

620.0046  
CHI  
f.2



# **Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**“Mejoramiento de Equipos rotativos y  
de los procesos en la Industria”**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la Obtención del Título de:**

**INGENIERO MECANICO**

**Presentada por:**

**Iván Javier Chiang Mawyin**

**Guayaquil - Ecuador**

**Año - 2002**



## AGRADECIMIENTO

- A Dios por la vida que me ha dado y por permitirme terminar mi carrera.
- A mis Padres por la educación que me han dado.
- A mi esposa, quien siempre ha estado junto a mí y me ha apoyado sin restricción alguna.
- Al Ing. Ernesto Martínez, quien acertadamente dirigió mi tesis de grado.
- Al Ing. Francisco Andrade, por su desinteresado apoyo.
- Al Ing. Juan Aráuz, quien siempre me impulsó a culminar mi carrera.



## DEDICATORIA

A Dios.

A la memoria de mi Padre.

A mi madre querida.

A mi amada esposa por acompañarme siempre.

A mis amadas y preciosas hijas.


A mis hermanos.




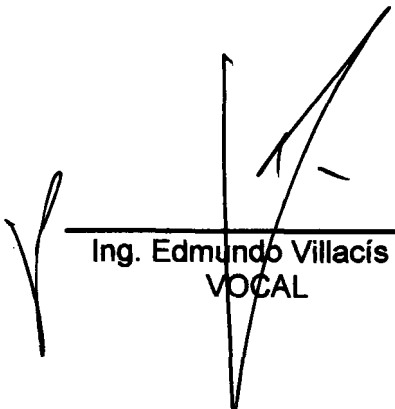
## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



  
\_\_\_\_\_  
Ing. Eduardo Rivadeneira P.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Ernesto Martínez L.  
DIRECTOR DE TESIS

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Francisco Andrade S.  
VOCAL

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Edmundo Villacís M.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de ésta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



  
Iván Javier Chiang Mawyin



## **RESUMEN**

En esta tesis se analizan las causas de las fallas y las prácticas de mantenimiento en los equipos rotativos (exclusivamente en los motores eléctricos y las bombas centrífugas) que se practican hoy en día en la mayoría de las industrias, las cuales siguen, en su concepto básico, siendo las mismas que las que se han practicado desde hace mucho tiempo atrás, y que en la mayoría de los casos consiste simplemente en cambiar el elemento dañado por uno nuevo, quedando el equipo en las mismas condiciones iniciales anteriores, pero también expuesto a las mismas situaciones que causaron su deterioro.

El objetivo principal de esta tesis es, ofrecer un plan de mejoramiento de los equipos rotativos, ofreciendo las alternativas que existen a lo expuesto anteriormente, y pasar de ser unos simples ingenieros dedicados a cambiar piezas, a ser unos verdaderos ingenieros de mantenimiento. Al eliminar las causas que producen fallos en los equipos analizados, se logrará que estos trabajen mejor y por mucho más tiempo, que es la tendencia que se está imponiendo en muchos países, así como obtener una mayor rentabilidad económica. Cabe indicar que si bien es cierto nos centramos en los motores eléctricos y las bombas centrífugas, por ser estos los equipos rotativos de mayor presencia en la industria en general, la metodología seguida puede aplicarse a



todos los demás equipos, e incluso, me atrevería a decir, que es aplicable a nuestra vida diaria.

Finalmente se expone la teoría del Seis-Sigma, la cual busca mejorar y corregir los procesos que se dan en una industria, con el fin de agregarle confiabilidad y aumentar la calidad de los productos, bajando considerablemente los costos de mantenimiento y reduciendo los errores a casi cero. En síntesis, lo que se busca con esta teoría, que ya se la ha puesto en práctica en algunas industrias, es obtener productos con verdadera calidad al más bajo costo y elevar grandemente las utilidades de las industrias que la apliquen.



## INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGIA.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	X
INDICE DE PLANOS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPITULO 1</b>	
1. ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS ROTATIVOS.....	2
1.1. Definición de equipos rotativos .....	2
1.1.1. Motores eléctricos .....	2
1.1.2. Bombas centrífugas .....	4
1.2. Condiciones de operación .....	5
1.3. Causas principales de fallas .....	7
1.3.1. Rodamientos .....	9



1.3.2.	Factor de deflexión del eje .....	15
1.3.3.	Empaquetaduras .....	20
1.3.4.	Sellos mecánicos .....	27
1.3.5.	Deterioro en la estructura .....	31
1.4.	Prácticas comunes de mantenimiento .....	34
1.5.	Tiempo entre paradas .....	35
1.6.	Costos .....	36

## CAPITULO 2

2.	MEJORAS PROPUESTAS PARA EXTENDER LA VIDA ÚTIL Y AUMENTAR EFICIENCIA EN LOS EQUIPOS ROTATIVOS .....	38
2.1.	Selección de los equipos .....	38
2.2.	Eliminación de las causas de fallas .....	39
2.2.1.	Rodamientos .....	43
2.2.2.	Factor de deflexión del eje .....	46
2.2.3.	Empaquetaduras .....	48
2.2.4.	Sellos mecánicos .....	53
2.2.5.	Protección de la estructura de los equipos .....	59
2.3.	Prácticas de mantenimiento .....	62
2.4.	Tiempo entre paradas .....	63
2.5.	Costos .....	63

## CAPITULO 3

3.	MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS: TEORIA DEL SEIS SIGMA.....	66
----	--	----

3.1.	Concepto del Seis Sigma .....	66
3.2.	Historia del Seis Sigma .....	68
3.3.	Perspectiva del Seis Sigma .....	70
3.4.	Variación en los procesos .....	73
3.5.	Diferencia entre calidad tradicional vs. Seis Sigma .....	78
3.6.	El costo de la calidad .....	80
3.7.	Ejemplos .....	82
3.8.	Preguntas referentes al Seis Sigma .....	88
3.9.	Objetivos y resultados tangibles .....	92

#### CAPITULO 4

4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	94
	APÉNDICE A .....	99
	APÉNDICE B .....	100
	APÉNDICE C .....	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	102

## ABREVIATURAS

ANOVA	Análisis de la Varianza
ANSI	Instituto Americano de Normas y Estandarización
API	Instituto Americano del Petróleo
ARC	División de compuestos cerámicos de la A.W. Chesterton Co.
BEP	Punto Máximo de Eficiencia
BSC	Cuadro de Mando Integral
c.a.	Corriente Alterna
c.c.	Corriente Continua
CIP	Procesos de Mejora Continua
CTQ	Elementos Críticos para la Calidad
DoE	Diseño de Experimentos
DPMO	Defectos por Millón de Oportunidades
FMEA	Realización de los Análisis Modos y Efectos de Fallas
MTBF	Tiempo Promedio entre Fallas
SCRAP	Desperdicio
SPC	Control Estadístico de Procesos
TQM	Método de la Calidad Total
VOC	Voz del Cliente



## SIMBOLOGIA

L	Longitud del Eje entre el Impeler y el Rodamiento
$\Delta$	Deflexión del Eje
P	Carga
E	Módulo de Elasticidad
D	Diámetro del Eje
$\Delta K$	Diferencial de Kilovatios
HP	Potencia del motor
$\epsilon a$	Eficiencia actual (luego del rebobinado)
$\epsilon O$	Eficiencia original del motor
Hrs	Horas
Hrs / años	Horas de trabajo del motor por año
KwH	Kilovatio - Hora
\$ / Kwh.	Costo del kilovatio – hora
L/D	relación de Esbeltez
Psi	Libras por Pulgada Cuadrada
Cb	Carbón
Cr	Cerámica
TC	Carburo de Tungsteno
SC	Carburo de Silicio
$\sigma$	Nivel de calidad Sigma
S	Desviación Estándar
$\Sigma x$	Sumatoria de los Valores de x
n	Número de Datos
ppm	Partidas por Mes
rpm	Revoluciones por minuto

## INDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1. 1	Partes principales de un motor eléctrico .....	4
Figura 1. 2	Partes principales de una bomba centrífuga.....	5
Figura 1. 3	Punto de máxima eficiencia .....	7
Figura 1. 4	Fuentes de contaminación en una caja de rodamientos .....	13
Figura 1. 5	Tiempos de vida de rodamientos de CR vs International .....	14
Figura 1. 6	Contaminación con agua reduce la vida de los rodamientos significativamente .....	15
Figura 1. 7	Flexión del eje .....	16
Figura 1. 8	Derivación de la fórmula del factor de deflexión .....	16
Figura 1. 9	Arreglo típico de la caja de estoperos y descripción de sus partes .....	20
Figura 1.10	Transmisión de la fuerza de apriete del prensa-estopas hacia la cajera y el eje.....	21
Figura 1.11	Pérdida del lubricante por la compresión de la empaquetadura .....	24
Figura 1.12	Fricción entra la empaquetadura y el eje .....	24
Figura 1.13	Distribución de la presión del prensa estopas sobre los anillos de empaquetaduras .....	25
Figura 1.14	Arreglo típico de los anillos de empaquetadura con anillo de linterna .....	26
Figura 1.15	Desplazamiento del anillo linterna por el apriete continuo del prensa estopa .....	27
Figura 1.16	Componentes básicos de un sello mecánico.....	28
Figura 1.17	Problemas con sellos comunes de componentes .....	31
Figura 1.18	Las partículas se depositan entre las crestas del fuelle dificultando su accionar .....	31
Figura 1.19	recubrimientos típicos utilizados para proteger las superficies contra el deterioro .....	33
Figura 2. 1	Limpieza de un motor eléctrico en funcionamiento.....	41
Figura 2. 2	Sistema de barrera de la contaminación .....	44
Figura 2. 3	Copa automática de lubricación .....	45
Figura 2. 4	Protección y lubricación constante de rodamientos con grasa .....	46
Figura 2. 5	Factor de deflexión $L^3/D^4$ .....	47
Figura 2. 6	Ejemplo de cómo reducir de una manera simple el factor $L^3/D^4$ .....	48

Figura 2. 7	Ubicación del anillo linterna en el fondo del estopero para evitar su desplazamiento .....	50
Figura 2.8	Spiral Trac con empaquetaduras.....	51
Figura 2.9	Método recomendado para el corte de los anillos de empaquetadura .....	52
Figura 2.10	Manera de instalar los anillos de empaquetadura .....	53
Figura 2.11	Sello mecánico con los resortes aislados del fluido .....	56
Figura 2.12	Elastómeros del sello no se desliza sobre el eje .....	57
Figura 2.13	Sello mecánico de cartucho .....	58
Figura 2.14	Spiral Trac con Sello Mecánico.....	59
Figura 2.15	Composición de los compuestos poliméricos .....	60
Figura 2.16a	Diseño de compuesto con refuerzo cerámico para abrasión severa .....	61
Figura 2.16b	Diseño de compuesto con refuerzo cerámico para abrasión severa .....	61
Figura 2.17	Carcaza de bomba e impulsor recubiertos con compuestos poliméricos .....	62
Figura 2.18	Reducción del costo del mantenimiento total .....	64
Figura 2.19	Costos totales de la bomba .....	64
Figura 2.20	Energía ahorrada durante Vida de la Bomba.....	65
Figura 3.1	Curva de variación para un nivel tres sigma.....	67
Figura 3.2	Curva de variación para un nivel seis sigma.....	67

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Factores de deflexión típicos para bombas ANSI.....	17
Tabla 2 Diferencias entre costo tradicional y Seis Sigma .....	79
Tabla 3 El costo de la calidad, como porcentaje de las ventas .....	82
Tabla 4 Gastos incurridos en el mantenimiento de una bomba previo a las mejoras aplicadas.....	85
Tabla 5 Gastos incurridos en el mantenimiento de una bomba luego de la implementación de mejoras.....	86
Tabla 6 Gastos a incurrirse en el mantenimiento de una bomba si se implementaran la totalidad de las mejoras propuestas.....	88

## INDICE DE PLANOS

	Pág.
Plano 1 Cajera con anillos de empaquetadura.....	97
Plano 2 Cajera con sello mecánico.....	98



# INTRODUCCIÓN

Los equipos rotativos que más existen a nivel mundial en la industria en general, son el motor eléctrico y la bomba centrífuga, llegando incluso a considerárseles como un solo equipo, debido a que en un buen porcentaje se encuentran unidos mediante un acople o matrimonio, dependiendo el uno del otro. Así mismo, representan una parte muy importante del proceso de una industria, siendo en muchos casos la parte principal. Debido a esto, la operación y el mantenimiento de estos equipos resulta crítico.

El motor eléctrico y la Bomba centrífuga al ser grandemente utilizados, incluso 24 horas al día en muchas ocasiones, al mover los fluidos más difíciles y en condiciones muy variables, están sujetos a muchos factores que inciden en la pérdida de la eficiencia, pérdidas del fluido bombeado, consumo alto de energía, costos altos de mantenimiento y pérdidas de la producción.

El objetivo de este trabajo es ofrecer una guía de mejoramiento de estos equipos, con la que podremos protegerlos mejor contra el deterioro, eliminar o minimizar las pérdidas de fluidos, mantenerlos operativos y confiables por mucho más tiempo, y bajar los costos de mantenimiento. Así mismo se presenta la teoría del Seis-Sigma como una introducción a ser estudiada más a fondo, la cual busca corregir y mejorar los procesos presentes en la industria minimizando los errores, reducir los costos de mantenimiento, obtener productos de mayor confiabilidad y calidad, y finalmente elevar las utilidades de las empresas que la implementen.

# **CAPITULO 1**

## **1. ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS ROTATIVOS.**

En una industria están presentes una gran cantidad de maquinarias y equipos que unidos entre sí, forman una gran cadena (proceso) con la finalidad de llegar a un producto final. Dentro de éstos equipos un gran porcentaje son los equipos rotativos, que en muchos casos resultan ser la parte principal de esta cadena, por lo cual se analizará su operación y mantenimiento.

### **1.1. Definición de equipos rotativos.**

Básicamente a un equipo rotativo se lo denomina así porque su elemento principal rota. A nivel mundial, los equipos rotativos que más existen en la industria y en los cuales se va a centrar este análisis, son el motor eléctrico y la bomba centrífuga, en su orden, por lo que a continuación se da una breve definición de ellos:

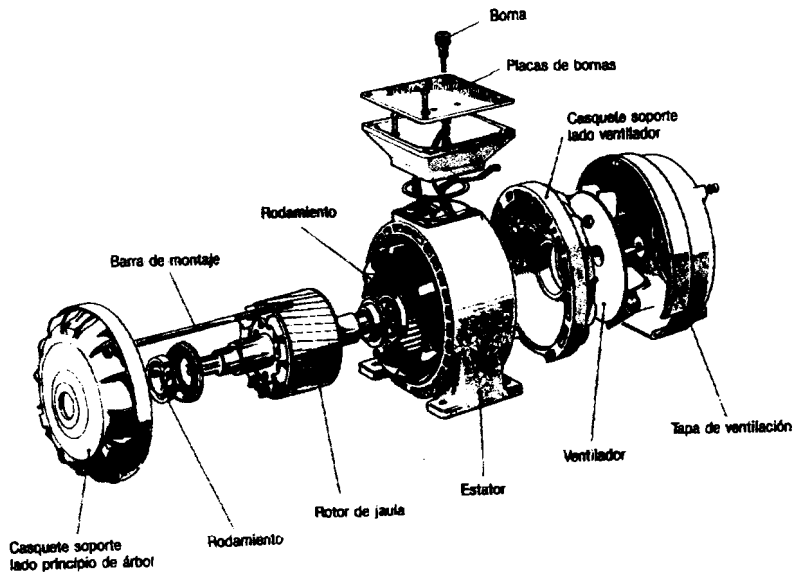
#### **1.1.1. Motores eléctricos.**

Un motor eléctrico produce energía mecánica consumiendo energía eléctrica. Esencialmente un motor eléctrico es un dínamo o un alternador que está funcionando en forma inversa. Es decir, que en lugar de hacer girar el inducido (rotor) mediante una fuerza externa, se aplica al inducido corriente eléctrica, con lo que éste gira por efecto del par de fuerzas a que está sometido.

Existen tres tipos de motores: asíncronos, síncronos y de colector. Los dos primeros son motores de corriente alterna (c. a.), siendo exactamente iguales que un alternador. En cambio los de colector pueden funcionar tanto con corriente continua (c. c.) como con c. a., y son similares a los dínamos.

La función principal de un motor eléctrico es transformar energía eléctrica en energía mecánica, por lo que son ampliamente utilizados en todo tipo de aplicación, desde el hogar hasta la industria. En la industria en general, al motor eléctrico se lo encuentra muy ligado a la bomba centrífuga, tanto así que se los llega a considerar un solo equipo (Moto-bomba), y se los suele mostrar en conjunto en los planos de diseño de los fabricantes (Plano 1).

Las principales partes de un motor eléctrico se muestran en la figura 1.1.



