ¿Es el daño Químico, mecánico o térmico?
2. ¿Cómo afecta el rendimiento del sello?
3. ¿Qué indica el daño acerca de la historia del sello?
4. ¿Cuáles son los pasos correctivos que se deben tomar para eliminar los distintos tipos de daños sin recurrencia?

## **5.2.1) Fallas del sello debido a ataque químico**

Existen diversas clases de ataque químico al cual los sellos son sujetos. Cuatro de los más comunes son los que estudiaremos.

### **5.2.1.1) Ataque Químico**

Los síntomas del primer tipo de fallas que queremos estudiar son partes que aparecen opacas, desmoronadas o perforadas, si se compara el peso y la dureza de las partes dañadas con partes nuevas, se encuentran drásticamente reducidos.

#### **CAUSA**

El ataque Químico es corrosión por el uso de materiales incorrectos para el ambiente Químico. Si la aplicación incluye un sello doble, el sistema de presurización puede estar fallando o el fluido barrera puede estar contaminado.

#### **PASOS CORRECTIVOS**

- Obtener un análisis químico completo del producto en contacto con el sello y mejorar los materiales de construcción en el sello para ese ambiente corrosivo.

- Neutralizar el ambiente corrosivo con el uso de sellos dobles o en el caso de un sello sencillo un "flush" de fuente externa compatible con el producto con buje de restricción al fondo de la caja.

### 5.2.1.2) Corrosión por desgaste

Este tipo de corrosión es probablemente el más común encontrado en sellos mecánicos, provoca fuga debajo del empaque secundario y daña o desgasta esa zona de la flecha o manga. El área afectada aparece picada y brillante comparada con el acabado normal del eje.

#### CAUSA

La causa de la corrosión por desgaste es el movimiento entre dos superficies que normalmente son fijas en relación de una a otra, la causa de este tipo de corrosión en sellos mecánicos es el movimiento constante (oscilación) del empaque secundario sobre la manga o flecha. Este movimiento roza y desgasta el recubrimiento de óxido de metal que en ciertas aplicaciones protege la manga o flecha contra la corrosión adicional.

#### PASOS CORRECTIVOS

Sí esta clase de corrosión es notada, una evaluación de las siguientes opciones esta en orden para reducir o eliminar el problema.

- Eliminar la causa de la vibración excesiva en los empaques secundarios, eso se hace asegurando que el desalineamiento, deflexión y el juego axial del eje en el equipo se mantengan hasta .003" T.I.R. (indicación total), máximo.
- Aplicar recubrimientos protectores de stellite, óxido de cromo u óxido de aluminio directamente debajo del área donde los sellos secundarios se deslizan.
- Mejorar el material de la flecha o manga por otro de más resistencia a la corrosión para que el recubrimiento no sea necesario.
- Eliminar el uso de teflón (anillos estilo "V", cuñas) por O-rings de elastómeros que son menos susceptibles a este tipo de corrosión porque el material es más blando y absorbe internamente parte del movimiento axial del eje.
- Cambiar a un sello estilo "no-empuje" el cual incluye sellos secundarios Estáticos. Ejemplo: diseños de fuelle (Elastómero, teflón o metal).

### 5.2.1.3) Ataque Químico a los O-rings

Se puede sospechar esta clase de ataque si los O-rings están hinchados o si están atascados impidiendo el movimiento axial de la cara rotativa. Este ataque químico a los O-rings también los deja con la apariencia de estar desgastados, endurecidos con ampollas, quebradizos o carcomidos.

#### CAUSA

Las causas de ataques químicos a los o-rings incluyen la selección incorrecta de material, la pérdida o contaminación del fluido barrera.

#### PASOS CORRECTIVOS

Realizar un análisis químico completo del producto en contacto con el sello y una re-evaluación del material del elastómero, con frecuencia la causa es la presencia de vestigios de sustancias que originalmente son ignorados en las especificaciones de los sellos. Si no es el caso considerar un ambiente artificial en cual el sello podría operar (Plan 32, 52,53 o 54).

### 5.2.1.4) Lixiviación

Normalmente causa un incremento pequeño de fuga y un desgaste fuerte en las caras de carbón. Las caras de cerámica o carburo de tungsteno que han estado atacadas de este manera aparecen opacas o sin brillo a pesar de que no tienen recubrimiento. Una prueba de lectura de dureza mostrara que ha disminuido 5 puntos o más en la escala de Rockwell.

#### CAUSA

La lixiviación es causada por ataque químico que acaba con el aglutinante que sostiene al material base, como en metales o materiales cerámicos, este ataque químico puede ocurrir desde unas cuantas diez-milésimas a varias milésimas de pulgada de profundidad y deja las partes irreparables. Como ejemplo tenemos las soluciones de sosa cáustica y Ácido Fluorhídrico que atacan hasta el 5% o más del aglutinante de Silicio libre en las caras de cerámica, el resultado es una proporción de desgaste excesivo en la cara de Carbón. Si el desgaste continúa, las partículas de Óxido de Aluminio que se desprenden de la cara de cerámica causaran más daño por abrasión entre las caras acortando la vida del sello.

## PASOS CORRECTIVOS

- Elevar la calidad del material usando Óxido de Aluminio más puro al 99.5% en aplicaciones cáusticas o de ácido. En el caso del Carburo de Tungsteno con Cobalto que también es atacado con agua y químicos moderados, se puede usar Carburo de Tungsteno con Níquel.
- Usar un diseño que asegure un líquido limpio a las caras como un sello interno, sencillo con un buje al fondo de la caja y el uso de un flush externo o un sello doble.

### 5.2.2) Fallas del sello debidas a la acción mecánica

#### 5.2.2.1) Distorsión de las caras

La distorsión de las caras causa fuga excesiva y es evidente por el desgaste no-uniforme observado directamente en las caras, a veces esta condición no es aparente y es mejor observada después de pulir ligeramente las caras en una lapeadora, entonces los sitios altos aparecen en dos o más puntos alrededor de la cara indicando un desgaste no-uniforme.

#### CAUSAS

- Ensamble o instalación impropia de las partes del sello causando carga o presión no-uniforme en dos o más puntos en la cara, esto ocurre frecuentemente con el uso caras estilo "clamped" o de montaje rígido, donde no hay flexibilidad. Aquí cuando las tuercas de la brida son apretadas de manera desigual, transmiten deflexión directamente a las caras.
- El enfriamiento deficiente puede inducir tensiones térmicas y distorsión en las caras.
- Un acabado deficiente durante el proceso de maquinado de los componentes del sello puede dejar ondulaciones o sitios altos en varios puntos alrededor de la cara.
- Soporte impropio de la brida, esto puede ser resultado de depósitos, basura en la brida o daño físico en la brida que distorsiona el metal y transmite fuerzas no-uniformes a la cara estacionaria del sello.
- Un acabado pobre en la superficie de la cara del alojamiento debido a corrosión o daño mecánico, también puede causar distorsión de la cara.