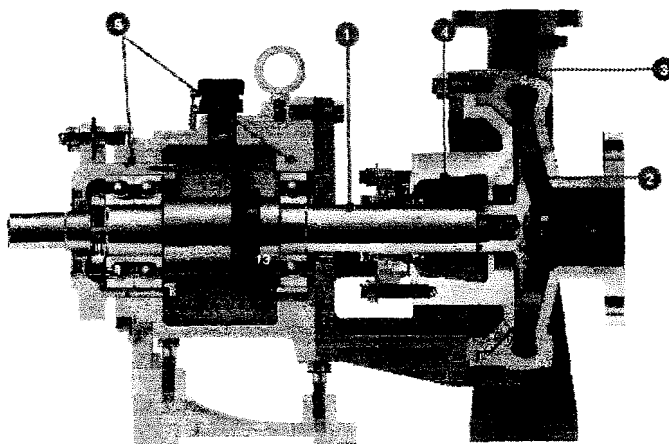
**Fig. 1.1- Partes principales de un motor eléctrico**

### 1.1.2. Bombas centrífugas.

Una bomba centrífuga es una máquina que consiste de un conjunto de paletas (álabes) rotatorias encerradas dentro de una caja o cárter, o una cubierta o coraza.



Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza centrífuga. Así, despojada de todos los refinamientos, una bomba centrífuga tiene dos partes principales: (1) Un elemento giratorio, incluyendo un impulsor y un eje, y (2) un elemento estacionario compuesto por una carcasa, cajera, y chumaceras. En la figura 1.2 se muestran las partes principales de una bomba centrífuga.



- |             |               |
|-------------|---------------|
| 3. Eje      | 1. Cajera     |
| 4. Impulsor | 2. Chumaceras |
| 5. Carcaza  |               |

**Fig1.2.- Partes principales de una bomba centrífuga**

## **1.2. Condiciones de operación.**

La operación de un motor eléctrico está afectada por factores como variaciones de voltaje, medio ambiente húmedo, corrosivo y/o con partículas de polvo, altas temperaturas producidas por alguna fuente externa cercana, rodamientos mal lubricados y defectuosos, grandes esfuerzos (cargas pesadas - mayor consumo de energía), etc.

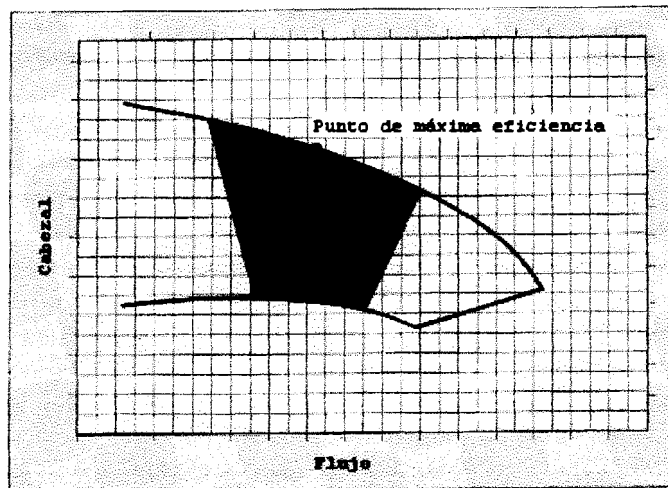
La operación de una bomba centrífuga puede afectarse por dificultades hidráulicas o mecánicas. Las dificultades hidráulicas pueden hacer que una bomba falle hasta no descargar nada de fluido, o la bomba puede descargar una cantidad insuficiente, desarrollar presión insuficiente,

perder cebado después de arrancar, o consumir energía excesiva. Las dificultades mecánicas pueden aparecer en los estoperos y cojinetes, o producir vibración, ruido o sobrecalentamiento de la bomba.

Es importante tener en cuenta que con frecuencia hay una conexión definida entre estas dos clases de dificultades. Por ejemplo, un aumento de desgaste de los espacios libres móviles se debe clasificar como una dificultad mecánica, pero dará por resultado una disminución de la capacidad neta de la bomba -un síntoma hidráulico- sin que se origine necesariamente un colapso mecánico o siquiera una vibración excesiva. Como consecuencia, es una gran ventaja clasificar los síntomas y las causas por separado y enlistar una relación de posibles causas contribuyentes para cada síntoma. El remedio para cada falla es casi siempre evidente de por sí.

Estas dificultades hidráulicas o mecánicas se pueden incrementar de acuerdo a las condiciones en que se haga operar a la bomba, tanto externa como internamente. Como condiciones externas se podría mencionar: demasiada humedad o medio ambiente contaminado, corrosivo o sucio, altas temperaturas producidas por alguna fuente de calor cercana, etc. Como condiciones internas se pueden citar las inherentes al fluido mismo (temperatura, presión, sólidos en suspensión, fluido corrosivo, etc...). Así mismo se puede anotar que es una práctica muy común hacer operar a las bombas en otras aplicaciones para las

cuales no han sido seleccionadas, o en su defecto, hacerlas operar en un punto muy distante al punto de máxima eficiencia (BEP - siglas en Inglés). Esto último es más frecuente aún (Fig.1.3).



**Fig.1.3.- En realidad, solo en ocasiones las bombas trabajan en el punto de máxima eficiencia**

### **1.3. Causas principales de fallas.**

Sobrecargas o caídas de tensión pueden provocar grandes daños en un motor eléctrico, especialmente si no se cuenta con la respectiva protección. Esto puede deberse a variaciones que provienen desde la misma fuente que suministra el fluido eléctrico, instalaciones defectuosas, pérdidas de energía eléctrica en algún punto de la línea, o por suciedad o humedad presente en las uniones o contactos eléctricos.

La presencia de humedad, polvo o contaminantes en el medio ambiente, son los factores que mayormente inciden en el mal funcionamiento de

los motores eléctricos, pues penetran entre los componentes internos y el bobinado, ocasionando desde pérdidas de potencia y energía, hasta incluso que el motor se queme. Esto se debe a que el interior del motor eléctrico no se encuentra completamente aislado del medio, más que nada si se trata de motores con carcasa abierta, los cuales se los suelen poner a trabajar en ambientes altamente contaminados. También los rodamientos se contaminan, lo que provoca que se fatiguen prematuramente por mala lubricación. Así mismo la carcasa o estructura se verá afectada en mayor o menor grado, por medios ambientes agresivos si es que no son de un material adecuado. Más adelante se menciona sobre fallas en los rodamientos y sobre el deterioro de las estructuras de una manera más precisa (puntos 1.3.1 y 1.3.5).

Otro factor que influye en un motor eléctrico, es hacerlo operar a temperaturas altas que pueden provocar daños en los aislantes o componentes plásticos del mismo. Esto puede originarse por una fuente externa de calor muy cercana al motor o por una inadecuada ventilación. Por último podemos mencionar los materiales o componentes, que pueden ser de baja calidad o no ser los adecuados para alguna aplicación específica. Estos inicialmente pueden funcionar bien, pero a corto o mediano plazo provocarán la parada del equipo.

Además de fallas inherentes a los rodamientos y del deterioro de la estructura (común en motores y bombas), las empaquetaduras, los



sellos mecánicos y la deflexión en el eje, son las razones más frecuentes de fallas en una bomba, por lo que se analizará con mayor detalle.

### **1.3.1. Rodamientos.**

Un cojinete o rodamiento es un elemento mecánico que soporta un eje rotatorio y que controla su movimiento. Las otras funciones de un cojinete son:

- ❖ Distribución de la carga.
  
- ❖ Control de la fricción.
  
- ❖ Mantenimiento de la película lubricante en el área de contacto.

Sin importar cual sea el tipo del rodamiento o su aplicación éste fallará eventualmente. Las pistas metálicas se endurecen, haciéndose altamente quebradizas hasta que el material de la superficie se descama.

Pero realmente ¿Por qué fallan los rodamientos?, ¿A qué se considera un buen tiempo de vida del rodamiento?. La mayoría

de las veces se cambian los rodamientos cada vez que se desarma el equipo para cambiar el sello mecánico o la camisa donde trabajan los empaques. Pero realmente ¿esto es razonable hacerlo?. Si pensamos por un minuto, no existe ningún motivo para desmontar los rodamientos - éstos no son partes sacrificables del equipo -.

El tiempo de vida del rodamiento está determinado por el número de horas que tomará hasta que el metal se “fatigue” y esto es función de la carga sobre el rodamiento, el número de rotaciones, y la cantidad de lubricación que el rodamiento recibe. Las compañías de bombas predicen el tiempo de vida de los rodamientos medido en años. De lo dicho anteriormente se deduce que los rodamientos no se desgastan, sino que “fallan” o se “fatigan”. Las causas principales para que un rodamiento falle son:

- ❖ Lubricación inapropiada (43%).
  
- ❖ Error en la selección e instalación (27%).
  
- ❖ Otras causas de lubricación (21%):
  - Temperatura límite excedida.

- Contaminación por humedad.
- Otros contaminantes.

❖ **Fatiga (9%).**

Es interesante notar que aproximadamente el 64% de los fallos en los rodamientos están relacionados con la lubricación del mismo, ya que está sujeta a muchos factores en los que se pueden cometer errores.

Es muy frecuente que un rodamiento no esté siendo lubricado correctamente y que en la selección del lubricante (aceite o grasa) no se hayan tomado en cuenta todos los factores necesarios como son la velocidad a la que va a trabajar el rodamiento, la carga que va a soportar (tipo y magnitud), el tipo de rodamiento, la temperatura de trabajo, qué método de lubricación se tiene o se va a implementar, y en qué condiciones va a operar (existe polvo?, agua?, etc.).

Además de los factores mencionados, hay que tomar en cuenta si el período de relubricación es correcto y si se está suministrando la cantidad correcta. Con respecto a lo primero,

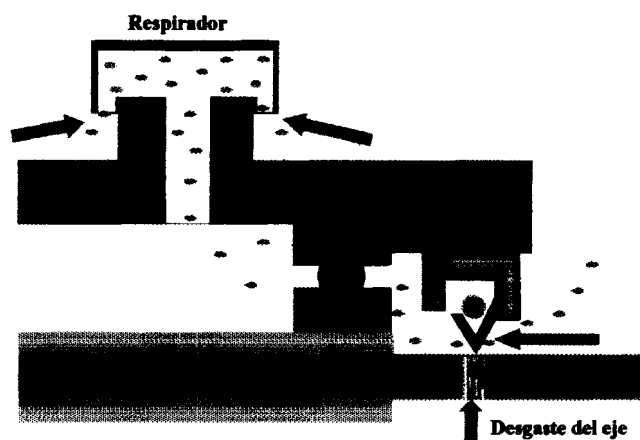
existen en muchos casos “cuadros de lubricación” que en la mayoría son proporcionados por los fabricantes de los equipos más no de los fabricantes de los rodamientos. En dichos cuadros se indica una guía sobre cada cuanto tiempo “engrasar” al rodamiento de determinado equipo. Si bien es cierto esto puede ayudar mucho, no deja de ser solamente una “guía”, y no hay nada exacto que nos indique si el rodamiento necesita o no ser re-lubricado. En cuanto a la cantidad de lubricante que debe inyectarse, tampoco se lo puede saber exactamente, puesto que no se puede “ver” dentro del rodamiento la cantidad que necesita, y se lo hace en la gran mayoría de los casos en base a la “experiencia” de los encargados de hacer la lubricación, con un par de “bombeadas”, etc., sin saber nunca si el rodamiento ha quedado con la cantidad exacta, con poca o mucha cantidad de lubricante. Mientras una no-lubricación es desastrosa, la lubricación en exceso puede causar daño también. El arrastre excesivo causado por una lubricación excesiva puede elevar temperaturas al punto donde las tolerancias operativas del rodamiento son excedidas llevándolo al desgaste y falla prematura.



Otra gran razón para que un rodamiento falle es la contaminación del lubricante. Dejando de lado la contaminación por manipulación, almacenaje u otro factor antes de la aplicación,

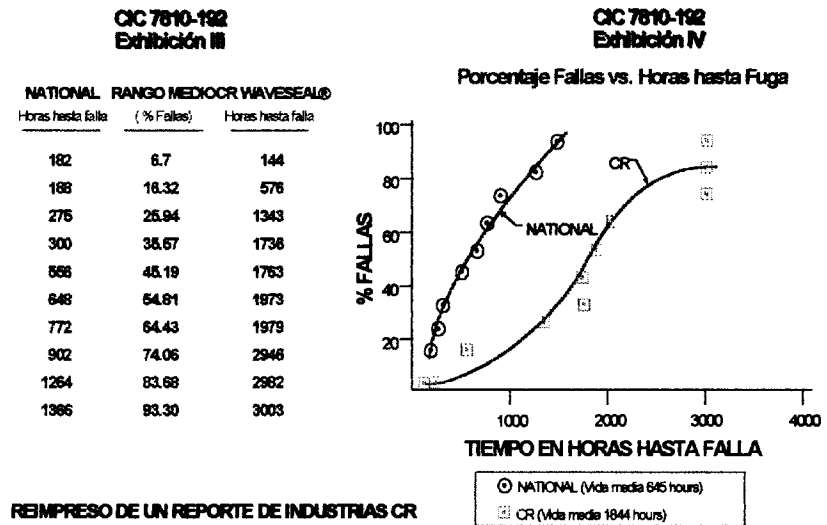
puesto que esto es fácilmente corregible tomando las precauciones del caso, la contaminación durante la operación es muy frecuente y muy poco atendida. Esto se debe a que tradicionalmente a los rodamientos se los protege de la contaminación externa con los muy conocidos "retenedores" de labio. Estos ahorcan el eje con su labio y por lo general son de caucho con inserción de tela, lona o algo similar, materiales que son abrasivos, y por lo tanto producen desgaste sobre el eje, luego de lo cual el retenedor ya no cumple con su función de proteger y permite pasar partículas pequeñas de contaminantes.

Los conocidos respiradores (en rodamientos lubricados con aceite) son también una gran causa de contaminación. Si bien es cierto que su función es evacuar los gases generados por el aceite cuando se calienta, así mismo cuando se enfría permite el paso de contaminantes hacia la caja de rodamientos (Fig. 1.4).



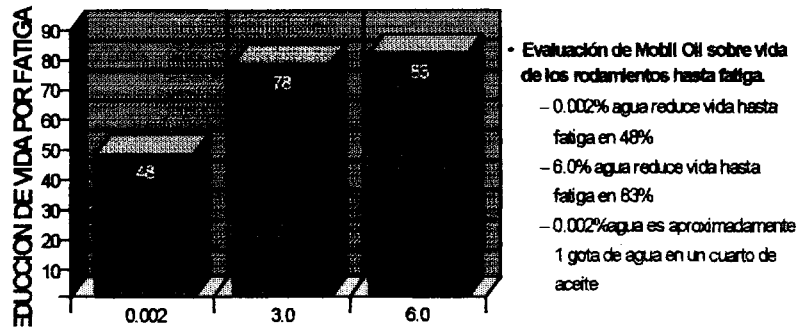
**Fig. 1.4.-Fuentes de Contaminación en una caja de rodamientos**

Datos obtenidos de fabricantes indican que el tiempo promedio de los retenedores es entre 1300 y 3000 horas (2 - 4 meses). La mayor compañía fabricante de retenedores CR indica que aproximadamente el 93.3% de sus retenedores fallaron a las 3003 horas de trabajo en comparación a las 1366 horas de la compañía International (Fig. 1.5). Esto nos hace ver que realmente la protección efectiva de un retenedor es de meses cuando un rodamiento de buena calidad debe durar años (entre 2 y 3 años mínimo). Y es que aunque parezca poco creíble, una pequeña cantidad de contaminante, puede acortar grandemente la vida de un rodamiento. Según estudios hechos por la Mobil Oil un 0.002% de agua en el aceite reducirá aproximadamente un 48% la vida el rodamiento (Fig. 1.6).



REIMPRESO DE UN REPORTE DE INDUSTRIAS CR

**Fig.1.5.-Tiempos de vida de rodamientos de CR vs International**



**Fig. 1.6.- Contaminación con agua reduce la vida de los rodamientos Significativamente**

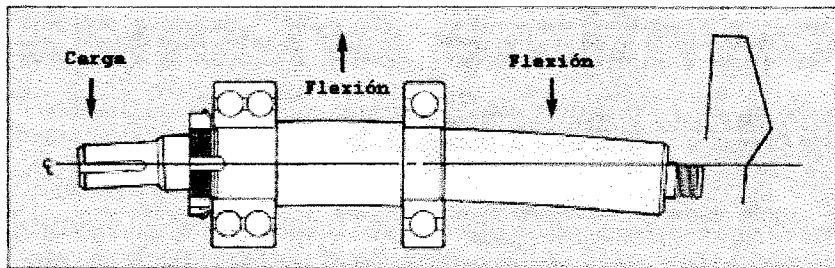
### 1.3.2. Factor de deflexión del eje.

Algunas plantas atribuyen que más del 85% de todos los problemas en bombas se debe a fallas en los sellos mecánicos y rodamientos; por lo tanto hoy en día las bombas tienen que ser construidas con el criterio principal de que los sellos y los rodamientos tienen que ser confiables, sin embargo, la mayoría de los fabricantes de bombas han sido reacios a cambiar sus diseños en lo concerniente a los problemas con los sellos y a extender la vida de éstos. Recientemente, los clientes al demandar mayor confiabilidad, han obligado que los fabricantes enfrenten esta situación.

En los ejes en voladizos, las distancias largas entre el rodamiento radial y el impeler (L), está muy lejos de ser necesarias para los

requerimientos de sellado actuales. La mayoría de las nuevas generaciones de sellos mecánicos pueden ser ajustados a bombas con valores menores a los requerimientos de configuración estándar de la ANSI (menor de 2 – sistema inglés).

La reducción de la distancia del voladizo (L) disminuye el factor de esbeltez del eje, que es una medición de la resistencia del eje a la flexión (Fig. 1.7). La derivación de la fórmula para el factor de deflexión (esbeltez) se muestra en la figura 1.8.



**Fig.1.7.- Flexión del eje**

$\Delta$  = Deflexión del eje  
 P = Carga  
 E = Módulo de elasticidad  
 L = Longitud del voladizo

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad I = \frac{\pi D^4}{64} \text{ (Momento de inercia)}$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{3E \frac{\pi D^4}{64}} = \frac{L^3}{D^4} \text{ (Se remueven todas las constantes para propósitos de comparación. Se asume carga y materiales idénticos)}$$

El diagrama inferior muestra un eje de longitud L fijado a la izquierda y libre a la derecha. Una carga P se aplica en el extremo libre, causando una deflexión Delta. El eje tiene un diámetro D.

**Fig. 1.8.- Derivación de la fórmula del factor de deflexión**



Para propósitos de comparación, la fórmula de la deflexión se reduce a  $L^3/D^4$ , la cual esta dada netamente en función de la longitud del voladizo (L) y el diámetro de la sección del eje (D). Ejemplos de algunos factores de flexión en bombas son mostrados en la Tabla 1.

**TABLA 1**

**FACTORES DE DEFLEXIÓN TÍPICOS PARA BOMBAS ANSI**

Modelo	Diámetro (D) debajo de la camisa, plg.	Longitud del voladizo (L), plg.	$L^3 / D^4$	Deflexión bajo una carga de 200 lbs, plg
A	1.875	8.700	53	0.003
B	1.125	6.125	143	0.007
C	1.500	8.375	116	0.006
D	1.125	5.875	126	0.006
E	1.625	7.688	65	0.003
F	3.250	12.500	17	0.001
G	1.875	6.010	17	0.001
H	2.000	9.970	61	0.003
I	1.750	9.920	104	0.005
J	2.500	11.844	42	0.002

Las bombas centrífugas son diseñadas para trabajar a un flujo específico – un punto en la curva de la bomba. La mayoría de las bombas no operan en éste punto de diseño como resultado de una inadecuada selección, cambios en los requerimientos del proceso, y variaciones en el cabezal del sistema. De éste modo ocurre recirculación, la cual causa una distribución desigual de la presión en la voluta, y fuerzas radiales sobre el impeler.

La carga radial sobre el impeler se incrementa exponencialmente como la bomba opere fuera del punto de diseño. Esta carga radial causa deflexión en el eje, la cual es una constante molestia sobre

el sello mecánico, reduciendo dramáticamente su vida útil. Cuando el movimiento del eje es reducido, la vida del sello se incrementa significativamente.

La vibración del eje puede ocasionar la aparición de otras fuentes relacionadas con problemas de aplicación, proceso e instalación:

- ❖ Insuficiente cabezal positivo neto de succión (NPSH), causando cavitación;
- ❖ Diseño inadecuado de la succión y descarga, creando turbulencia en la succión de la bomba y de éste modo desbalance hidráulico;
- ❖ Alineación pobre en la instalación de la bomba y el motor;
- ❖ Balance mecánico inadecuado del impeler;
- ❖ Desbalance hidráulico del impeler causado por la baja calidad en los moldes de fundición y mecanizado impropio del mismo;
- ❖ Diseño pobre y pérdidas de las tolerancias de fabricación en los componentes de la bomba.

**Esfuerzos excesivos en las tuberías, fundiciones inadecuadas, y problemas operacionales aumentan las fuerzas dañinas en la bomba.**

**Caras de sellos mecánicos son alisadas fuera de las 22 millonésimas de pulgadas o 2 bandas de luz de helio. Las normas ANSI B73 y API 610 permiten todavía que el eje sobresalga 0.002 pulgadas en el área del sello mecánico. Esto significa que cuando un indicador de carátula es puesto sobre el eje en la zona del sello mecánico, este mostrará una lectura total de 0.002 pulgadas cuando el eje rota una vuelta. De tal modo que el movimiento del eje permitido puede ser mil veces mayor que lo permitido por la cara del sello, una discrepancia que puede dañarlo y conllevar a una falla prematura.**

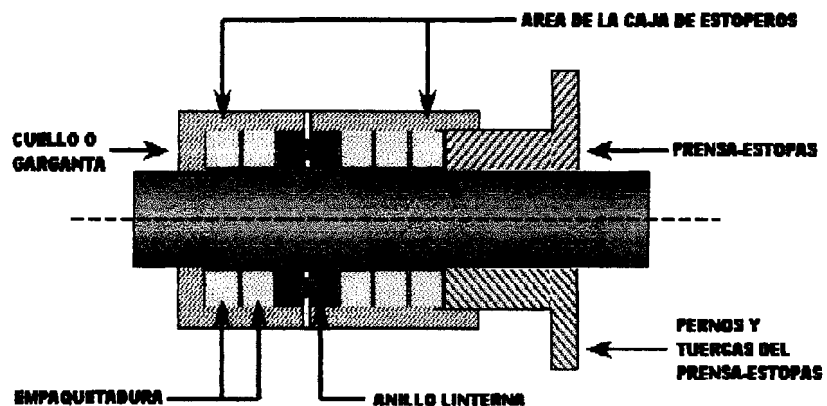
**Las normas ANSI también indican que la deflexión dinámica del eje en la línea del centro del impeler será menor a 0.005 pulgadas. Este valor puede trasladar significativamente la deflexión del eje a la cara de los sellos, posiblemente 0.002 a 0.003 pulgadas.**

**Esta deflexión dinámica en adición a la deflexión permitida por las normas indicadas, puede causar movimientos y vibraciones dañinas sobre las caras del sello.**

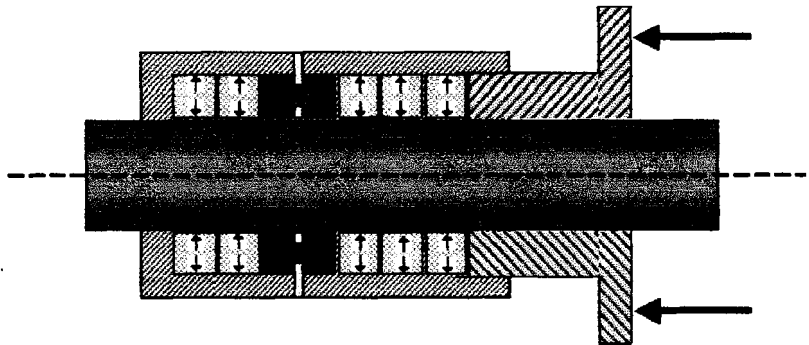
### 1.3.3. Empaquetaduras.

El Más antiguo y aún el más común de los dispositivos de sellado, es la empaquetadura de compresión, llamada así debido a la forma como cumple con la función de sellado. Construidas de materiales relativamente suaves, flexibles y maleables, las empaquetaduras consisten en un número de anillos que son insertados dentro del espacio anular (caja de estoperos) entre la parte rotativa y el cuerpo de la bomba (Fig. 1.9).

Apretando el prensa-estopos contra el anillo externo, se transmitirá dicha presión a la empaquetadura expandiendo los anillos radialmente contra la pared del estopero por un lado y la parte rotativa (eje) por el otro, haciendo entonces el efecto de sellado (Fig.1.10).



**Fig.1.9.- Arreglo típico de la caja de estoperos y descripción de sus partes.**



**Fig. 1.10.- Transmisión de la fuerza de apriete del prensa-estopos hacia la caja y el eje.**

Cabe anotar que el término “sellar” no es del todo exacto para las empaquetaduras, puesto que éstas no están diseñadas para trabajar con cero fugas, sino más bien controlan las fugas tratando de minimizarlas al máximo.

Aunque hoy en día existen materiales de empaquetaduras que podrían reducir las fugas casi a cero, la mayoría trabajan, y deben hacerlo, con un pequeño goteo o fuga controlada, (del fluido que se bombea o de algún fluido inyectado), ya que éste enfriará y lubricará la empaquetadura.

Las empaquetaduras de compresión se utilizan en las industrias de procesos en general. Con ellas se puede sellar todo tipo de fluidos.

Las empaquetaduras son relativamente fáciles de instalar y de mantener, y con una atención adecuada se puede asegurar en un alto grado el éxito de su operación, pero éste depende de algunos factores, que si no son tomados en cuenta, la vida útil de la empaquetadura pueden verse reducida considerablemente por varios factores como:

- ❖ Selección correcta del o los materiales de la empaquetadura, que deben ser compatibles con el fluido a sellarse (ph), así como soportar las condiciones en las cuales va a operar (velocidades superficiales del eje, presiones y temperaturas).
- ❖ Instalación adecuada, que implica cortar de manera correcta la empaquetadura, que los anillos queden asentados uniformemente tomando en cuenta que los cortes no coincidan, y considerar los procedimientos de arranque inicial.
- ❖ Operación de la bomba. La bomba debe operar dentro los parámetros para los cuales fue diseñada (curva de funcionamiento).
- ❖ Estado y mantenimiento de la bomba. La bomba debe estar siempre en las mejores condiciones posibles, implementándose un buen programa de mantenimiento,

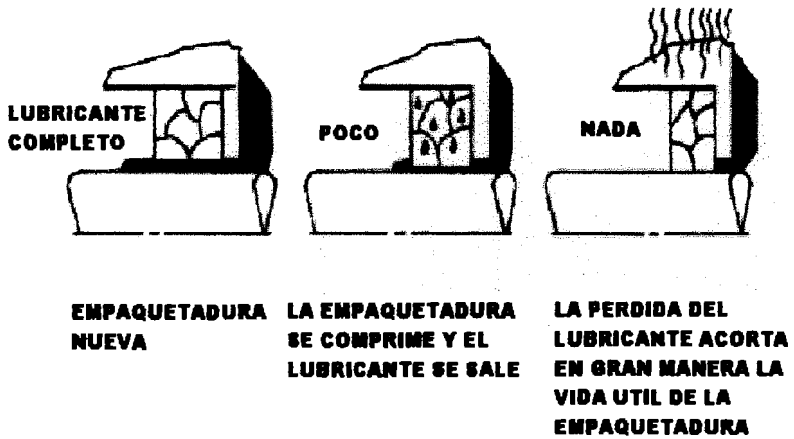
chequeando que las tolerancias y el estado de cada parte se encuentren dentro del especificado por el fabricante.

Los cuatro puntos mencionados son importantes para el buen funcionamiento de una bomba cuyo desconocimiento o poca importancia pueden causar que la empaquetadura falle prematuramente, pero en especial la poca consideración en lo que respecta a las características de la propia empaquetadura es muy frecuente. Por tal razón es necesario analizar las razones principales por las cuales una empaquetadura falla prematuramente.

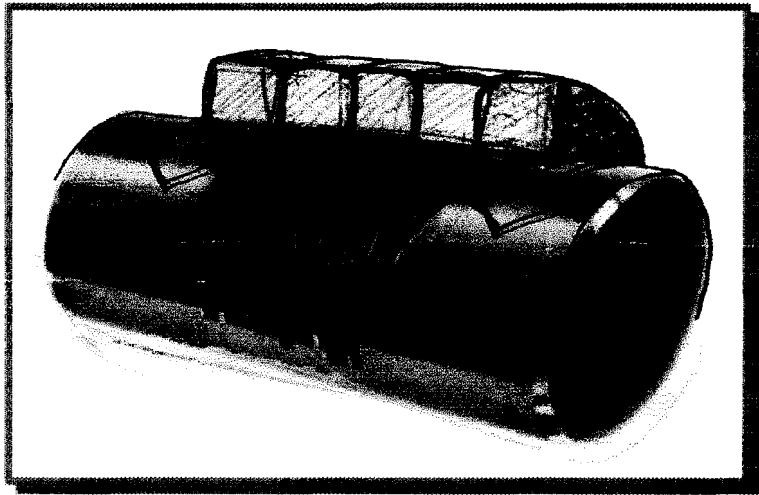
Lo primero que hay que tomar en cuenta son los materiales de los que está constituida una empaquetadura que son las fibras y los lubricantes; lo primero es lo que le da la consistencia y las características principales, y lo segundo es necesario para reducir la fricción con el eje.

Muchos empaques combinan una fibra resistente (en muchos casos abrasiva a la vez), con un lubricante liviano, el cual termina saliéndose por la compresión ejercida, (Fig.1.11), quedando prácticamente sólo la fibra, generándose una gran fricción con el eje lo que termina desgastándolo y quemando a la empaquetadura (Fig. 1.12).

### POR QUE FALLAN LAS EMPAQUETADURAS?



**Fig.1.11.- Pérdida del lubricante por la compresión de la empaquetadura**

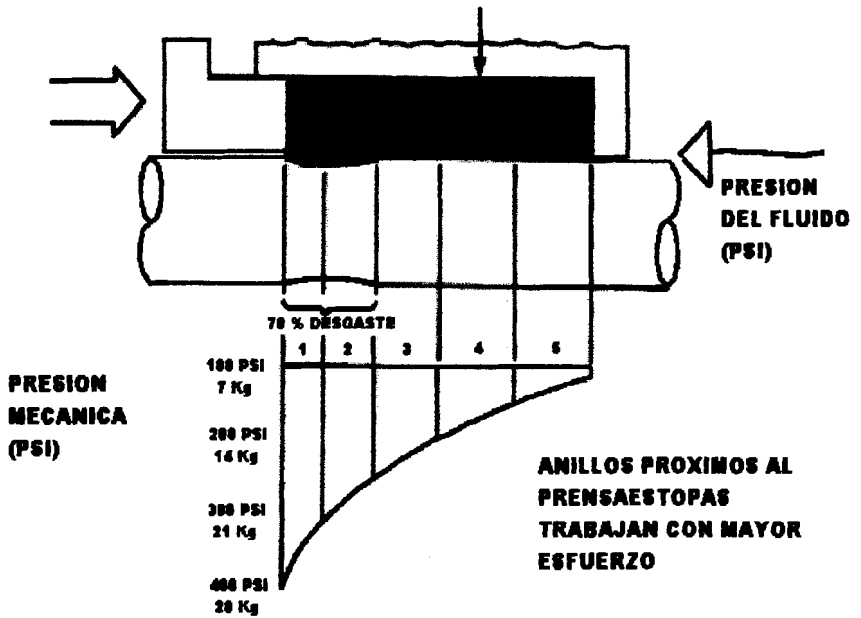


**Fig. 1.12.- Fricción entre la empaquetadura y el eje**

Otra razón es que muchos mecánicos aprietan en exceso el prensa-estopas tratando de eliminar por completo el goteo, volviendo a producir lo arriba descrito. Además la presión ejercida por el prensa-estopas no se distribuye uniformemente



sobre todos los anillos, sino que son los primeros los que soportan mayormente el esfuerzo inicial y donde se genera el mayor desgaste sobre el eje, siendo la distribución sobre los demás anillos como se indica en la Figura 1.13.



**Fig. 1.13.- Distribución de la presión del prensa-estopas sobre los anillos de empaquetadura.**

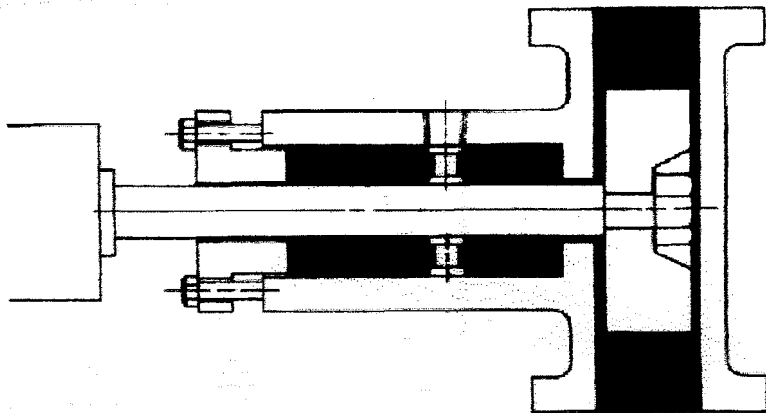
En muchas bombas se implementa un arreglo de empaquetaduras como el mostrado en la Figura 1.14, especialmente cuando se maneja vacío, fluidos especiales que se cristalizan, endurecen, contienen sólidos o se manejan con temperaturas altas.