## PASOS CORRECTIVOS

- Volver a lapear las caras para evitar la causa de distorsión
- Considerar el uso de un montaje flexible en la cara estacionaria para compensar cualquier distorsión en la brida.
- Checar las dimensiones de la brida. Limpiar y checar la cara del alojamiento y el acabado de la brida

### 5.2.2.2) Deflexión de las caras

Esta condición es parecida a la distorsión, produce desgaste irregular en las caras, pero en este caso, es un desgaste continuo en la cara entera (360°) y puede ser cóncavo o convexo, una cara con distorsión convexa resulta en fuga excesiva, mientras una con distorsión cóncava resulta en un torque y calor excesivos. Los sellos con cualquiera de las dos condiciones no son estables bajo condiciones de presión cíclica.

#### CAUSAS

- Soporte impropio de la cara estacionada
- Hinchazón de sellos secundarios
- Operación fuera de los límites de presión del sello mecánico
- Balance inadecuado de las fuerzas hidráulicas y mecánicas en las caras de los sellos.

## PASOS CORRECTIVOS

- Revisar el diseño del sello y sus límites de operación
- Considerar el uso de un montaje flexible en las caras estacionadas
- Cambiar las caras de carbón con materiales con un módulo de elasticidad más alto

### 5.2.2.3) Surcos ampliados

El patrón de desgaste de la nariz en la superficie de la cara es más ancho que la nariz.

#### CAUSAS

Esta condición puede ser causada por desalineamiento de las dos caras del sello, porque el equipo se encuentra en malas condiciones de operación, por deflexión del sello o presión excesiva en los componentes del equipo.

## PASOS CORRECTIVOS

Verificar y ajustar el pilotaje del sello en la brida, así como las condiciones de operación y del equipo.

### 5.2.2.4) Extrusión

La extrusión se aprecia cuando los O-rings u otros sellos secundarios se salen por las aberturas menores de las caras primarias del sello, frecuentemente, estos o-rings o sellos secundarios aparecen cortados o en unos casos pelados.

#### CAUSAS

La extrusión puede ser causada por temperatura excesiva, presión o ataque químico al O-ring ablandándolo, o produciendo excesivas tensiones mecánicas en el O-ring para los claros del sello.

## PASOS CORRECTIVOS

- Revisar la aplicación del material del O-ring y el claro donde va alojado.
- Revisar la compatibilidad química y los límites de temperatura de los empaques secundarios usados.
- Si es necesario instalar anillos antiextrusión.
- Checar y corregir las condiciones del equipo

### 5.2.2.5) Erosión

La erosión deja la cara desgastada en un área localizada, sucede con más frecuencia en la cara estacionaria hasta que se produce distorsión excesiva o hasta que se fractura la cara, ocurre con más frecuencia con caras de Carbón (grafito) pero en condiciones más severas puede ocurrir en otros materiales.

#### CAUSA

La erosión es causada por un flush excesivo o un flush normal que contenga partículas abrasivas, esta condición equivale a un sand-blast en un área de la cara estacionaria.

## PASOS CORRECTIVOS

- Reducir el flush al sello.
- Eliminar los abrasivos del flush con el uso de filtros o separadores ciclónicos.
- Cambiar el material de la cara estacionaria (Carbón) a materiales que resistan erosión como bronce, Carburo de Tungsteno o Carburo de Silicio.



- Relocalizar la abertura del flush o usar una cubierta sobre la cara estacionaria protegiéndola contra la dirección del flush.

#### **5.2.2.6) Desgaste excesivo de los pernos**

Desgaste prematuro de los pernos o ranuras de arrastre. Este desgaste puede ocurrir en los mecanismos de arrastre debido a las cargas excesivas o a grandes desplazamientos entre el mecanismo de arrastre y otras superficies de desgaste. También pueden ocurrir desgastes en alto grado con relativamente poco movimiento si el mecanismo de arrastre no está adecuadamente lubricado.

Ejemplo:

Los mecanismos de arrastre que estén en una atmósfera seca como nitrógeno o aire seco con partículas abrasivas se gastarán con mayor rapidez que mecanismos en un ambiente de aire limpio lubricados con neblina de agua o aceite, condiciones similares ocurren con mecanismos de arrastre en productos limpios contra productos contaminados con abrasivos, pero la causa más común de desgaste en los mecanismos de arrastre es el movimiento radial excesivo del eje, deflexión y vibración del eje que aumenta el desplazamiento en el mecanismo.

#### **PASOS CORRECTIVOS**

- Revisar la condición del equipo y limitar el juego axial, deflexión del eje y cualquier desfase de concentricidad.
- Incorporar o usar pernos endurecidos en el diseño del sello.
- Checar el pilotaje y el centrado de los componentes del sello.
- Considerar diseños de sello que tengan el mecanismo de arrastre en un ambiente mejor de lubricación, como en sellos dobles.
- Revisar los límites de presión del diseño del sello.

#### **5.2.3) Fallas del sello debidas a la acumulación de calor**

##### **5.2.3.1) Fracturas por sobrecalentamiento (Heat-Checking)**

Esto se aprecia por la presencia de fracturas finas y grandes que corren radialmente desde el centro de la cara del sello, estas fracturas raspan las caras de Carbón grafito y otros materiales, causando un desgaste rápido.

## CAUSAS

La fricción que genera el calor es causada por: poca lubricación en las caras, vaporización en las caras, falta de enfriamiento adecuado, enfriamiento o calentamiento súbito y presiones y velocidades excesivas.

## PASOS CORRECTIVOS

- Asegurarse que el sello no esta mecánicamente sobrecargado, checando que un balero o un collar radial no estén dañados, creando así carga excesiva sobre las caras.
- Confirmar que el flujo de enfriamiento y lubricación este disponible para eliminar el calor de las caras.
- Checar las condiciones de operación y asegurarse que están dentro de los límites permitidos del sello.

### 5.2.3.2) Vaporización

Ciertos sonidos ligeros y repentinos, soplos de vapores a través de las caras del sello son conocidos como vaporización, esta causa fuga excesiva y daño en las caras del sello aunque no causa normalmente falla total o catastrófica usualmente acorta la vida del sello. La inspección de las caras que han operado en estas condiciones frecuentemente revela despostillamiento en los diámetros exterior e interior, y picaduras en el área total de la cara.

## CAUSAS

La vaporización es causada cuando el calor generado entre las caras no se remueve eficientemente causando que el líquido entre las caras hierva o flashee convirtiéndose en vapor. La vaporización también es el resultado de operar el sello en líquidos cerca de la presión de vapor en la cámara del sello.