El anillo linterna mostrado fue diseñado con dos objetivos:

- a) mantener el vacío
- b) enfriar y lubricar los empaques

Este debe estar debajo del orificio de inyección para permitir que el fluido que se inyecta (a una presión de 10 a 15 psi por encima de la presión de la caja) haga su trabajo obteniendo el máximo resultado posible.

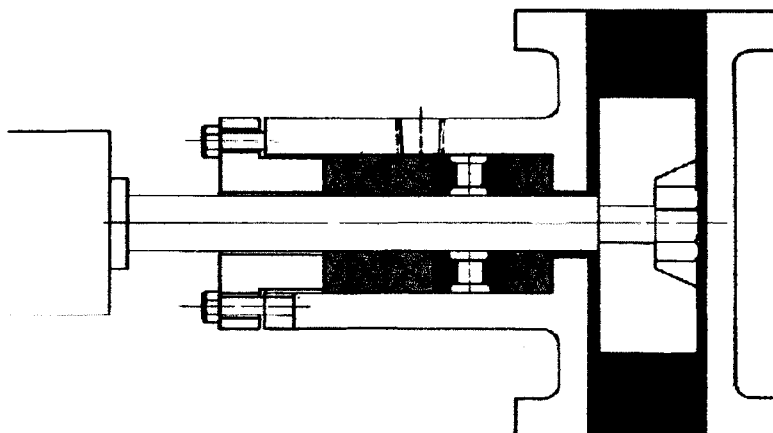
Esto es fácil de lograr cuando se empaca por completo una caja, pero a medida que trabaja la bomba, es necesario apretar el prensa-estopas (es frecuente hacerlo muy seguido), moviéndolo de su posición original (Fig. 1.15), provocando que no cumpla su objetivo y que los empaques se destruyan.



**Fig. 1.14.- Arreglo típico en bombas de los anillos de empaquetadura con anillo de linterna.**

Una razón no menos importante es la que tiene que ver con el corte de los anillos, el cual no siempre se lo hace de una manera

adecuada, quedando muy cortos o muy largos, los extremos no coinciden, o el corte no es uniforme y el empaque se comienza a deshilar:



**Fig. 1.15.- Desplazamiento del anillo linterna por el apriete continuo del prensa-estopa.**

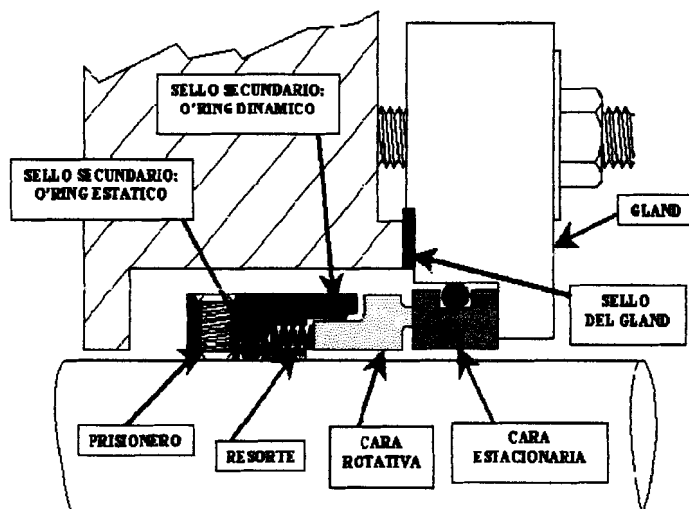
Sea cual sea la razón por la que las empaquetaduras fallen, siempre se obtendrá un exceso de fugas que es una gran fuente de contaminación, tanto ambiental como para rodamientos.

#### **1.3.4. Sellos mecánicos.**

Un sello mecánico consiste en dos superficies sumamente pulidas y planas (llamadas caras) que son mantenidas juntas mecánicamente para prevenir que un fluido escape. Una cara debe rotar con el eje y es comúnmente llamada rotativa. La otra cara es fija y es llamada estacionaria.

Los componentes básicos de un sello mecánico son (Fig.1.16):

- Cara rotativa.
- Cara estacionaria.
- Sellos secundarios (O'rines estático y dinámico).
- Sistema de sujeción (prisioneros).
- Resortes, fuelles, etc.
- Gland (brida para alojamiento de la estacionaria).
- Sello del gland.



**Fig. 1.16.- Componentes básicos de un sello mecánico.**

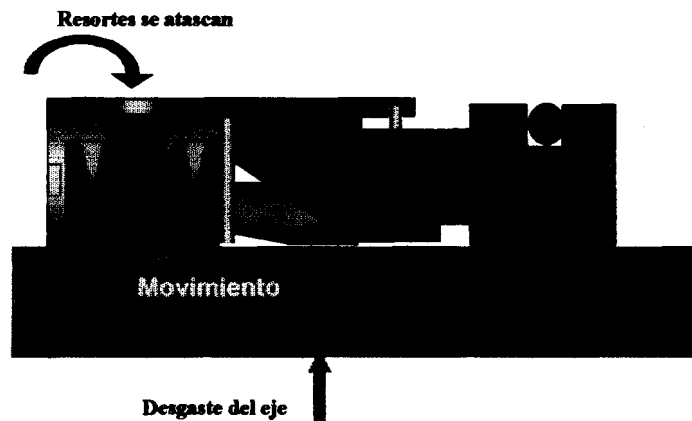
La vida útil de un sello mecánico se verá afectada por las mismas razones indicadas para las empaquetaduras es decir selección del sello mecánico, instalación, operación y estado de la bomba. A continuación se detallan causas muy frecuentes por las que un sello suele fallar:

- a) Los resortes se traban: Esto se debe a que el ó los resortes están expuestos al fluido a sellar, depositándose las suciedades o sólidos entre sus espiras impidiéndole ejercer su función. (Fig. 1.17). Esto puede producir que la cara del sello se abra y se desgaste prematuramente.
- b) Las caras se suelen quebrar por los pines de arrastres, los cuales pueden producir fisuras que pueden terminar en rupturas, especialmente en las paradas y arranques continuos del equipo.
- c) Los elastómeros desgastan al eje. Muchos diseños de sellos mecánicos tienen un elastómero o sello secundario que se desliza sobre el eje que con el resorteo lo desgastan puntualmente (Fig. 1.17).
- d) Las caras se abren. Esto es común cuando se trabaja con presiones y velocidades relativamente altas y con sellos no

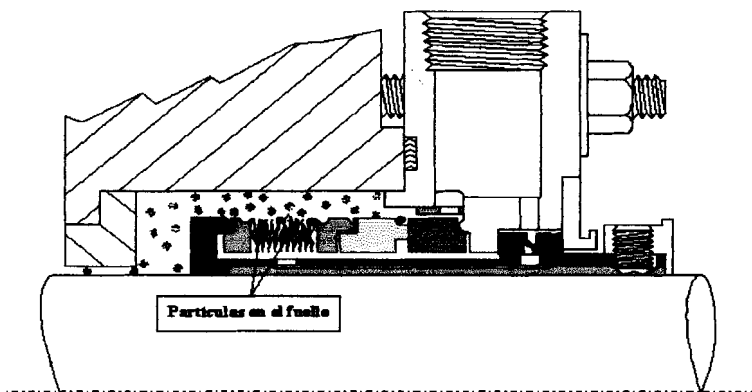
balanceados, en las cuales las fuerzas de apertura pueden sobrepasar a las fuerzas de cierre. La deflexión del eje es un factor muy importante, ya que a mayor deflexión, mayor probabilidad de que se abran las caras.

- e) La cara de carbón se desgasta rápidamente, especialmente cuando se trata de un carbón muy suave o de baja calidad. Lógicamente si se abren las caras, pueden penetrar partículas entre éstas haciendo que la cara más suave (carbón) se desgaste con mayor rapidez.
- f) Los fuelles se fracturan. Estos están expuestos a las partículas del fluido, las cuales se depositan entre sus crestas (Fig.1.18), y al comprimirse tratará a su vez de comprimir éstas partículas lo cual puede provocar que se fracture.
- g) Mala instalación. Con sellos de componentes la correcta instalación depende mucho de la habilidad de la persona que lo realiza y de que lo haga a la medida correcta (compresión de los resortes). La mayoría de los sellos en el mercado no traen especificada una medida de instalación.
- h) Materiales y diseños del sello no adecuados. Esto se debe a que no se toma en cuenta las propiedades químicas del fluido

para buscar materiales compatibles ni las características físicas (cristalización, abrasivos, solidificación, etc.) para seleccionar el material y diseño más adecuado.



**Fig. 1.17.- Problemas con sellos comunes de componentes**



**Fig. 1.18.- Las partículas se depositan entre las crestas del fuelle dificultando su accionar**

### 1.3.5. Deterioro en la estructura.

Las estructuras y componentes de las bombas pueden verse afectadas por el fluido que manejan y por las condiciones en que

operan, deteriorándose y perdiendo sus tolerancias originales, afectando a su funcionamiento. Existen dos tipos de daños:

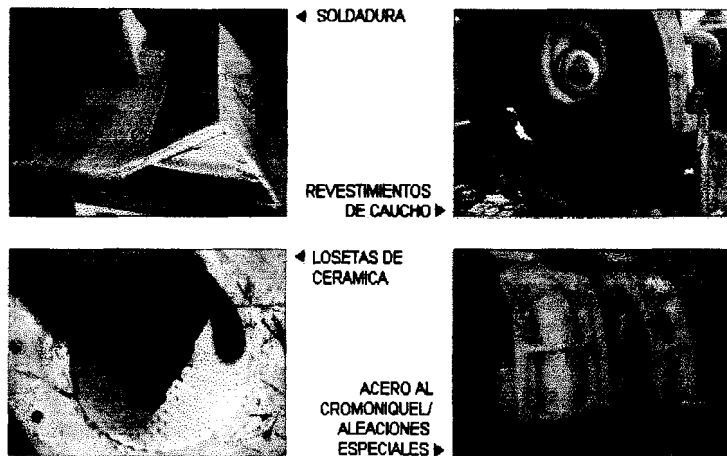
- a) Daño estructural. Se produce por impactos o fatigas del material, causado por golpes durante los procesos de armado, desarmado, mantenimiento, vibración excesiva, grandes esfuerzos, ciclos térmicos (contracción y dilatación).
  
- b) Daño superficial. Es producido debido a la abrasión, corrosión, erosión, ataques químicos, o por la presencia de cavitación durante el funcionamiento de la bomba.

A pesar de que se escogen bombas o equipos de materiales especiales para distintas aplicaciones, es muy común observar en muchas de ellas que sus estructuras se deterioran. Cuando se produce esto, frecuentemente se reparan utilizando soldaduras inoxidable, duras, de aleaciones especiales, etc., que aparentemente solucionan el problema, pero que en un período similar al anterior o menor, vuelven a fallar y con mayor fuerza. El problema principal con esto es que realmente no se mejoran condiciones iniciales, sino que solamente se procede a parchar baches. Además no es recomendable realizar este tipo de reparaciones por más de dos o tres veces, puesto que por efecto de las temperaturas extremas que se alcanzan al soldar,



la estructura se cristalizará volviéndose muy quebradiza y perdiendo sus propiedades.

Otras metodologías utilizadas son recubrir las superficies con revestimientos de caucho, losetas cerámicas, pinturas epóxicas, etc. (Fig. 1.19). El problema con estos tipos de recubrimientos es que de una u otra manera permiten el paso del fluido hasta el metal base (ningún recubrimiento es 100 % impermeable), causando que se oxide.



**Fig. 1.19.- Recubrimientos típicos utilizados para proteger las superficies contra el deterioro.**

La oxidación generada en las superficies tiene una fuerza de repulsión de aproximadamente 2100 psi y la fuerza de adherencia de los recubrimientos es muy inferior, por lo que termina ampollándose en poco tiempo. Además las superficies obtenidas no son regulares, produciéndose pérdidas por fricción y turbulencias, reduciéndose la eficiencia de la bomba.

#### **1.4. Prácticas comunes de mantenimiento.**

Los problemas de mantenimiento del equipo de bombeo centrífugo varían de sencillo a complicados. El tipo de servicio para el que la bomba está destinada, la construcción general de ella, la complejidad relativa de las reparaciones requeridas, las facilidades disponibles en el lugar, y otros factores entran en la decisión de si las reparaciones necesarias se ejecutan en las instalaciones propias, en la planta del fabricante de la bomba o en algún taller especializado. Algunas veces, especialmente cuando se tiene suficiente equipo auxiliar de relevo, una bomba que necesita reparación se manda a la planta del fabricante para reconstrucción completa. De otra manera, las reparaciones o reconstrucciones se hacen localmente con personal propio.

De manera general, es una práctica muy común cuando se va a dar mantenimiento a un equipo, simplemente reemplazar o cambiar el elemento dañado por otro en “mejores condiciones” o nuevo. Esto conlleva a que el equipo regrese a las condiciones iniciales antes de que fallara, esperándose un tiempo de trabajo similar al anterior hasta que vuelva a fallar, volviendo al mantenimiento muy repetitivo, haciendo siempre lo mismo sin eliminar la causa principal que produce el daño.

Además el hecho de estar desarmando constantemente los equipos aumenta las posibilidades de daños debido a que existen mayores

oportunidades de que se deterioren los componentes de las bombas como por ejemplo desgaste en los pernos, pérdidas de tolerancias, etc.

Este tipo de mantenimiento, que es común en muchas empresas se vuelve ineficiente, improductivo e innecesario, además de que frecuentemente el personal de mantenimiento no es calificado siendo muy probable que se cometan muchos errores.

### **1.5. Tiempo entre paradas.**

El tiempo entre paradas es el tiempo entre dos fallas consecutivas de un equipo, es decir el tiempo que transcurre desde el momento en que el equipo falla, es puesto fuera de servicio, se inicia la reparación, nuevamente entra en servicio y vuelve a fallar.

Este factor es una medida del tiempo promedio de trabajo que se espera que dure un equipo y es tomado en cuenta para los mantenimientos programados que se hacen en una planta, y como es algo ya esperado se lo toma como algo normal.

Sin embargo, es muy frecuente que éste tiempo entre paradas se vea reducido por todos los factores causantes de las fallas descritos en los puntos anteriores. Además hay que tomar en cuenta que un gran número de empresas se niegan a la posibilidad de poder extenderlo

porque piensan que esto implicaría mayores costos y la implementación de sistemas muy complicados.

### **1.6. Costos.**

Los costos en los que se incurren cuando se realiza el mantenimiento tanto de un motor eléctrico como de una bomba centrífuga se los puede enumerar de la siguiente manera:

- a) Repuestos (Rodamientos, sellos mecánicos, empaquetaduras, pernos, etc.).
- b) Mano de obra y trabajos realizados en talleres (mecanizado, rebobinado, soldadura, etc.).
- c) Productos para la limpieza, barnizado y el secado del motor.
- d) Pérdida de fluido (fuga) de la bomba.
- e) Pérdidas de producción.

Según datos de estudios realizados el 75% de las fallas en una bomba centrífuga y el 68% de los repuestos se deben a sellos mecánicos y rodamientos.

Los costos relacionados con la pérdida de fluido y de producción son relativos a cada tipo de industria, y anda por el orden del 70% del costo total. La mano de obra aunque depende del tamaño de la industria y de las políticas propias de cada una, son relativamente similares y anda por el orden del 5% al 10%.

## **CAPITULO 2**

### **2. MEJORAS PROPUESTAS PARA EXTENDER LA VIDA UTIL Y AUMENTAR EFICIENCIA EN LOS EQUIPOS ROTATIVOS.**

#### **2.1. Selección de los equipos.**

Para obtener mayor duración y mejor funcionamiento de los equipos (motor y bomba), en primer lugar estos se deben seleccionar de acuerdo a las condiciones en que van a operar y ponerlos a trabajar solamente en la aplicación para las que fueron seleccionados, tomando en cuenta sus curvas de funcionamiento, el cual no debe alejarse más de un 5% de su punto de máxima eficiencia. Con esto se logra que los motores trabajen con la energía eléctrica adecuada ( voltaje y amperaje ) y que se reduzcan las posibles sobrecargas que se generan en la bomba durante la operación, preservando sus componentes del desgaste excesivo y de la fatiga. Es importante también la selección de los materiales de construcción, los que deben ser compatibles tanto con el fluido de trabajo como con el medio donde operan. Si no es posible esto,

se los puede proteger adecuadamente, por ejemplo con recubrimientos especiales (2.2.5). El motor también debe ser seleccionado de acuerdo a la temperatura del medio en donde va a operar, tomando en cuenta si existen fuentes de calor cercanas al sitio de operación. Si no es posible eliminarlas hay que proveer una adecuada ventilación.

## **2.2. Eliminación de las causas de fallas.**

La mejor manera de obtener el máximo rendimiento de un equipo es previendo o eliminando las causas que provocan que fallen. Para esto a continuación se indican las alternativas para eliminar las principales causas descritas en el capítulo anterior.

Todo motor eléctrico debe contar con un sistema de protección contra variaciones de voltaje y/o amperaje, puesto que nunca se puede garantizar un fluido eléctrico constante y estable. El tendido eléctrico debe estar en perfectas condiciones y de acuerdo a lo requerido y debe haber sido realizado por personal debidamente capacitado. Además, las uniones y contactos deben estar libres de humedad y suciedad. Una manera de lograr esto, es utilizar productos que se encuentran en el mercado como son los desplazadores de humedad y compuestos (por ejemplo: antiadherentes a base de cobre), que no permiten que las uniones se tomen, pero que a la vez no entorpecen la circulación del fluido eléctrico.

Para evitar en gran manera que el interior de un motor eléctrico se contamine, en primer lugar nunca se deben seleccionar motores con carcazas abiertas para ambientes altamente contaminados. Para proteger aún más al motor, es necesario proveer a los rodamientos de una protección adecuada (punto 2.2.1). Pero aunque se logre esto, la contaminación en muchos casos es inevitable, en cuyo caso la limpieza como parte del mantenimiento es un factor muy importante.

Es una práctica muy común desarmar completamente los motores (sean de carcasa abierta o cerrada) para su limpieza. Se llegan a utilizar solventes tan fuertes que dañan el barniz del bobinado por lo que es necesario volver a barnizarlos, y posteriormente se los “estufan” para sacarles la humedad. Todo este procedimiento por lo general demora algunos días en realizarse. Y lo peor de todo es que aún así, en muchos casos no se logra sacar toda la humedad.

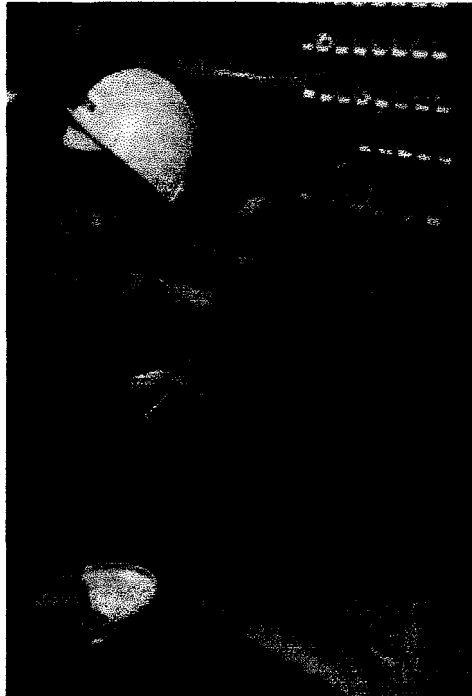
Para el caso de motores con carcazas abiertas, existen limpiadores muy efectivos que permiten hacer la limpieza sin necesidad de desarmarlo, incluso, se puede realizar la limpieza con el motor encendido de manera segura pues son dieléctricos (Fig. 2.1).

Contra la humedad, existen desplazadores (dieléctricos también) que permiten sacar la humedad sin necesidad de aplicar calor y de manera mucho más rápida.



En el caso de motores con carcazas cerradas, como no se tiene acceso directo, es necesario desarmar el motor. En este caso se puede utilizar un limpiador base petróleo, sin necesidad que sea dieléctrico, puesto que se tiene el equipo sin energía. Este tipo de limpiador debe dejar muy pocos residuos y puede ser de evaporación lenta; si es necesario se puede acelerar su secado con aire a presión. Si hace falta se puede utilizar también el desplazador de humedad.

Al elegir un limpiador (de acuerdo al requerimiento de aplicación), y/o el desplazador de humedad, se debe tomar muy en cuenta de que no ataquen ni causen daños a los componentes del motor (barniz, plásticos, cauchos, etc.), así como también deben ser muy seguros tanto par el ser humano como para el medio ambiente.



**Fig. 2.1.-Limpieza de un motor eléctrico en funcionamiento**

También es muy frecuente rebobinar los motores cuando se han quemado. Según recomendaciones de fabricantes de motores eléctricos (por ejemplo Reliance Electric), no se aconseja rebobinar motores quemados que causaron recalentamiento del núcleo, puesto que esto cambiará sus características, lo que definitivamente puede provocar un mal funcionamiento del motor. Cuando sucede esto, lo mejor es utilizar partes nuevas. Cuando el motor no se ha quemado, pero el bobinado ha sufrido algún daño, se puede aceptar rebobinar (lo cual debe ser realizado por especialistas), pero hay que tener en cuenta que la eficiencia del motor reparado no llega exactamente a los niveles originales, ya que esto dependería que el rebobinado se haga exactamente con los parámetros de fabricación original.

Esta reducción de la eficiencia, hará que el motor consuma más energía para entregar la misma potencia, lo que implica mayor costo de operación.

Una manera de evaluar éste costo es mediante las siguientes fórmulas:

$$\Delta K = \text{HP} \times 0.746 \left[ \frac{1}{\epsilon_a} - \frac{1}{\epsilon_o} \right]$$

$$\text{Costo anual} = \Delta K \times (\text{Hrs} / \text{año}) \times (\$ / \text{Kwh})$$

Donde:

$\Delta K$	=	Diferencial de Kilovatios
HP	=	Potencia del motor
$\epsilon_a$	=	Eficiencia actual (luego del rebobinado)
$\epsilon_o$	=	Eficiencia original del motor
Hrs / años	=	Horas de trabajo del motor por año
\$ / Kwh.	=	Costo del kilovatio – hora

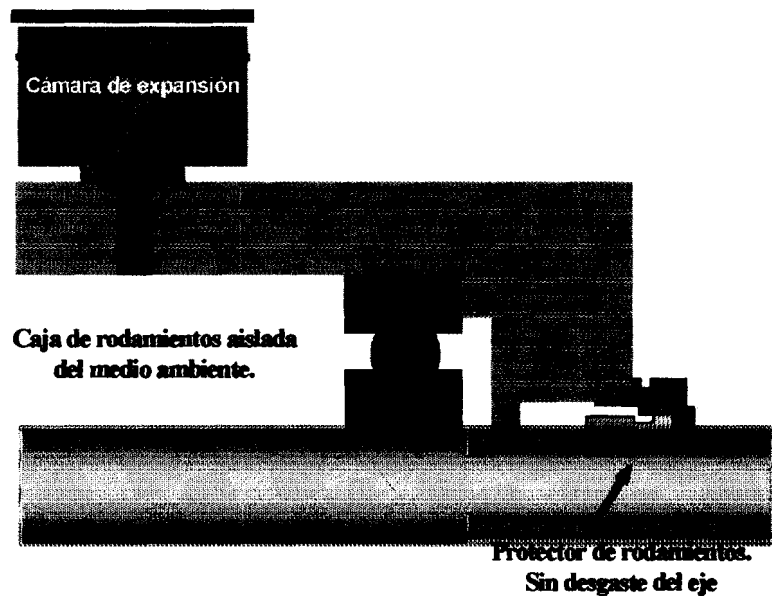
Para reducir o eliminar las causas más frecuentes de paradas descritas en el capítulo anterior se sugieren las siguientes alternativas:

### **2.2.1. Rodamientos.**

Como se mencionó, la principal causa de falla en rodamientos es su lubricación.

En cuanto a la contaminación del lubricante, esta se puede eliminar utilizando un protector de rodamientos que no permita la entrada de contaminantes, y reemplazar los respiradores (lubricación con aceite), por cámaras de expansión que aísla la caja de rodamientos del medio ambiente (Fig.2.2). Cabe indicar

que la norma API 610 2.9.2.7 indica que sellos de labios (retenedores) no deben utilizarse para proteger los rodamientos. Si bien es cierto que esta es una norma para la industria del petróleo, es aplicable para todo tipo de industria que desee proteger de mejor manera sus rodamientos.



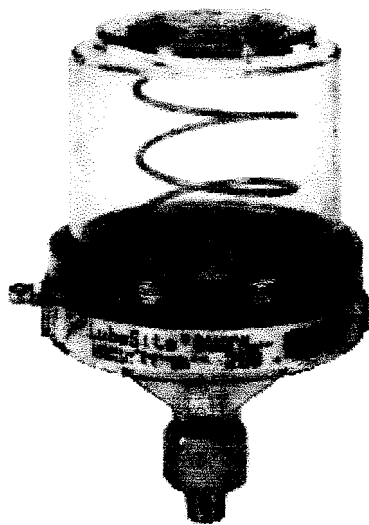
**Fig. 2.2.- Sistema de barrera de la contaminación**

Para mantener los rodamientos siempre lubricados, habría que implementar, en el caso de lubricación por aceite, visores que deben estar ubicados a un costado de la caja de rodamientos al nivel óptimo de lubricación, y así poder observar si le hace falta o no aceite.

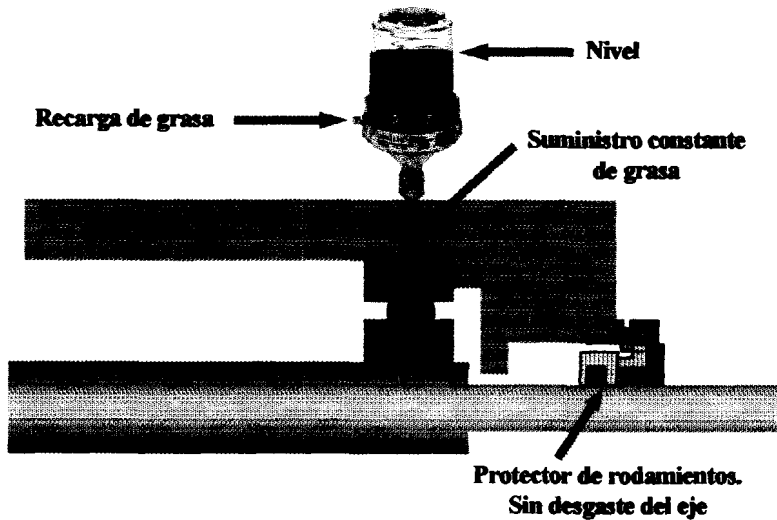
Con este sistema no son necesarios los dosificadores de aceite puesto que prácticamente no se consume el aceite. En el caso

de lubricación por grasa, existen dispositivos que constantemente suministran grasa a los rodamientos a demanda, es decir, que solo suministra grasa cuando el rodamiento lo requiere. Este dispositivo se instala en el lugar donde se ubican los graseros, y consta de un vaso de acrílico transparente para poder visualizar el nivel de grasa. (Fig. 2.3). Al suministrar solamente la cantidad de grasa necesaria se obtiene un ahorro considerable en cuanto a lubricante se refiere, además de extender los tiempos entre lubricación (Fig. 2.4).

Manteniendo los rodamientos libres de contaminantes, con cargas y temperaturas de trabajo adecuadas y lubricados adecuadamente (lubricante apropiado y cantidad necesaria) podemos alargar la vida de los rodamientos y asegurar que trabaje de una manera más confiable.



**Fig. 2.3.- Cona automática de lubricación.**

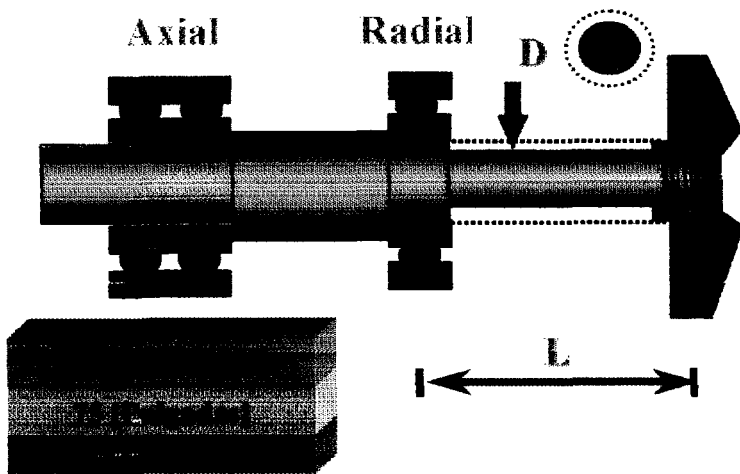


**Fig. 2.4.- Protección y lubricación constante de rodamientos con grasa.**

### **2.2.2. Factor de deflexión del eje.**

La industria hoy en día demanda reducir los costos de mantenimiento a través de incrementar grandemente la confiabilidad de las bombas y mejorar el tiempo entre fallas (MTBF- mean time between failure). Un nuevo diseño para las bombas con el impeler en voladizo ha cumplido éstos requerimientos reduciendo dramáticamente el factor de flexión del eje y aminorando la carga en los rodamientos.

Factores de deflexión bajos significan menor deflexión del eje bajo una carga común. Por lo tanto, la cantidad de flexión está en proporción directa al incremento en el factor de esbeltez (Fig. 2.5).



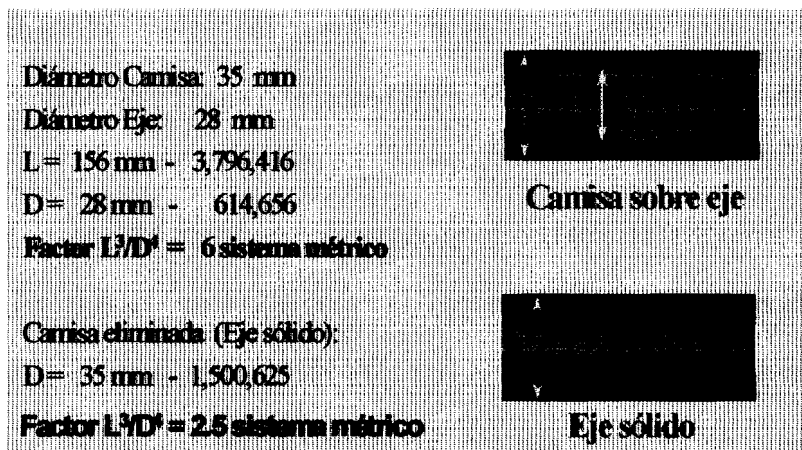
**Fig. 2.5.- Factor de deflexión  $L^3 / D^4$**

Las 0.002 pulgadas permitidas (ANSI B73 y API 610) es una tolerancia fácilmente alcanzable en los procesos comunes de fabricación.

Sin embargo las herramientas actuales de maquinado permiten llegar a tolerancias más precisas, obteniéndose bombas con movimientos del eje significativamente reducidos que alargará grandemente la vida de los sellos mecánicos.

Cuando se tienen ejes con un factor de deflexión alto ( $L^3/D^4 > 2$  en sistema métrico y  $L^3/D^4 > 75$  en pulgadas) existen dos maneras de disminuirlo: a) disminuyendo la longitud ( $L$ ) entre el rodamiento y el centro del impeler, y b) aumentando el diámetro ( $D$ ) del eje en dicha sección.

Lo primero no es muy aconsejable puesto que se variarían las dimensiones de la bomba. Lo segundo es muy fácil de lograr, especialmente cuando se utilizan camisas en los ejes. Para esto es necesario construir un nuevo eje sólido sin la necesidad de la camisa. En la figura 2.6 se muestra un ejemplo de esto.



**Fig. 2.6.- Ejemplo de cómo reducir de una manera simple el factor  $L^3 / D^4$**

### 2.2.3. Empaquetaduras.

Las especificaciones ANSI para bombas fueron escritas hace más de 20 años cuando las empaquetaduras en cordón eran comunes. Las especificaciones de las dimensiones tuvieron como resultado los requerimientos de espacio para un número mínimo de anillos de empaques y un anillo de linterna. Sin embargo en la industrias como las químicas, los empaques están empezando a ser obsoletos porque las fuertes regulaciones



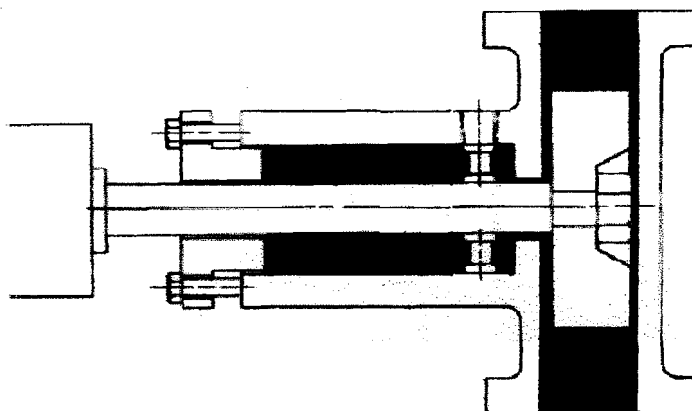
ambientales dictan que deben haber cero fugas y cerca de cero emisiones fugitivas. Esto implica que los requerimientos de dimensiones creados por la ANSI, hoy en día, son innecesarios. A pesar de esto, las empaquetaduras son grandemente utilizadas, y permanecerán por mucho tiempo presente en las industrias. Tal es así que todavía se siguen diseñando bombas con cajas y tapas prensaestopas (Plano 2, primer recuadro).