Otras condiciones que pueden producir vaporización son:

- Presión excesiva para un diseño dado
- Deflexión excesiva de la cara
- Enfriamiento y lubricación inadecuado, la vaporización podría ser una indicación que el flush del sello no existe o que el agua de enfriamiento a un cambiador se ha reducido o eliminado.

- No mantener 25°F y 25 PSIG de diferencial de los puntos críticos (punto de ebullición y presión de vapor) del producto en la caja.

#### PASOS CORRECTIVOS

- Mejorar la circulación y el enfriamiento a las caras
- Asegurar que el sello opera a temperaturas y presiones adecuadas, menor que los puntos críticos de ebullición en la caja.
- Asegurar que el diseño es adecuado para la presión y velocidad de operación

#### 5.2.3.3) Ampollas sobre las caras (Blistering)

Estas se aprecian por secciones circulares pequeñas, que aparecen sobre la cara de carbón, esta condición es observada mejor con el uso de un cristal óptico o lapeando un poco la cara, estas ampollas separan las caras durante la operación, causando fuga excesiva. Las ampollas, normalmente ocurren en tres fases.

1. En la primer fase, pequeños levantamientos aparecen en la cara.
2. En la segunda fase, aparecen roturas en patrón de estrella.
3. En la tercera fase, quedan huecos sobre la cara.

#### CAUSAS

La causa exacta de esto, todavía esta en debate. La explicación más aceptada es que fluidos con alta viscosidad (aceite S.A.E. No.10) penetran la cara de Carbón por la porosidad y después de cierto tiempo, cuando la pista se calienta tienden a salir bruscamente durante la operación del sello. Las ampollas ocurren más a menudo en sellos que operan en líquidos de alta viscosidad y que tienen arranques y paros frecuentemente.

#### PASOS CORRECTIVOS.

- Reducir la viscosidad del líquido en la caja, cambiando el líquido (flush externo) o aumentando la temperatura del líquido en la caja.
- Eliminar la frecuencia de arranque y paro
- Sustituir el carbón por material de menos porosidad, como Carburo de Tungsteno, Carburo de Silicio o Bronce.
- Revisar el enfriamiento y la circulación a las caras del sello.

#### 5.2.3.4) Ampollas laterales (Spalling)

Este tipo de daño es semejante al blistering pero no ocurre en las caras sino en superficies como el diámetro exterior, o el reverso de la cara.

## CAUSAS

Al igual que el blistering, es causado por fuerzas térmicas excesivas en un material de carbón, pero el "spalling", aparentemente ocurre con cualquier líquido y es el resultado de humedad repentinamente forzada a salir cuando la pieza es sobrecalentada. Este tipo de ampolla se encuentra comúnmente en sellos que corren en seco. Por lo que este tipo de daño, es una indicación de que el equipo opere sin fluido en la caja por un periodo de tiempo.

## PASOS CORRECTIVOS

Si esta clase de falla ocurre con frecuencia, es conveniente la instalación de un interruptor de presión o de carga para evitar que el sello corra en seco, también es posible instalar un sello doble

### 5.2.3.5) O-Rings sobrecalentados

Cuando los o-rings de elastómeros se sobrecalientan, se endurecen y se hacen quebradizos. Los sellos secundarios de teflón también se deforman, se endurecen y se decoloran, cambiando a negro, azul o café.

## CAUSAS

Esto normalmente es causado por falta de flush en la caja por lo que no hay un enfriamiento adecuado. También es causado por una mala selección de materiales que no soportan la temperatura excesiva en una aplicación.

## PASOS CORRECTIVOS

- Verificar el enfriamiento y el flush en la cámara del sello, incluyendo las líneas de descarga en busca de material atascado y revisar los intercambiadores de calor para verificar que no exista acumulación de sedimentos.
- Aplicar enfriamiento adicional.
- Considerar un elastómero con límites de temperatura más elevados.
- Considerar la aplicación de un sello de fuelle metálico.

### 5.2.3.6) Oxidación y coquización

La oxidación y coquización dejan un barniz, laca o un emplasto abrasivo en el lado atmosférico del sello. Esto puede causar un desgaste rápido de las caras del sello o que se atasquen ya sea sellos de empuje o de no empuje.

## CAUSAS

La coquización es el resultado de una oxidación o ruptura química del producto para formar residuos pesados.

## PASOS CORRECTIVOS

- Instalar una purga de vapor en el lado atmosférico del sello, para arrastrar el lodo acumulado.
- Aplicar un plan API 32 (flush de fuente externa)
- Colocar una chaqueta de enfriamiento o un intercambiador de calor (plan API 22, 23 o 41).
- Reemplazar la cara de Carbón por una cara dura para que resista la acción abrasiva.
- Evaluar el cambio del fluido de transferencia de calor por un fluido que tenga una temperatura de coquización más elevada. Los hidrocarburos deben enfriarse a menos de 121 °C en la cavidad del sello para evitar la coquización y la oxidación. Esta temperatura varía mucho según el fluido manejado. Como ejemplo la oxidación o los límites de coquización para algunos fluidos transferencia de calor están sobre los 177 °C.

## 5.3) RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

A continuación se enumeran algunos problemas que se han presentado a lo largo del desempeño profesional y cuales fueron las soluciones propuestas.

### 5.3.1) Sellos de bombas de circulación de ácido Sulfúrico al 98%

Esta experiencia se dio en la planta de Procter & Gamble en Mariscal y es referida a lo siguiente:

Las fallas de estas bombas que manejan ácido sulfúrico al 98% tienen un impacto adverso muy severo en la producción. Se había recomendado anteriormente un sello Chesterton estilo 155 con brida estándar para flecha de 1.875". El sello era sencillo con caras de Carburo de Silicio contra Carbón grafito, empaques secundarios de Kalrez 4079 y partes metálicas en contacto con el fluido de Alloy 20

## **Análisis del sello**

El Alloy 20 es un material adecuado para este servicio.

La cara de carburo de silicio es un material adecuado para este servicio.

La cara de carbón grafito es inadecuada y por lo tanto poco recomendable para fluidos que tienen poder oxidante como es el caso del Ácido Sulfúrico al 98%. Esto es porque el carbón y su material de impregnación sufren ataque químico que deteriora a la cara de sellado provocando con ello un corto tiempo promedio entre fallas.

La planta Mariscal de P & G tiene experiencia de que los O-rings de vitón y de Kalrez 4079 han sufrido ataque químico del ácido sulfúrico al 98% a pesar de que de acuerdo a Dupont-Dow fabricantes de los materiales, no deberían ser atacados. Sin embargo la literatura también reporta que impurezas en muy pequeñas concentraciones pueden afectar de manera importante la capacidad de ataque químico del ácido sulfúrico al 98%. También es importante mencionar aquí que el vitón y el Kalrez 4079 son atacados por la misma familia de productos inorgánicos como es el agua caliente y materiales alcalinos y algunos productos orgánicos como el Óxido de Etileno y las Aminas.

Los efectos de corrosión se ven agravados por el aumento de temperatura que alcanza el sello, como resultado del tamaño de caja de sello (CBS de DURCO) que en realidad fue diseñada para empaquetadura. El diseño de esta caja limita de manera importante la circulación del fluido que permitiría disipar el calor generado por las caras del sello. No es recomendable eliminar con un "flush" o plan 11, porque cuando se trata de un fluido tan peligroso como el Ácido Sulfúrico al 98%, se genera una condición insegura por el tubing expuesto a un posible daño mecánico accidental.

Todos los sellos mecánicos presentan una fuga, que aunque se trate de cantidades microscópicas, existe. Los resortes del sello instalado se encuentran en el lado atmosférico y están expuestos al Ácido Sulfúrico que produce la fuga microscópica. Así el Ácido Sulfúrico reacciona con la humedad ambiente y las pequeñas cantidades de productos o partículas en el aire, provocando la sulfatación de los resortes. Esta sulfatación produce depósitos que interfieren con la operación de los resortes, provocando falla prematura del sello.

## Resolución del problema

Un producto peligroso como lo es el Ácido Sulfúrico al 98% debe ser manejado con un sello mecánico doble, por requerimientos obligatorios de normas de seguridad y ambientales de aceptación generalizada.

La utilización de un sello mecánico doble, permite mayor continuidad en el servicio ya que se alarga de manera significativa el tiempo promedio entre fallas y además cuando se llegue a presentar eventualmente una falla, típicamente se podrá operar un tiempo más con el sello, permitiendo mayor flexibilidad en la programación del paro.

Contrariamente a lo manifestado la falla de un sello sencillo con un producto como el ácido sulfúrico al 98% exige y provoca el paro inmediato del equipo.

La utilización de un plan 53 con un fluido barrera presurizado nos trae como consecuencia que la película que lubrica las caras del sello se forme de un material lubricante e inerte, en lugar de la película de Ácido Sulfúrico que se forma en el caso de un sello sencillo.

El fluido barrera no puede ser base agua. Debe ser un material inerte al Ácido Sulfúrico y con propiedades lubricantes para las caras del sello. Se recomienda un aceite sintético o mineral como fluido barrera. Como el fluido barrera no puede ser agua no es práctico depender de un termosifón para la disipación del calor generada por las caras del sello. La caja estopero no esta diseñada para sello mecánico y se debe disipar el calor de las caras, por esta razón el sello mecánico dual debe contar con un anillo de bombeo de alta capacidad. Asimismo el tanque para el fluido barrera debe estar equipado con alarmas de presión y de nivel.

El tanque de suministro debe tener la presión 1.5-2 bar por arriba de la de la cámara del sello, y se mantendrá por medio de un regulador de presión para controlar la alimentación de aire comprimido.

La combinación de las caras del sello interno, expuesto al Ácido Sulfúrico al 98% debe ser Carburo de Silicio contra Carburo de Silicio. La combinación de las caras del sello externo debe ser de Carburo de Silicio contra Carbón grafito.

En el caso de los empaques secundarios existe una formulación de Kalrez, llamada Kalrez spectrum 6375 que tiene compatibilidad química significativamente más amplia que el Kalrez 4079 y no es atacada por las sustancias que atacan al

vitón y al Kalrez 4079. Por esta razón los empaques secundarios del sello interno deben ser de Kalrez 6375 y los del sello externo de Vitón.

Se mantiene la utilización de alloy 20 para las partes en contacto con el Ácido Sulfúrico al 98% por ser adecuado. La junta de la brida del sello debe ser en teflón impregnado con fibra de vidrio.

### **5.3.2) Sello de bombas para manejo de sosa al 50%.**

Esta experiencia también se dio en la planta de Procter & Gamble en Mariscala y se refiere a lo siguiente:

Las fallas en los equipos que manejan sosa al 50%, tienen un impacto adverso muy severo en la producción. Al igual que en el anterior la recomendación era un sello Chesterton estilo 155 con brida estándar para flecha de 1.875". El sello era sencillo con caras de Carburo de Silicio contra Carbón grafito, empaques secundarios de Vitón y partes metálicas en contacto con el fluido de SS 316.

#### **Análisis del sello**

El SS 316 no es material adecuado para este servicio.

La cara de Carburo de Silicio es un material adecuado para este servicio aunque es mejor la utilización de Carburo de Tungsteno aglutinado con Níquel, que es el material recomendado para esta aplicación.

La cara de Carbón grafito es poco recomendable para este servicio, porque el Carbón y su material de impregnación pueden sufrir ataque químico que deteriora la cara de sellado disminuyendo el tiempo promedio entre fallas.

El Vitón en este caso está siendo utilizado bajo situación de un claro error de selección, ya que este es inadecuado para productos cáusticos.

Los efectos de ataque químico a la metalurgia, a los empaques secundarios de Vitón y a la cara de Carbón del sello, se ven agravados por la temperatura que alcanza el sello como resultado del diseño de la caja (CBS de DURCO), que en realidad está diseñada para empaquetadura. El diseño de esta caja limita de manera importante la circulación del fluido que permitiría disipar el calor generado por las caras del sello. No es recomendable eliminar con un "flush" o plan 11, porque cuando se trata de un fluido peligroso como la sosa al 50%, se genera una condición insegura por el tubing expuesto a un posible daño mecánico accidental.



Todos los sellos mecánicos presentan una fuga, que aunque se trate de cantidades microscópicas, existe. Los resortes del sello instalado se encuentran en el lado atmosférico y están expuestos a la sosa al 50% que produce la fuga microscópica. La sosa cristaliza sobre los resortes. Estos depósitos interfieren con la operación de los resortes, provocando falla prematura del sello.

### **Resolución del problema**

Un producto peligroso como lo es la sosa al 50% debe ser manejado con un sello mecánico doble, por requerimientos obligatorios de normas de seguridad y ambientales de aceptación generalizada.

La utilización de un sello mecánico doble, permite mayor continuidad en el servicio ya que se alarga de manera significativa el tiempo promedio entre fallas y además cuando se llegue a presentar eventualmente una falla, típicamente se podrá operar un tiempo más con este tipo de sello, permitiendo mayor flexibilidad en la programación del paro.

Además de las consideraciones anteriores, cuando se utiliza un sello sencillo con soluciones concentradas de sólidos solubles en agua se forman cristales entre las caras del sello mecánico por evaporación del agua de la película que lubrica al sello. Estos cristales provocan un desgaste abrasivo que disminuye aun más el tiempo promedio entre fallas, en especial si se trata de la cara de Carbón que es muy sensible a la abrasión.

La utilización de un plan 53 con un fluido barrera presurizado nos trae como consecuencia que la película que lubrica las caras del sello se forme de un material lubricante e inerte, contra una película de sosa al 50% que se forma en el caso de un sello sencillo.