La selección de la empaquetadura adecuada es el primer paso para obtener un mejor rendimiento de la bomba. Es importante tener en cuenta el fluido que se va a sellar, su temperatura y presión de trabajo, la velocidad del eje, si el fluido contiene sólidos, si se cristaliza, si es corrosivo, etc.. Hasta hace muy poco tiempo, esta selección quizá era un poco complicada, puesto que existían muchas alternativas de materiales de empaques. Hoy en día, existen nuevos materiales como el Grafito y el Carbón que se los pueden utilizar en casi todas las aplicaciones (prácticamente todo el rango de ph), además que permiten muchas menos fugas (en algunos casos casi cero), soportan velocidades y temperaturas mayores, y sobre todo, el desgaste que producen en el eje o camisa es mínimo.

Por otro lado, los diseños de las cajas siguen siendo prácticamente iguales que hace muchos años. Muy pocos

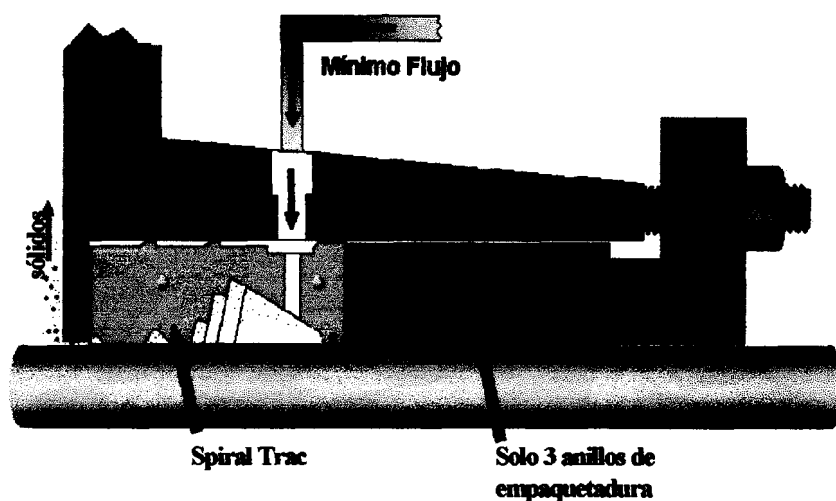
fabricantes han implementado mejoras en este aspecto. De ahí la importancia de implementarlas para ayudar a alargar la vida de los empaques. Como se mencionó en el punto 1.3.3, cuando se utilizan anillos linternas, estos terminan siendo desplazados hacia el fondo conforme se aprieta la tapa del estopero (ver Fig. 1.15).

Esto se lo puede eliminar con una pequeña modificación en su diseño como se muestra en la figura 2.7. Al mover el anillo linterna al fondo, éste permanecerá siempre en su sitio aprovechando al máximo el fluido inyectado. Es importante que la tolerancia entre el fondo de la cajera y el eje sea lo menor posible, sino habría que instalar un buje entre el fondo y el anillo linterna que cierre esta tolerancia. Este buje tiene que ser de algún material compatible con el fluido, rígido y de baja fricción, como por ejemplo de teflón, bronce, etc.



**Fig. 2.7.- Ubicación del anillo linterna en el fondo del estopero para evitar su desplazamiento.**

Lo anterior es muy fácil de implementar y va dirigido a aplicaciones donde se manejan fluidos con sólidos en suspensión o que se cristalizan, para alargar la vida a las empaquetaduras y disminuir desgastes en el eje o camisa. Pero existe una manera mucho más efectiva aún de lograr esto y con ventajas adicionales. Se trata de un elemento llamado Spiral Track (fabricado por la compañía Enviro Seal), cuya función principal es sacar los sólidos de la caja (Fig. 2.8), de tal manera que las empaquetaduras trabajen con fluido limpio con las siguientes ventajas: alargar la vida de las empaquetaduras, reducir el desgaste de las camisas o ejes, reducir las fugas, eliminar el anillo linterna, reducir el consumo del fluido de inyección, disminuir el número de anillos de empaquetadura, y lo que es muy importante, no se necesita modificar el diseño de la bomba.



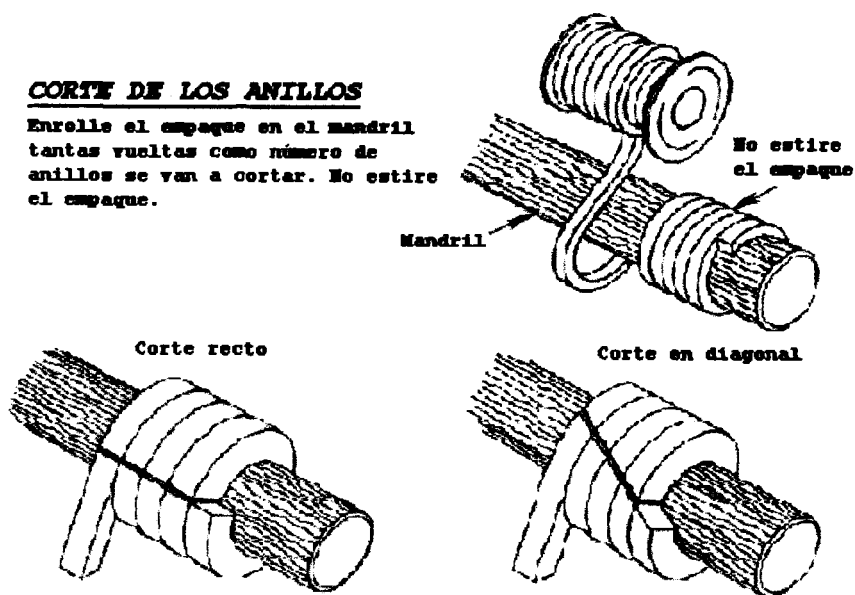
**Fig. 2.8.-Spiral Trac con empaquetaduras.**

Además existen otras aplicaciones que comúnmente utilizan inyección de fluido, pero que realmente no sería necesario utilizando los empaques adecuados, obteniéndose incluso un mejor y mayor tiempo de sellado, y lógicamente un gran ahorro al no utilizar dicho fluido.

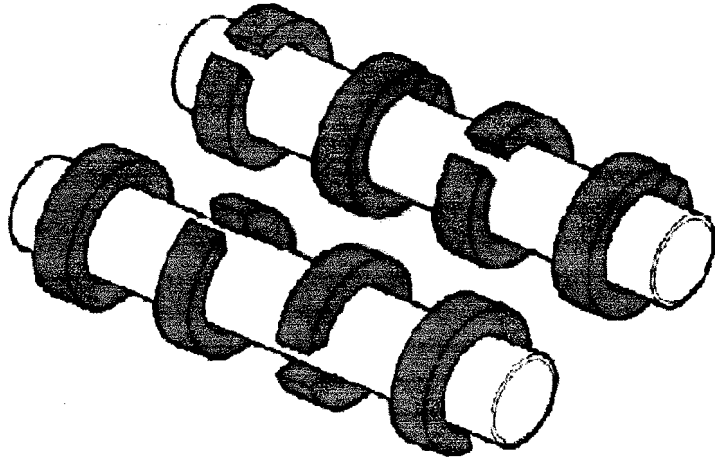
Adicional a todo lo mencionado, el corte de los anillos de empaques tiene que ser uniforme y permitir que la unión de los extremos sea lo más estrecha posible. Un corte sesgado a  $45^\circ$  muchas veces es recomendado. (Fig. 2.9). Los anillos deben instalarse desfasados entre sí, de tal manera que no coincidan sus cortes para no crear un camino de fuga. Se sugiere que el desfase sea de  $90^\circ$  (Fig. 2.10).

#### **CORTE DE LOS ANILLOS**

Enrolle el empaque en el mandril tantas vueltas como número de anillos se van a cortar. No estire el empaque.



**Fig. 2.9.- Método recomendado para el corte de los anillos de empaquetadura**



**Fig. 2.10.- Manera de instalar los anillos de empaquetadura.**

#### **2.2.4. Sellos mecánicos.**

Como en los puntos anteriores, la correcta selección del sello mecánico también es el primer paso para obtener un buen sellado por largo tiempo. En cuanto a los materiales de construcción del sello (elastómeros, partes bocín, pemos y resortes), deben ser compatibles con el fluido a sellar y así como soportar las temperaturas de trabajo.

Para la selección de las partes metálicas deben tomarse en cuenta las siguientes recomendaciones:

- a) Los componentes metálicos (cajas, tornillos prisioneros, etc) deben ser del mismo material y calidad que los de la bomba o equipo.

- b) El acero inoxidable 316 puede especificarse si cualquier calidad de acero inoxidable es aceptable.
  
- c) El acero inoxidable 316 es aceptable en la mayoría de los equipos en los que las piezas que se mojan se fabrican de hierro, acero o bronce.
  
- d) Un sello no metálico puede usarse en cualquier tipo de bombas que no sean metálicas, o cuando se manejan ciertas sustancias químicas.

No es recomendable usar resortes o fuelles de acero inoxidable debido a la posibilidad de producirse corrosión en tensión, por presencia de cloruros. El Hastelloy C es el mejor material para resortes y fuelles. En cuanto a la selección de las caras de los sellos hay que tomar en cuenta lo siguiente:

- I. Combinaciones de caras de grafito de carbón (Cb) no relleno contra cerámica (Cr) 99.5% pura son las mejores posibilidades para la mayoría de las aplicaciones.
  
- II. El carbón, en cualquiera de sus formas, no es lo que se recomienda cuando el fluido a sellar es algún agente oxidante fuerte.

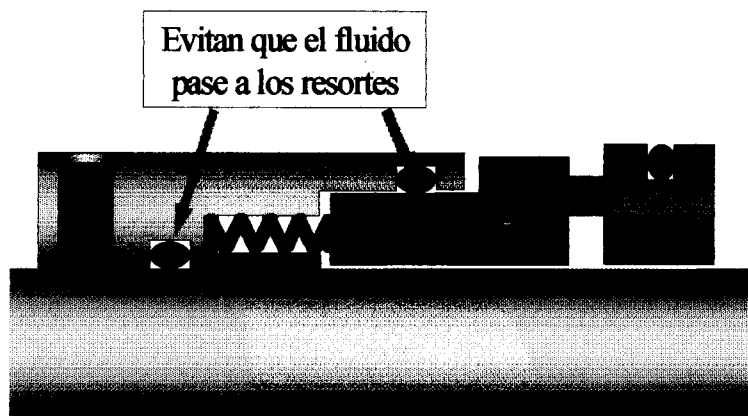
- III. Cerámica contra cerámica es la opción de caras para productos químicos oxidantes fuertes.
  
- IV. Algunas veces el carbón no es aceptable debido a la contaminación del color ( industrias farmacéuticas y de papel). Si el carbón no es aceptable se puede llegar a usar cerámica contra cerámica.
  
- V. Carbón contra carburo de Tungsteno (TC) se utiliza cuando no se desea usar cerámica o cuando ésta se está quebrando en la aplicación debido a temperaturas altas o vibraciones excesivas.
  
- VI. Carburo de Tungsteno contra Carburo de Tungsteno (ambas caras sólidas y duras) se utiliza cuando el producto tiene tendencia a pegar las caras entre sí o si hay presencia de abrasivos.
  
- VII. El carburo de silicio (SC), debido a su costo más bajo es un buen sustituto del TC.

Para la selección de los elastómeros, existen listados de compatibilidades químicas con los distintos fluidos, por medio de la cual podemos escoger el más adecuado.

Para seleccionar el tipo de sello deben tomarse en cuenta las dimensiones o espacios disponibles en la bomba y las dimensiones del sello (Plano 3 y 4).

Con relación a las causas de fallas mencionadas en el punto No. 1.3.4, éstas pueden ser eliminadas siguiendo las siguientes recomendaciones:

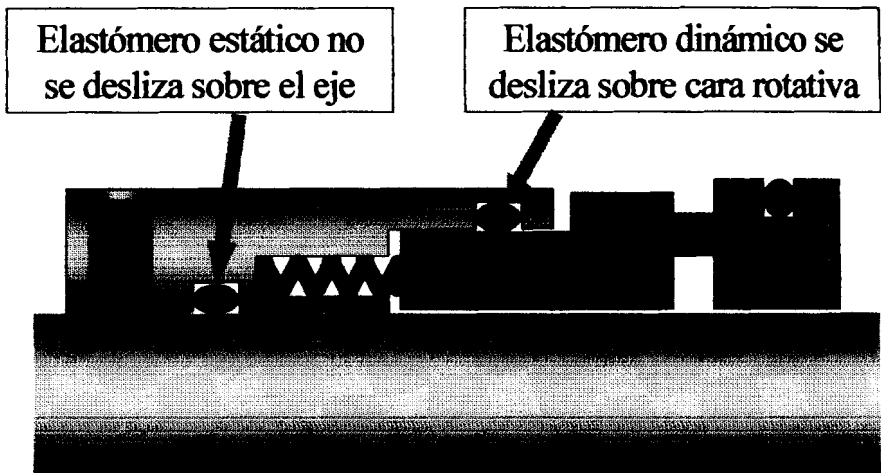
- a) Utilizar diseños de sellos mecánicos donde los resortes estén aislados del fluido para evitar que se contaminen y se traben (Fig. 2.11).



**Fig. 2.11.- Sello mecánico con los resortes aislados del fluido.**

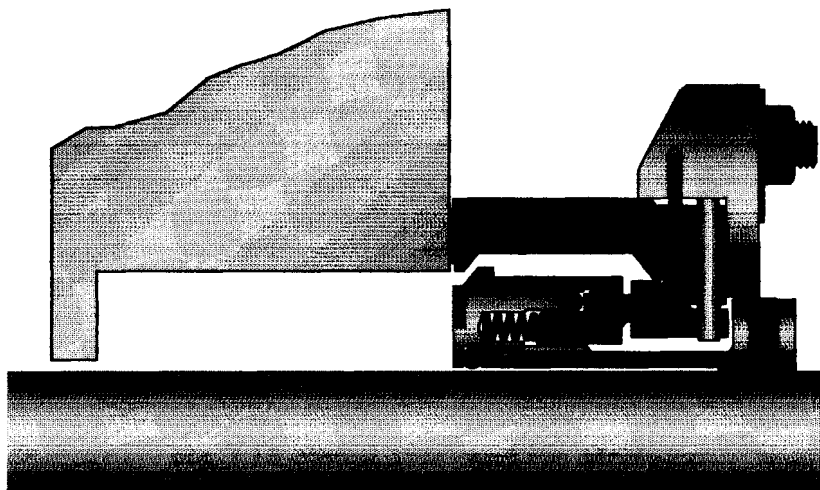
- b) El sistema de arrastre de la cara (pines) no debe lastimarla.
- c) El sello mecánico no debe tener ningún elastómero dinámico sobre el eje (Fig. 2.12).





**Fig. 2.12.- Elastómeros del sello no se deslizan sobre el eje**

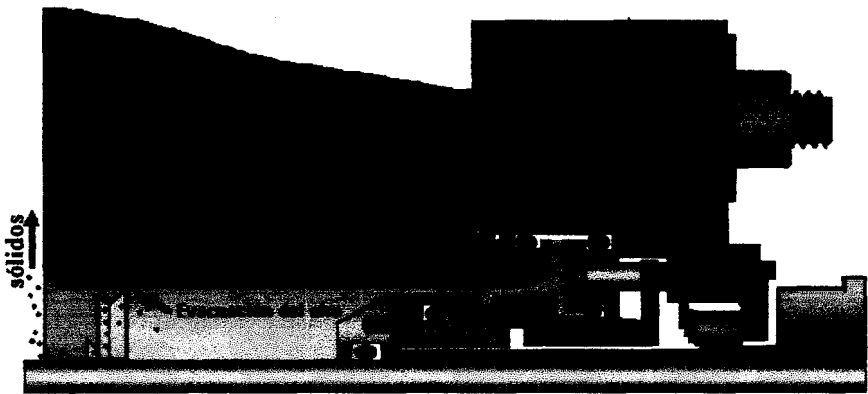
- d) Se deben utilizar sellos hidráulicamente balanceados y disminuir el factor de deflexión del eje para darle mayor rigidez y disminuir las probabilidades de que las caras se abran.
- e) La cara de carbón de los sellos debe de ser de la mejor calidad (carbón P-658RC).
- f) Cambiar los sellos con diseños de fuelles por diseños de resortes.
- g) La instalación debe ser hecha por una mano especializada, o en su defecto utilizar sellos de cartucho que ya vienen calibrados (Fig. 2.13).



**Fig. 2.13.- Sello mecánico de cartucho**

- h) Seleccionar los materiales y el diseño del sello más adecuado (arriba expuesto).