El fluido barrera puede ser agua. A causa de que la caja estopero no esta diseñada para sello mecánico y debemos disipar el calor de las caras, el sello mecánico dual debe contar con un anillo de bombeo de alta capacidad. Asimismo el tanque para el fluido barrera debe estar equipado con alarmas de presión y de nivel.

En el tanque de suministro la presión debe ser 1.5- 2 bar arriba de la cámara del sello, y se mantendrá por medio de un regulador de presión para controlar la alimentación de aire comprimido.

La metalurgia del sello deberá ser en Alloy 20 ya que es un material que resiste bien los productos cáusticos.

La combinación de las caras del sello interno, expuesto a la sosa al 50% debe ser Carburo de Tungsteno contra Carburo de Tungsteno impregnados de Níquel. La combinación de las caras del sello externo debe ser de Carburo de Tungsteno contra Carbón grafito.

Los elementos de sellado secundario deben ser de EPR tanto en el sello interno como en el externo.

### **5.3.3) Bomba de codo ENSIVAL-MORET**

Esta bomba cuenta con un sello mecánico doble, y ha presentado falla prematura en el sello interno. Maneja solución saturada de Cloruro de Sodio (salmuera) con cristales de Cloruro de Sodio en suspensión. Según las hojas de datos el sello interno tiene partes metálicas en acero inoxidable 316 SS el cual no es resistente al ataque de los cloruros. A continuación se presenta el análisis en donde están implícitas las recomendaciones para un mejor funcionamiento.

El sello interno tiene caras de Carburo de Silicio vs. Carburo de silicio, con empaques secundarios en Vitón. El sello externo es de Carburo de Silicio vs. Carbón y empaques de Vitón. Tiene implementado el plan API 62 (Alimentación de agua limpia y filtrada, no presurizada a través de las conexiones de quench y drain.

Si el cristizador opera además como evaporador al vacío, la presión es negativa. La temperatura de operación reportada es de 40°C, la presión negativa del cristizador se estima del orden de 0.7 bar.

La presión en el sello sería de 0.7 menos la presión hidrostática de salmuera, que es del orden de 0.2 bar. El plan 62 es por definición no presurizado. En consecuencia el diferencial de presión entre las caras del sello interno es del orden de 0.5 bar.

En el caso de los sellos dobles, la película se forma del fluido con mayor presión, en este caso agua limpia del plan 62. Sin embargo de acuerdo a recomendaciones de ingeniería de aceptación generalizada, el diferencial recomendado para asegurar que la película entre las caras del sello sea fluido limpio debe ser de cuando menos un bar.

El diferencial algo reducido de 0.5 bar (o menos si la columna hidrostática del líquido es mayor), podría provocar que el fluido de proceso penetre parcialmente entre las caras. Este fluido es la solución saturada de Cloruro de Sodio.

Al enfriarse las caras por la acción de la circulación de agua fría del plan 62, se producen cristales entre las caras del sello que pueden provocar desgaste prematuro por abrasión. Esto es una causa de la falla prematura del sello interno.

Otra posible causa de la falla prematura del sello interno, deriva del hecho de que las bombas de este tipo tienen por su diseño geométrico un índice de deflexión muy alto. Por consecuencia necesitan operar siempre dentro de su zona de mejor eficiencia, porque desviaciones relativamente pequeñas, pueden provocar deflexión en la flecha. Esta deflexión es otra de las causas de falla prematura en el sello.

Por lo anterior es conveniente verificar las condiciones reales de operación de la bomba de codo, en relación con su zona de mejor eficiencia.

El uso de alimentación de agua en el plan 62, provoca un consumo de agua de cuando menos 100 litros por hora, que se traducen en 2.4 metros cúbicos por día, es decir 72 metros cúbicos por mes de operación continua. Esta agua representa un factor extra por el costo del agua limpia y porque agrega carga a la planta de tratamiento.

Es importante hacer notar que la planta nos reporta que la salmuera contiene trazas de Xileno y aminas. El Vitón es compatible con el xileno, pero es atacado por las aminas. Esta es otra causa de falla prematura del sello interno.

#### **5.3.4) Bombas DURCO grupo I para descarga de suspensión de cristales del cristizador**

Estas bombas manejan una solución saturada de Cloruro de Sodio a la temperatura de operación del cristizador el ejemplo anterior, conteniendo cristales en suspensión de Cloruro de Sodio. A continuación se presenta el análisis en donde están implícitas las recomendaciones para un mejor funcionamiento.

Por el hecho de traer partículas en suspensión, debemos verificar que la caja del sello no sea del tipo CBS. Es necesario que sea del tipo FMS cuando menos y FML de preferencia. Si se confirma que la caja es del tipo CBS esta sería una de las causas probables de la falla prematura de los sellos. Se debe verificar el tipo de caja de sello de estas bombas.

La presión en las cajas de sello de las bombas DURCO es definitivamente positiva, a pesar de que el cristizador opera al vacío. Lo anterior ocurre porque la

presión en la caja del sello es del orden de 1.5 a 2.0 bar arriba de la presión de succión, que estimamos en 0.5 bar menos la caída de presión del tubo de succión.

Debido a lo anterior, la solución saturada de Cloruro de Sodio forma la totalidad de la película de fluido entre las caras. Al enfriarse la película por la acción del agua alimentada a través del plan 62, forma cristales entre las caras, que las desgastan prematuramente por abrasión, aun en el supuesto de que sean caras duras. En consecuencia la selección de un sello sencillo con plan API 62 con agua limpia, no es adecuada para este servicio. Se empeora significativamente si la caja del sello es del tipo CBS.

Por otra parte, la utilización de alimentación de agua en el plan 62 provoca un gasto de agua del orden de 50 litros por hora, que se traducen en 1.2 metros cúbicos por día, es decir 36 metros cúbicos por mes de operación continua. Al igual que en acaso anterior esta agua representa un factor extra por costo del agua limpia y porque agrega carga a la planta de tratamiento.

Las partes metálicas del sello no deben ser de SS 316, ya que es susceptible de ataque por cloruros. Las partes húmedas del sello deben ser ya sea de Alloy 20, Monel o Titanio. Es importante verificar la metalurgia del sello.

### **5.3.5) Bombas de manejo de Acrilonitrilo y agua de desecho en la planta de Acrilonitrilo en Petroquímica Tula.**

En la planta de Petroquímica Tula en Atitalaquila Edo. de Hidalgo en el mes de junio de 2003. En esta unidad solo tienen una planta que produce Acrilonitrilo para venta local y exportación, también producen Ácido Cianhídrico pero como Fenolquimia que era su principal cliente cerro sus plantas ahora lo queman. El problema grave eran los sellos mecánicos, los sellos en sus equipos críticos les duraban en el mejor de los casos tres meses pero en el caso particular de la bomba GA-905 les duraban cuando mucho un mes y en el caso de la GA-118 en los dos años anteriores se tuvo que cambiar el sello mecánico una vez por semana. El origen de este problema data desde el arranque de la planta o sea de hace casi veinte años a lo largo de los cuales desfilaron los fabricantes de sellos mecánicos, y se gasto una cantidad considerable de dinero tanto en refacciones como en los paros no programados de la planta. Los sellos que usaban eran John Crane dobles con plan API 54.

Se propuso instalar sellos dobles en cinco equipos que nos fueron asignados por el Ing. Arteaga encargado del mantenimiento mecánico. Los equipos fueron:

- GA-118 marca Ingersoll Rand que maneja Acrilonitrilo crudo
- GA-905 marca Peerless Tisa que maneja agua de desecho
- GA-151 que maneja Acrilonitrilo crudo
- GA-112 marca Peerless Tisa que maneja Acrilonitrilo crudo
- GA-115 marca Peerless Tisa que maneja Agua pobre.

Las condiciones de operación son la temperatura de 90° C y la presión en la caja del sello de 2 bar en promedio en todos los equipos elegidos.

El fluido principal a sellar es Acrilonitrilo crudo que es base de polímeros y la principal dificultad es que polimeriza a 80° C por lo que el fluido de proceso tiene sólidos en suspensión que atascan los resortes del sello mecánico, esta fue una de las razones principales de que los sellos fallaran, otra razón fue que no se mencionaban todos los compuestos que están en el fluido de proceso. Uno de estos materiales es el Ácido Cianhídrico que esta presente en casi todos los equipos y no se había mencionado con anterioridad, esta sustancia ataca al aglutinante del Carburo de Tungsteno y provoca que el sello falle. En todos los equipos propuestos excepto la GA-905 se maneja Acrilonitrilo crudo con Ácido Cianhídrico con sólidos en suspensión, en la GA-905 se maneja agua de desecho con Acrilonitrilo crudo, polímero, Amoníaco, Ácido Cianhídrico y trazas de Ácido sulfúrico aparte de sólidos en suspensión.

La solución fue la siguiente:

- Sistema de sellado dual de un sello categoría A tipo A con arreglo 3 (plan API 53A)
- Caras de sello monolíticas, doblemente balanceadas hidráulicamente en ambas direcciones con diseño especial para minimizar el stress y reducir el desgaste de las caras. Los resortes deben estar aislados del producto para evitar el atascamiento, colocados en el lado estacionario y estar fabricados en Hastelloy C.
- El sello cuenta con anillo de bombeo integral bidireccional con el propósito de llevar el fluido barrera hacia las caras de los sellos. Con una adaptación de

deflector para dirigir el fluido barrera hacia la parte interna de las caras del sello primario.

- Caras de Carburo de Silicio vs. Carburo de Silicio en el sello interno y de Carburo de Silicio vs. Carbón grado Premium en los sellos externo.
- Empaques secundarios en Kalrez 6375 en el sello interno y de Aflas en el sello externo.
- Se instaló un tanque de lubricación de 10 litros con serpentín de enfriamiento y presurizado para el Plan 53A.

Estos sellos se instalaron en agosto del año anterior y no han tenido fallas hasta la fecha, la inversión inicial ha quedado justificada y fui felicitado por las autoridades del Corporativo de PEMEX Petroquímica por la ayuda que se les dio para la resolución de sus problemas. Asimismo el Ing. Javier Arteaga presentó este caso en la reunión anual de jefes de especialidad celebrada en las oficinas del Corporativo en mayo del año en curso.

#### **5.4) CAPACITACION**

En la labor del representante técnico de ventas, uno de los principales puntos del servicio es la capacitación a los clientes. Se ha impartido capacitación a lo largo del desempeño profesional en las diferentes plantas en que se han ofrecido los servicios. El conocimiento de los sellos mecánicos no es un tema que se puede encontrar en los libros de texto y las lecturas especializadas es muy difícil encontrarlas y cuando se encuentran son caras y vienen en otros idiomas lo que dificulta el acceso del personal de las diferentes industrias a estos temas.

Los diferentes fabricantes ofrecen seminarios completos sobre sellos mecánicos, pláticas, conferencias y también entrenamiento en las plantas de los clientes. Estos seminarios benefician normalmente al individuo y a la compañía en cuestión, ya que tienen a su alcance información que no pueden conseguir de otra manera. Estos programas están diseñados para el siguiente personal:

- Todos los responsables de la selección, aplicación o compra de sellos mecánicos.
- Ingenieros de diseño, mantenimiento mecánico, de plantas y operación.
- Especialistas en equipo rotatorio.
- Personal de supervisión de mantenimiento.

- Especialistas en mantenimiento de sellos mecánicos de la planta.

Son diversas las ventajas que se obtienen con estas pláticas, entre estas tenemos:

- Ganar una mejor comprensión de la tecnología de los sellos mecánicos.
- Minimizar los tiempos de paro en los equipos y reducción de costos por medio de la selección y aplicación adecuada de los sellos.
- Mejorar la vida del sello por medio de la instalación, mantenimiento y reparación adecuados del mismo.
- Eliminar los problemas periódicos por medio del diseño y operación adecuados del sistema.
- Reducir las pérdidas de producción por medio del diseño y operación adecuados del sistema.
- Comprender los sistemas complejos requeridos por las regulaciones ambientales y los programas de conservación de energía.

## 5.5) COMERCIALIZACION Y COSTO

### 5.5.1) Comercialización

La labor realizada en esta parte ha ido desde la atención directa a los diferentes clientes, primero los asignados, tanto dando servicio a clientes ya establecidos como a clientes nuevos o lo que se conoce "picar piedra". Esta labor se realizaba con vehículo proporcionado por la empresa y se atendía un promedio de 5 clientes por día, ofreciendo asesoría técnica tanto en la selección y aplicación de los sellos como en el análisis de fallas y la resolución de los problemas, así mismo se auxiliaba en labores de cobranza y de entrega en el caso de clientes foráneos.

Inicialmente trabajaba de acuerdo a un plan estratégico que se me proporcionaba teniendo que elaborar reportes mensuales de alcance de objetivos y estatus de los diferentes clientes.

Posteriormente y hasta la fecha en el desempeño del cargo de Gerente de Ventas la ocupación principal ha sido la elaboración de planes estratégicos, manejo de personal entre los que se cuentan vendedores técnicos, secretarías, auxiliares de mercadotecnia etc., así como la elaboración de cartera, asignación de clientes y evaluación de los resultados de las ventas.

## 5.5.2) Costos

Esta parte depende primordialmente de la comercialización ya que es en base a esta que se fijan precios, tanto a los productos de línea como a productos especiales y de nuevo desarrollo, se dan descuentos y en general junto con el análisis que viene a continuación se fijan las políticas de precios de las empresas.