Al igual que para las empaquetaduras, también existe una versión del Spiral Trac para usarlo en combinación con sellos mecánicos (Fig. 2.14). Así mismo su aplicación principal es con fluidos con sólidos o que se cristalizan. Las ventajas que se obtienen son: permite operar al sello con fluido limpio, incremento de la vida del sello mecánico, reduce o elimina el flujo de inyección, elimina la erosión del sello y de la cajera, reduce el desgaste del eje o camisa, permite el uso de caras suaves en fluidos no cristalizables, permite operar a los sellos mecánicos en aplicaciones donde no era posible antes, protege a los sellos simples o dobles.



**Fig. 2.14.-Spiral Trac con Sello Mecánico.**

### **2.2.5. Protección de la estructura de los equipos.**

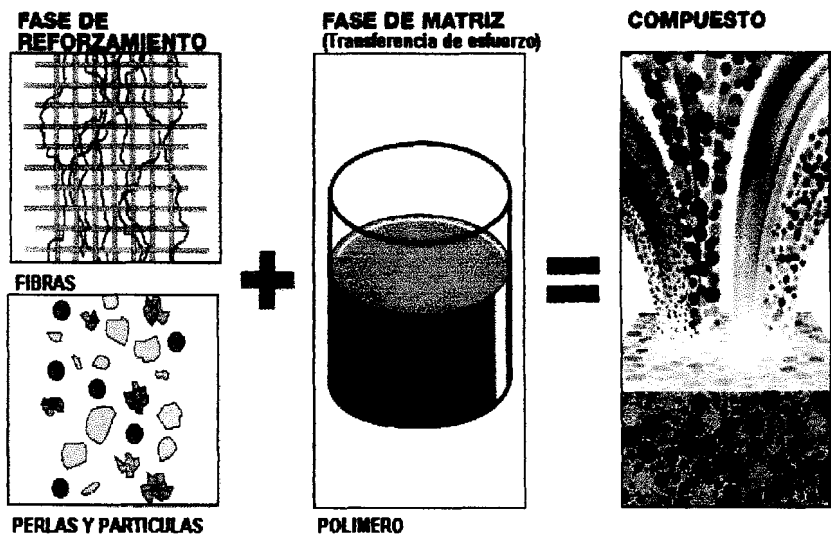
Existe una alternativa muy efectiva para proteger estructuras metálicas contra la abrasión, erosión, ataque físico, ataque químico u oxidación.

Existen recubrimientos poliméricos (base cerámicos) exclusivamente para este tipo de aplicaciones, los cuáles llegan a tener una fuerza de adherencia superior a la fuerza de repulsión de la oxidación (alrededor de 2300 psi), lo que permite que se mantengan fuertemente adheridos, protegiendo la superficie de mucha mejor manera.

Consisten básicamente de una fase de refuerzo (fibras, perlas, partículas) más una fase matriz polimérica (Fig.2.15). Vienen en

dos o más componentes que al mezclarse generan una reacción química (sin solventes – 100 % sólidos) que cura en un compuesto sólido.

De acuerdo a la necesidad, existen productos para recuperar superficies, maquinables o no maquinables, para protección contra la oxidación, contra abrasivos, contra ataque químico o físico.



**Fig. 2.15.- Composición de los compuestos poliméricos.**

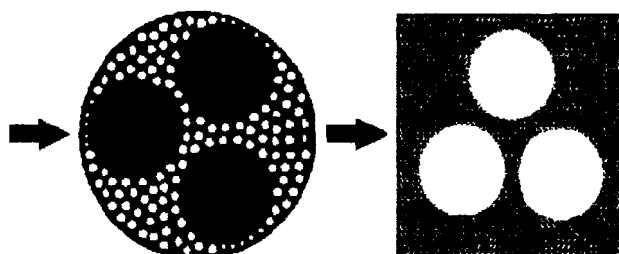
Estos recubrimientos tienen una excelente resistencia al desgaste, ataque químico y oxidación. Combinan la resistencia al desgaste de los cerámicos con el beneficio de la tecnología de los compuestos poliméricos (Fig.2.16 a y b).

**Diseño de compuesto con refuerzo  
cerámico para abrasión severa**



**Figura 2.16 a**

**Diseño de compuesto con refuerzo  
cerámico para abrasión severa**

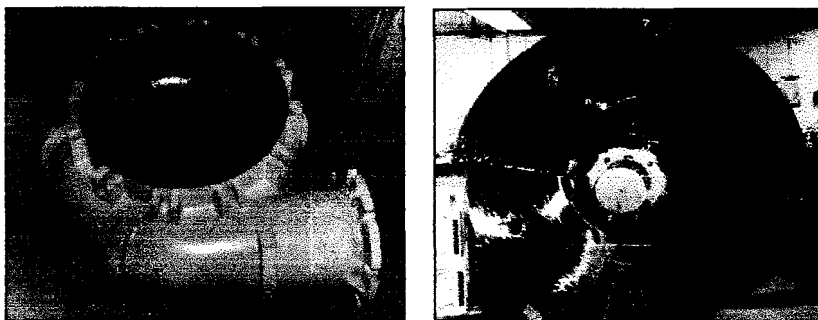


**Máximo refuerzo físico**

- Matriz expuesta a la abrasión al mínimo.
- Máxima resistencia al desgaste.

**Figura 2.16 b**

En la figura 2.17 se muestran una carcaza y un impulsor ya recubiertos con estos productos. Su superficie es muy regular y lisa, ayudando al fluido a circular con menor resistencia. Esto implica que la bomba consumirá mucha menor energía, con lo que se obtendrá un gran ahorro económico (ver punto 2.5 – costos).



**Fig.2.17.- Carcaza de bomba e impulsor recubiertos con compuestos poliméricos.**

Para aplicar estos productos es necesario preparar correctamente la superficie. Es necesario obtener una rugosidad superficial (75 – 125 micrones) para que el producto ancle. Así mismo limpiar la superficie de todo tipo de contaminantes (óxidos, sales, grasas, etc.).

### **2.3. Prácticas de mantenimiento.**

Con las sugerencias propuestas el mantenimiento se volverá más especializado, profesional y eficiente, puesto que se están aboliendo las causas de las fallas en las bombas centrífugas, y realmente mejorando su funcionamiento.

El mantenimiento se volverá menos repetitivo, interviniéndose los equipos en menor cantidad de veces, reduciendo al máximo las posibilidades de que se produzcan daños, y lo que es más importante,

se aumentará el rendimiento del equipo, volviéndolo más productivo por mucho más tiempo.

Pero para poder implementar un mejoramiento óptimo es necesario contar con el personal adecuado y debidamente calificado, el cual optimizará su tiempo y podrá realizar otras actividades, pues ya no dedicará tanto tiempo a estar corrigiendo fallas de equipo en equipo.

#### **2.4. Tiempo entre paradas.**

Los equipos, una vez eliminado el motivo principal por el cual fallan, trabajan de una manera más eficiente, confiable y segura, extendiéndose considerablemente sus períodos de producción, lo que significa que los tiempos entre paradas de los equipos son mucho más largos .

La extensión de éste tiempo es una de las metas que se están imponiendo las industrias a nivel mundial; Desde hace algún tiempo, la industria del petróleo está siendo exigida para que sus equipos trabajen por tres años sin intervención de mantenimiento, e inclusive hoy en día se está trabajando para implementar el incremento de este tiempo a 5 años.

#### **2.5. Costos.**

Si bien es cierto, la inversión inicial en obtener mayor confiabilidad en equipos es mayor que lo acostumbrado, al implementar las mejoras sugeridas en los puntos anteriores, disminuiría el costo del mantenimiento total (por el orden de un 50%), e inclusive reduciría el presupuesto de gastos hasta en un 60% (Fig. 2.18).

### El Mantenimiento de hoy Es Muy Costoso

- ◆ 65% del mantenimiento realizado es Reactivo
- ◆ 30% es Preventivo - MP ( 60% es innecesario )
- ◆ 5% es Predictivo - MPd

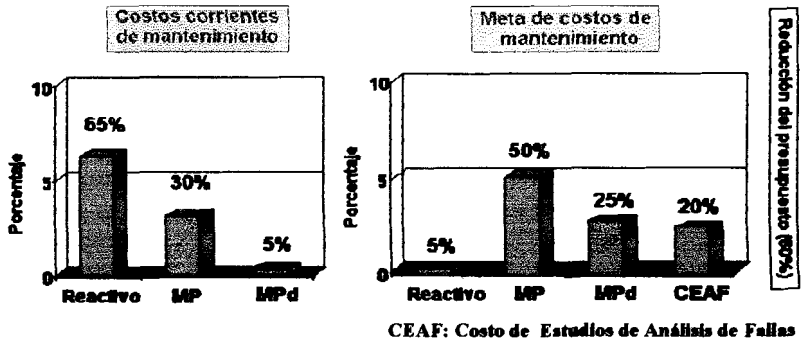


Fig. 2.18.- Reducción del costo del mantenimiento total.

Implementadas las mejoras, el mayor costo de una bomba operando adecuadamente pasa a ser el consumo de energía (Fig.2.19).

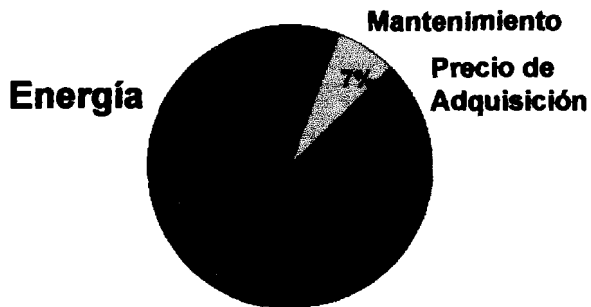
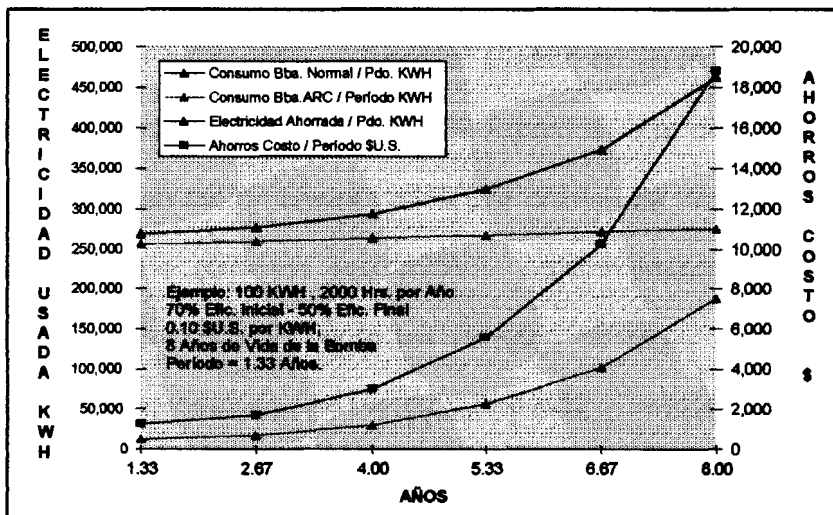


Fig. 2.19.- Costos Totales de la Bomba



El costo por consumo de energía se puede aún bajar más. Por ejemplo en la figura 2.20 se muestra un cuadro elaborado por la compañía A. W. Chesterton, fabricante de recubrimientos cerámicos, en la que compara el consumo de energía de una bomba sin recubrimiento en un período de 8 años (tiempo promedio de vida), con una bomba similar recubierta con su compuesto cerámico (ARC) en el mismo período de tiempo. El cuadro muestra que con este recubrimiento cerámico al cabo de los 8 años, se pueden obtener ahorros de hasta 190.000 KW y \$19.000 (\$0.10 el KWH). También podemos apreciar que durante todo el período el consumo de energía ha sido más uniforme, lo que implica que la eficiencia de la bomba ha variado muy poco.



**Fig. 2.20.- Energía Ahorrada durante Vida de la Bomba – Cuadro elaborado por la Cía. A. W. Chesterton.**

# **CAPITULO 3**

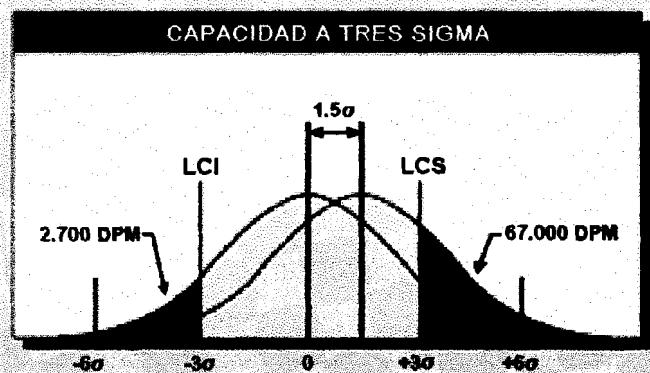
## **3. MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS: TEORIA DEL SEIS SIGMA.**

### **3.1. Concepto del Seis Sigma**

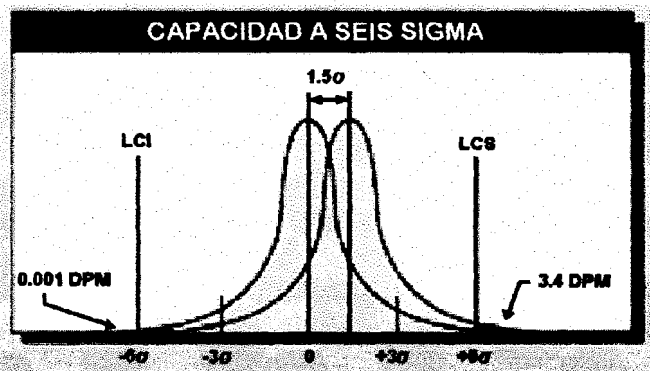
Seis Sigma, es una filosofía de trabajo y una estrategia de negocios, la cual se basa en el enfoque hacia el cliente, en un manejo eficiente de los datos y metodologías y diseños robustos, que permite eliminar la variabilidad en los procesos y alcanzar niveles de defectos menores o iguales a 3,4 defectos por millón!. Adicionalmente, otros efectos obtenidos son: reducción de los tiempos de ciclo, reducción de los costos, alta satisfacción de los clientes y más lo importante aún, efectos dramáticos en el desempeño financiero de la organización.

En general, los procesos estándares tienden a comportarse dentro del rango de tres (3) Sigma (Fig. 3.1), lo que equivale a un número de defectos de casi 67.000 por millón de oportunidades (DPMO); esto significa un nivel de calidad de apenas 93,32%, en contraposición con

un nivel de 99,9997% para un proceso de Seis Sigma, con 3,4 DPMO, (Fig. 3.2). Comparativamente, un proceso de Tres Sigma es 19.645 veces más malo (produce más defectos) que uno de Seis Sigma.



**Fig. 3.1.- Curva de variación para un nivel Tres Sigma.**



**Fig. 3.2.- Curva de variación para un nivel Seis Sigma.**

¿Quiénes utilizan Seis Sigma ? . Empresas comprometidas con la satisfacción del cliente en la entrega oportuna de productos y servicios, libres de defectos y a costos razonables. Algunos ejemplos: Motorola, Allied Signal, General Electric (G.E.), Polaroid, Sony, Lockheed, NASA, Black & Decker, Bombardier, Dupont, Toshiba, etc.

Su aplicación requiere del uso intensivo de herramientas y metodologías estadísticas (en su mayoría) para eliminar la variabilidad de los procesos y producir los resultados esperados, con el mínimo posible de defectos, bajos costos y logrando siempre la máxima satisfacción del cliente. Esto contrasta con la forma tradicional de asegurar la calidad, al inspeccionar post-mortem y tratar de corregir los defectos, una vez producidos.

Un proceso con una curva de capacidad afinada para seis (6) sigma, es capaz de producir con un mínimo de hasta 3,4 defectos por millón de oportunidades (DPMO), lo que equivale a un nivel de calidad del 99.9997 %.

Este nivel de calidad se aproxima al ideal del cero-defectos y la gran ventaja que puede ser aplicado no solo a procesos industriales de manufactura, sino también en procesos transaccionales y comerciales de cualquier tipo, como por ejemplo: en servicios financieros, logísticos, mercantiles, etc.

Quizá la contribución más importante para el auge y desarrollo actual de Seis Sigma, haya sido el interés y esfuerzo dedicado para su implantación en toda G.E., desde sus divisiones financieras, hasta sus divisiones de equipos médicos y de manufactura.

### **3.2. Historia del Seis Sigma**



Esta filosofía se inicia en los años 80's como una estrategia de negocios y de mejoramiento de la calidad, introducida por Motorola, la cual ha sido ampliamente difundida y adoptada por otras empresas de clase mundial, tales como: G.E., Allied Signal, Sony, Polaroid, Dow Chemical, FedEx, Dupont, NASA, Lockheed, Bombardier, Toshiba, J&J, Ford, ABB, Black & Decker, etc

La historia real de Seis Sigma se inicia en Motorola cuando un ingeniero (Mikel Harry) comienza a influenciar a la organización para que se estudie la variación en los procesos, como una manera de mejorar los mismos. Estas variaciones son lo que estadísticamente se conoce como desviación estándar (alrededor de la media), la cual se representa por la letra griega sigma ( $\sigma$ ).