### 5.5.2.1) Análisis del mercado en México

El mercado de sellos mecánicos en México según estudios realizados por la compañía Technomics Consultants International en el año de 1992 se estimaba en aproximadamente \$200,000,000.00 de pesos. Estimaciones realizadas el año pasado por compañías fabricantes de sellos consideraban que el mercado se había triplicado esto es había llegado a \$600,000,000.00 de pesos. Esta cifra es muy engañosa ya que la industria en México no ha crecido sino que más bien ha entrado en recesión desde hace casi diez años y exceptuando algunos proyectos de ampliación y mejora en las refinerías de Cadereyta y Tampico-Madero y en Cantarel en la sonda de Campeche, de lo único que sabe es que muchas industrias han cerrado o han sido absorbidas o fusionadas con y por otras.

¿Cuál es entonces la razón para ese misterioso crecimiento del mercado de los sellos mecánicos en México? Vamos a considerar primero que la publicación del estándar API 682 contribuyó al aumento del precio de los sellos mecánicos. Esto fue al exigir la norma mejores materiales, diseños más sofisticados y arreglos más elaborados el costo del sello mecánico se elevó dramáticamente, como ejemplo tomemos el precio de un sello sencillo tipo PTO que antes del API 682 costaba entre \$15,000.00 y \$20,000.00 pesos, después del API 682 el costo de un sello para el mismo equipo fue de = \$ 125,000.00 pesos lo que significa un incremento de más de seis veces el precio original. Claro que esto garantiza en una vida útil del sello de al menos tres años de operación continua, pero sin embargo esto es teóricamente ya que en la realidad la gran mayoría de los Ingenieros dicen que los sellos siguen durando un año en promedio aunque esto no es achacable al sello sino a los equipos que en la mayoría de los casos son obsoletos o están en pésimas condiciones.

Otra cuestión que se puede considerar es que se ha implementado el cambio de sellos sencillos a sellos dobles por consideraciones ambientales principalmente y por las aseguradoras en segundo término, esto aparte de elevar el costo del sello



implica el gasto de los accesorios como el tanque de suministro, sistema de presurización etc. Todo esto contribuye a elevar el costo total del sello aproximadamente 10 veces más. En la mayoría de las dependencias de Petróleos Mexicanos se han estado cambiando los sellos sencillos por dobles siendo otra razón por la que el mercado haya crecido en apariencia tanto. En los centros petroleros donde se han realizado estos cambios de sellos sencillos a sellos dobles el tiempo promedio entre fallas aumento hasta el punto de convertirse en tiempo promedio entre mantenimientos preventivos, sin embargo como lo mencione en el párrafo anterior esto solo ha sucedido con los equipos nuevos.

#### **5.5.2.2) Análisis de la situación en la industria**

La reparación de sellos mecánicos instalados en bombas centrífugas forma parte importante del costo total del mantenimiento en la Industria del petróleo así como en otras muchas industrias de proceso. Analizando los datos obtenidos en diversas plantas concluimos que del 50 al 70% de la labor de mantenimiento en las bombas se inicia por la falla de un sello mecánico.

El costo de reemplazar componentes desgastados de un sello mecánico es en general de tres a cuatro veces el costo de los componentes en sí, debido a la especialización de la mano de obra requerida y al reemplazo de elementos secundarios ajenos al sello como son baleros, esto sin tomar en cuenta que las refacciones de un sello mecánico son más costosas que el sello completo nuevo. Se maneja una cifra de \$30,000.00 pesos como el costo típico de reparación de un sello mecánico en una bomba API de tamaño mediano sin que el mismo sello sea API 682. En algunos casos esta misma cantidad podría ser el equivalente a la adquisición de un sello mecánico nuevo de tecnología de punta, tipo cartucho, lo que facilitaría la instalación y mantenimiento además de que reduciría el tiempo promedio entre fallas. Si consideramos que una refinería típica tiene una población de bombas desde 800 a 3000 unidades. La recuperación de la inversión por mejorar la vida útil de los sellos mecánicos es evidente.

Una refinería de petróleo en México mantiene en sus almacenes hasta cinco millones de pesos en refacciones para sellos mecánicos. El costo financiero de almacén se calcula en alrededor del 20% anual.

## 6) PROBLEMÁTICA Y DISCUSION

La mayoría de las compañías que fabrican sellos son extranjeras, en México solo tenemos una compañía de regular importancia que le venda a PEMEX y a la industria y muchas compañías pequeñas que por lo general trabajan en sitios muy pequeños. A pesar de que la tecnología de fabricación de los sellos mecánicos no es muy complicada, no hay en México un desarrollo en ese sentido, PEMEX prefiere comprar a los fabricantes extranjeros a precios muy elevados en lugar de ayudar a los fabricantes nacionales a que desarrollen una tecnología propia y así poder equilibrar costos.

La industria química privada en México es el caso contrario ya que por la carencia de medios que sustenten mejoras tecnológicas, adquieren lo más barato y ponen en disputa a fabricantes nacionales que por lo general no cumplen con normas de calidad en su fabricación, con lo que se torna imposible implementar un sistema de calidad en sus empresas y al contrario los materiales de fabricación que utilicen serán los de la peor calidad.

Así en México tenemos una situación que parece callejón sin salida ya que por un lado tenemos a los fabricantes extranjeros "originales" que abusan en sus precios con el pretexto de que tienen normas de calidad, y por otro lado tenemos a los fabricantes nacionales o "piratas" que no tienen sistemas de calidad ni tecnología propia y que por lo general participan del mercado con unos precios bajísimos o corrompiendo a los clientes.

En México, ni en las universidades ni en la industria existe investigación en el área de equipos rotatorios ni en equipos de bombeo ni en sellos mecánicos como tampoco en tribología, situación que nos hace depender por entero de otros países que aunque no tienen mucho desarrollo, cuando menos tienen más que nosotros lo que les permite competir a nivel internacional o resistir las crisis económicas en la actualidad. Es urgente comenzar a impulsar líneas de investigación en este segmento ya que sin temor a exagerar es el que mueve en gran medida la economía de una nación.

Se han instalado sellos mecánicos en las diferentes refinerías e industrias en México desde 1960 hasta la fecha. El diseño de los sellos mecánicos y la tecnología de los materiales aplicados en los mismos han evolucionado en este periodo, esto permite esperar un incremento en el promedio de vida útil de los sellos que va desde un factor de dos o tres hasta incrementos de diez veces en aplicaciones específicas. Lo ideal es lograr las 25,000 horas que exige el API 682.

Los usuarios principalmente los de la industria privada han reaccionado con lentitud en la incorporación de los beneficios del cambio tecnológico, y muchos continúan operando sellos con diseños y materiales obsoletos desde hace veinte años, reemplazando componentes de acuerdo a la especificación original que normalmente esta retrasada hasta cuatro generaciones de la actualidad.

No hay que señalar culpas, basta decir que la omisión se detecta en ambos lados: el operativo y el fabricante de sellos mecánicos. Lo que se requiere es una estrecha colaboración entre el fabricante de sellos y el usuario hasta lograr que los sellos mecánicos instalados lleguen al rendimiento esperado de 25,000 horas con tecnología actualizada, beneficiándose mutuamente de una operatividad más segura y eficiente.

## 7) CONCLUSIONES

Al desarrollar este trabajo el objetivo principal aparte de los objetivos generales era el de poner de manifiesto la importancia que tienen los sellos mecánicos en prácticamente todos los ámbitos de nuestra vida (El costo y el desperdicio del agua se elevaría de no ser por estos mecanismos), ya que los encontramos en la industria alimenticia, la industria minera, la industria química, la industria textil, la industria nuclear, en la industria del petróleo, etc. Creo que este objetivo fue totalmente logrado y creo que este trabajo puede provocar el interés para que en un futuro próximo se desarrollen líneas de investigación en cualquiera de las áreas que se muestran en este trabajo.

Uno de los objetivos era el de describir la importancia de los elementos y accesorios que componen e intervienen en los sistemas de sellado. También fue cumplido en su totalidad y espero que despierte el interés para futuros trabajos.

La Tribología es una ciencia nueva y un punto atractivo para el nuevo profesionalista, no profundicé mucho en este tema aunque se cumplió el objetivo de mencionar algunos aspectos importantes, pero creo que independientemente de este trabajo esta ciencia se debe dar a conocer a las nuevas generaciones ya que tiene una gran importancia en el desarrollo de la sociedad.

También se explico lo que es la asesoría técnica y se elaboro el informe de trabajo describiendo la correcta selección, aplicación y análisis de fallas de los sellos mecánicos.

Todos los objetivos se cumplieron y esto fue gracias al desempeño profesional que ha sido cumplido de una manera adecuada y con entusiasmo, tratando de aplicar todo lo aprendido a lo largo de mis estudios, y adquiriendo una experiencia invaluable para mi desarrollo como ser humano.

## 8) BIBLIOGRAFIA

- 1) Adams, William V. "Troubleshooting mechanical seals" from Chemical Engineering by McGraw-Hill Inc. New York, N.Y. USA, 1983
- 2) Adams, William V. "Sealing off fugitive Emissions" from Chemical Engineering by McGraw-Hill Inc. New York, N.Y. USA, 1991
- 3) Adams, William V. "High Temperature sealing" published by Durametalllic Corp." Kalamazoo Mich. USA 1985.
- 4) Adams, William V. "Control fugitive emissions from mechanical seals" from Chemical Engineering progress from The American Institute of Chemical Engineers USA, 1991
- 5) Adams William V., Waling Lee A., Dingman Randy R., Parker Joseph C. "The role of off-design pump operation on mechanical seal performance" from Proceedings of 11<sup>th</sup> International Pump Users Symposium 1994
- 6) Adams, W. V., *et. al.*, «Guidelines for Meeting Emissions Regulations for Rotating Machinery with Mechanical Seals». Published by Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Park Ridge Illinois, USA, 1990
- 7) Battilana Raymond E. "Better seals will boost pump performance" from Chemical engineering by McGraw-Hill Inc. New York, N.Y. USA, 1989
- 8) Binder, R.C. "Mecánica de fluidos" Ed. Trillas México 1978 (Reimp. 1991)
- 9) Beck T.R. "Zeta Corrosion of mechanical Seals" Electrochemical Technology Corp. Seattle, Washington USA 1982
- 10) Boyson Scott. "Keeping Centrifugal Pumps Battle-Ready" from Chemical Engineering by McGraw-Hill Inc. New York, N.Y. USA, 2002
- 11) API Publishing Services "Centrifugal Pumps for Refinery Services"; API Standard 610 9<sup>th</sup> Ed., Washington D.C. USA, 2003
- 12) ASME Publishing Services "Centrifugal Pumps for Chemical Process"; ASME Standard B73.1. and B73.2 New York, USA, 1991
- 13) Crane Co. Ed. "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías" edición en español de "Flow of fluids Technical paper 410". McGraw Hill/Interamericana de México, México 1989
- 14) Durametalllic Corp. Ed. "The sealing technology guidebook" Kalamazoo Mich. USA 1994.
- 15) E G & G Sealol Ed. "Seal and Survive" 2<sup>nd</sup> Ed. Cranston, RI, USA 1991

- 16) Flexibox International. Ed. "Flexibox International Technical Manual" 2<sup>nd</sup> Ed. Manchester England. 1990
- 17) Flexibox International. "Mechanical seal selection guide for refinery applications" Manchester England. 1992
- 18) Fluid sealing Association. Ed. "Compression Packing Handbook" Philadelphia PA, USA 1990
- 19) Garay, Paul N., "Pump Application Desk Book" 3<sup>rd</sup> Ed. Published by The Fairmont Press, Inc. Lilburn, GA, USA, 1996
- 20) "The INTECH Pump Book" Published by International Technical Services, Kalamazoo, Mich., USA 1990.
- 21) Kuzma D.C., "The liquid-gas interface in grooved face seals" Department of mechanical Engineering California St. University, Fresno California USA 1982
- 22) Lebeck Alan O. "Principles and design of mechanical face seals", Interscience, John Wiley and sons, Book and Disk edition, USA, Septiembre 1991.
- 23) Martínez, F. "La Tribología ciencia y técnica para el mantenimiento" Ed. Limusa Noriega, México 1996
- 24) Mayer E. "Mechanical Seals for low-temperature seawater injection pumps" F. Burgmann Dichtungswerke GmbH & Co. Wolfratshausen, West Germany 1982
- 25) McNaughton, Kenneth Ed. "Bombas, selección, uso y mantenimiento" edición en español de "The Chemical engineering guide to pumps" McGraw Hill/ Interamericana de México S.A. de C.V. México 1989.
- 26) Muller Heinz K., Nau Bernard S. "Fluid Sealing Technology", Ed. Marcel Dekker, USA 1998.
- 27) Nailwal, T.S., Sinha P. and Singh C., "Radial and frictional forces in misaligned radial face seals with a non-newtonian fluid" Indian Institute of Technology Kanpur, India, 1982
- 28) Peng, W.W. and Cheng, L-C., "Effects of concentric surface waviness on leakage between rotating disks" Wichita St. University Wichita Kansas. USA 1982.
- 29) "Pump handbook problems: Causes and cures" reprinted from Hydrocarbon Processing. Gulf Publishing Company, Houston Texas. USA 1982
- 30) API publishing Services "Shaft Sealing Systems for Centrifugal and Rotary Pumps" API Standard 682 2<sup>nd</sup> Ed. Washington D.C. USA, 2002.