Esta iniciativa se convirtió en el punto focal del esfuerzo para mejorar la calidad en Motorola, capturando la atención de uno de los principales de Motorola: Bob Galvin. Con el apoyo de Galvin, se hizo énfasis no sólo en el análisis de la variación sino también en la mejora continua, estableciendo como meta obtener 3,4 defectos (por millón de oportunidades) en los procesos; algo casi cercano a la perfección.

Esta iniciativa llegó a oídos de Lawrence Bossidy, quién en 1991 y luego de una exitosa carrera en General Electric, toma las riendas de Allied Signal para transformarla de una empresa con problemas en una

máquina exitosa. Durante la implantación de Seis Sigma en los años 90 (con el empuje de Bossidy), Allied Signal multiplicó sus ventas y sus ganancias de manera dramática. Este ejemplo fue seguido por Texas Instruments, logrando el mismo éxito. Durante el verano de 1995, Jack Welch de G.E., se entera del éxito de esta nueva estrategia de boca del mismo Lawrence Bossidy, dando lugar a la mayor transformación iniciada en esta enorme organización.

El empuje y respaldo de Jack Welch transformaron a GE en una "organización Seis Sigma", con resultados impactantes en todas sus divisiones. Por ejemplo: G.E. Medical Systems recientemente introdujo al mercado un nuevo scanner para diagnóstico (con un valor de 1,25 millones de dólares) desarrollado enteramente bajo los principios de Seis Sigma y con un tiempo de scan de sólo 17 segundos (lo normal eran 180 segundos). En otra de las divisiones: G.E. Plastics, se mejoró dramáticamente uno de los procesos para incrementar la producción en casi 500 mil toneladas, logrando no sólo un beneficio mayor, sino obteniendo también el contrato para la fabricación de las cubiertas de la nueva computadora iMac de Apple.

### **3.3. Perspectiva del Seis Sigma**

Seis Sigma es una metodología rigurosa que utiliza herramientas y métodos estadísticos, para definir los problemas y situaciones a mejorar,

Medir para obtener la información y los datos, Analizar la información recolectada, Incorporar y emprender mejoras al o a los procesos y finalmente, controlar o rediseñar los procesos o productos existentes, con la finalidad de alcanzar etapas óptimas, lo que a su vez genera un ciclo de mejora continua.

La metodología formal de aplicación de Seis Sigma en general sigue este esquema: DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control); sin embargo, algunos practicantes prefieren incorporar otras etapas adicionales, tales como: Reconocer la situación o problema, Estandarizar los nuevos procesos en toda la organización, y finalmente, Integrar los cambios o soluciones a toda la organización.

Dentro de las herramientas utilizadas para soportar Seis Sigma, se encuentran casi todas las conocidas en el mundo de la Calidad tradicional, TQM, etc. Se pueden mencionar entre otras:

- CIP, Procesos de Mejora Continua.
- Diseño / rediseño de Procesos.
- Análisis de Varianza, ANOVA.
- Cuadro de Mando Integral, BSC.

- **La Voz del Cliente, VOC.**
  
- **Pensamiento Creativo.**
  
- **Diseño de Experimentos, DoE.**
  
- **Gerencia de los Procesos.**
  
- **Control Estadístico de Procesos, SPC.**

**Los elementos claves que soportan la filosofía Seis Sigma y que aseguran una adecuada aplicación de las herramientas, así como el éxito de esta iniciativa como estrategia de negocios, son:**

- **Identificación de los elementos Críticos para la Calidad (CTQ), de los clientes Externos.**
  
- **Identificación de los elementos Críticos para la Calidad (CTQ), de los clientes Internos.**
  
- **Realización de los análisis y modos y efectos de las fallas (FMEA).**
  
- **Utilización del Diseño de Experimentos (DoE), para la identificación de las variables críticas.**



- Hacer Benchmarking permanente y establecer los objetivos a alcanzar, sin ambigüedades.

Esta filosofía promueve la utilización de herramientas y métodos estadísticos de manera sistemática y organizada, para el logro de mejoras dramáticas y medibles por su impacto financiero. El ingrediente secreto que hace que funcione, reside en la infraestructura que se establece en la organización.

Esta infraestructura, es la que motiva y produce una cultura "Seis Sigma" que junto con un "Proceso de Pensamiento" en toda la organización, genera un estilo de "Gerencia Basada en Conocimientos".

El soporte y compromiso por parte de la Alta Gerencia es vital y fundamental, para lo cual se realizan entrenamientos y a través de los cuales se definen los Maestros (también conocidos como Campeones o Champions), quienes son los dueños de los proyectos críticos para la organización. Para desarrollar estos proyectos se escogen y preparan expertos (conocidos como: Master Black Belt, Black Belt, Green Belt), quienes se convierten en agentes de cambio para impulsar y desarrollar grandes y variados proyectos, en conjunto con los equipos de trabajo seleccionados para los mismos.

#### **3.4. Variación en los procesos**

La variación en los procesos constituye una de las fuentes principales de insatisfacción en los clientes; si se logra encontrar su causa raíz y se elimina, los clientes sentirán la diferencia.

No siempre se obtiene el mismo producto o servicio con el mismo nivel de conformidad a lo especificado y de forma consistente y repetitiva; por ejemplo, cuándo fue la última vez que Ud.:

- Fue de compras a una tienda y escogió la cola de pago más lenta.
- Recibió un corte de cabello más corto o más largo que lo usual, distinto a como Ud. lo quería.
- Decide comprar unos zapatos y en la tienda se encuentra con el vendedor más ignorante de todos.

Posiblemente en más de una oportunidad usted haya sido atendido de una manera rápida y ágil en la cola de pago de la tienda, recibió el corte de cabello perfecto tal y como usted lo esperaba y se encontró con el vendedor de zapatos más diligente y conocedor de todos. ¿No sería ideal que siempre fuera así?

A continuación para tener mas claros los conceptos se expone un ejemplo de variación en los procesos: considere la compra de una

deliciosa pizza, la cual Ud. Ordena en la pizzería que está de camino a su casa. Se dispone de dos pizzerías de las cuales se tiene la siguiente información en cuanto a tiempos de preparación (en minutos), para 10 pizzas:

Pizzería ABC: 6,5 - 6,6 - 6,7 - 6,8 - 7,1 - 7,3 - 7,4 - 7,7 - 7,7 - 7,7

Pizzería XYZ: 4,2 - 5,4 - 5,8 - 6,2 - 6,7 - 7,7 - 7,7 - 8,5 - 9,3 - 10,0

Utilizando herramientas estadísticas comunes, tales como la media, mediana y moda, se obtienen los siguientes resultados:

Pizzería ABC: Media = 7,15 - Mediana = 7,20 - Moda = 7,7

Pizzería XYZ: Media = 7,15 - Mediana = 7,20 - Moda = 7,7

De estos resultados se puede observar que ambas pizzerías tienen las mismas medidas de tendencia central; es decir, en promedio, los clientes de ambas esperan por sus pizzas el mismo tiempo. Basado en estos resultados, es difícil distinguir diferencias en ambos procesos como para tomar alguna decisión al respecto. Si se observan nuevamente los datos de tiempos de preparación, se puede observar una mayor variación (o dispersión) en los tiempos de la pizzería XYZ. Si todas las demás características de calidad de ambas pizzerías son

iguales, es probable que los clientes prefieran comprar sus pizzas en la ABC, por sus tiempos de preparación más consistentes y menos variables. En el mundo de los negocios se requiere de algo más preciso y confiable para medir y cuantificar la variación de los procesos; para ello se dispone de las siguientes medidas: Rango y Desviación Estándar

- **RANGO:** Una forma sencilla de medir la variación en los procesos es determinando el rango de las mediciones; es decir, la diferencia entre el valor más alto y el valor más bajo de la muestra. Si lo aplicamos a las dos pizzerías, se obtiene lo siguiente:

Pizzería ABC: Rango = 1,2 minutos

Pizzería XYZ: Rango = 5,8 minutos

El Rango más alto de la XYZ sugiere que ésta posee la mayor cantidad de variación asociada en el tiempo de preparación de sus pizzas. Si bien el Rango es bastante fácil de calcular, algunas veces puede llevar a conclusiones erróneas, dado que sólo considera los valores extremos de la muestra. La mejor herramienta disponible es la Desviación Estándar.

- **DESVIACION ESTANDAR:** La desviación estándar toma en consideración la variación de cada una de las mediciones alrededor de la media de la muestra, y se la calcula por la fórmula:

$$S = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}}$$

donde:

S: desviación estándar

n: número de mediciones

x: valor de cada medición.

Si se comparan las dos pizzerías, se obtiene lo siguiente:

Pizzería ABC: Desviación Estándar = 0,48 minutos

Pizzería XYZ: Desviación Estándar = 1,82 minutos

Definitivamente, la pizzería ABC exhibe la menor variación en los tiempos de preparación en comparación con la XYZ, lo cual confirma la observación inicial de los datos y el resultado previo del Rango.

En conclusión, si quiere un servicio más rápido y consistente, compre su pizza en la que presenta menos variación en sus procesos: Pizzería ABC.

De la misma forma se desarrolla la calidad de los productos y servicios que trabajan con demasiada variación, lo cual representa la posibilidad de pérdida de muchos clientes (baja en las ventas), mayor número de quejas y reclamos (insatisfacción – productos no cumplen con las expectativas de los clientes), mayor desperdicio y re-trabajo (altos costos) y por supuesto resultados nada buenos para el negocio desde el punto de vista financiero y de permanencia en el tiempo, frente a sus competidores, que están mejor preparados.

### **3.5. Diferencia entre calidad tradicional vs. Seis Sigma**

¿Qué es lo que hace diferente a la teoría del Seis Sigma de la Calidad Tradicional ?. ¿Es que acaso ambas no están soportadas por prácticamente las mismas herramientas y los métodos conocidos por los practicantes de la Calidad Total , TQM, etc. ?.

Las diferencias quizá residen en la forma de aplicar estas herramientas y su integración con los propósitos y objetivos de la organización, como un todo.

La integración y participación de todos los niveles y funciones dentro de la organización es un factor clave que está respaldado por un sólido compromiso por parte de la alta Gerencia y una actitud pro-activa, organizada y sistemática que va en busca de la satisfacción tanto de las

necesidades y objetivos de los clientes, como de las necesidades y objetivos de la propia organización.

En la tabla 2 se resumen algunas de las diferencias más notables entre la forma tradicional como se ha venido enfocando la Calidad en las organizaciones y la forma de enfocarla a través de la estrategia de Seis Sigma.

**TABLA 2**  
**DIFERENCIAS ENTRE CALIDAD TRADICIONAL Y SEIS SIGMA**

CALIDAD TRADICIONAL	SEIS SIGMA
Está centralizada. Su estructura es rígida y de enfoque reactivo.	Está descentralizada en una estructura constituida para la detección y solución de los problemas. Su enfoque es proactivo.
Generalmente no hay una aplicación estructurada de las herramientas de mejora.	Se hace uso estructurado de las herramientas de mejora y de las técnicas estadísticas para la solución de los problemas.
No se tiene soporte en la aplicación de las herramientas de mejora. Generalmente su uso es localizado y aislado.	Se provee toda una estructura de apoyo y capacitación al personal, para el empleo de las herramientas de mejora.
La toma de decisiones se efectúa sobre la base de presentimientos y datos vagos.	La toma de decisiones se basa en datos precisos y objetivos: "Sólo en Dios creo, los demás traigan datos".
Se aplican remedios provisionales o parches. Sólo se corrige en vez de prevenir.	Se va a la causa raíz para implementar soluciones sólidas y efectivas y así prevenir la recurrencia de los problemas.
No se establecen planes estructurados de formación y capacitación para la aplicación de las técnicas estadísticas requeridas.	Se establecen planes de entrenamiento estructurados para la aplicación de las técnicas estadísticas requeridas.
Se enfoca solamente en la inspección para la detección de los defectos (variables clave de salida del proceso). Post-Mortem.	Se enfoca hacia el control de las variables clave de entrada al proceso, las cuales generan la salida o producto deseado del proceso.

### 3.6. El costo de la calidad

¿Cuánto cuesta la calidad?. Esta es una pregunta que muchas organizaciones aún no encuentran cómo responder. La mayoría piensa que muy poco y otros que demasiado, al punto de considerar como aceptables las siguientes expresiones: "no podemos regalar calidad" o "mejorar nuestra calidad le costará demasiado al cliente". En muchas organizaciones promedio (tres sigma) el costo de entregar productos y servicios puede alcanzar hasta el 40,0 % de las ventas.

En general y de manera ideal, el costo de la calidad puede ser definido en cuatro categorías:

- **Fallas Internas:** Desperdicio (scrap), Re-trabajo y el desperdicio y re-trabajo de los suplidores. Aquí se puede apreciar su efecto en mayores niveles de inventario y largos tiempos de ciclo.
- **Fallas Externas:** Costo para el cliente (debido a los defectos), Costos de Garantía y Servicio, Ajustes por Reclamos y Material retornado o devuelto.
- **Aseguramiento:** Inspección, Pruebas y Ensayos, Auditorías de Calidad, Costo inicial y de Mantenimiento de los equipos de pruebas y ensayo.



- **Prevención:** Planeación de Calidad, Planeación de Procesos, Control de Procesos y Entrenamiento.

Adicionalmente, se deben considerar los costos asociados a los esfuerzos y programas para mejorar la calidad y especialmente los costos (de oportunidad) de producir más con los mismos activos y menos recursos (dedicados a corregir defectos y apagar incendios). Quizá el más difícil de estimar y el más duro de recuperar sería el costo de pérdida de la lealtad de los clientes y pérdida de ventas, por mala calidad.



Normalmente, las organizaciones sólo miden y toman en consideración para sus Costos de Calidad los siguientes elementos: Desperdicio (scrap), Gastos de Garantía, Costos de Inspección y Sobre tiempo. Casi siempre quedan por fuera elementos importantes que no se toman en cuenta o que los sistemas contables tradicionales no son capaces de manejar, como los siguientes: Incremento en los Gastos de Mantenimiento, Pérdida de Ventas, Insatisfacción de los Clientes, Pérdida de Tiempo (Downtime), Errores en Ingeniería y Desarrollo de Productos, Errores en listas de Materiales y Materiales e Insumos Rechazados.

En la tabla 3 se muestra una comparación del costo de la calidad (como porcentaje de las ventas) en relación al nivel sigma.

TABLA 3

## EL COSTO DE LA CALIDAD COMO PORCENTAJE DE LAS VENTAS

Nivel Calidad	DPMO	Nivel Sigma	Costo Calidad
30,9 %	690.000	1,0	NA
69,2 %	308.000	2,0	NA
93,3 %	66.800	3,0	25-40 %
99,4 %	6.210	4,0	15-25 %
99,98 %	320	5,0	5-15 %
99,9997	3,4	6,0	< 1 %

## 3.7. Ejemplos

Como ejemplo podemos citar a Motorola, que entre 1987 y 1994 redujo su nivel de defectos por un factor de 200. Redujo sus costos de manufactura en 1,4 billones de dólares. Incrementó la productividad de sus empleados en un 126,0 % y cuadruplicó el valor de las ganancias de sus accionistas.

Los resultados para Motorola hoy en día son los siguientes: Incremento de la productividad de un 12,3% anual; reducción de los costos de mala calidad sobre un 84,0%; eliminación del 99,7% de los defectos en sus procesos; ahorros en los costos de manufactura sobre los Once Billones de dólares y un crecimiento anual del 17,0% compuesto sobre ganancias, ingresos y valor de sus acciones.

Como otros ejemplos se pueden citar:

- El número de fatalidades en vuelos domésticos en Estados Unidos, fue de 0,43 ppm; es decir, un nivel entre 6 y 7 sigma.
- Generalmente, los centros de producción de energía nuclear, operan con niveles entre 6 y 7 sigma.
- Motorola, G.E., Lockheed, Allied Signal y la NASA, por la calidad de servicio efectúan la mayoría de sus procesos a niveles de 6 sigma
- Las compañías promedio en Estados Unidos tienen entre 1.000 y 10.000 dpm (defectos por millón), para un desplazamiento de 1,5 sigma; esto equivale a un nivel de 4 sigma.

Pero, la gran incógnita que nos formulamos ¿es el 99,0 % de calidad (nivel de 4 Sigma) realmente suficiente?. A continuación podemos citar

algunos ejemplos de porqué un nivel de calidad del 99,0 % no sería suficiente, ni satisfactorio, mucho menos aceptable:

- 20.000 piezas de correo perdidas cada hora.
- 5.000 operaciones de cirugía incorrectas, por semana.
- Al menos dos aterrizajes con problemas, diarios y en los principales aeropuertos.
- 200.000 prescripciones erradas de medicamentos, cada año.
- Falta de servicio eléctrico, por casi 7 horas, cada mes.

Como un ejemplo local de lo que se puede obtener si se efectúan cambios en los procesos o metodologías preestablecidas, se cita una aplicación (aunque no se utilizó la teoría del Seis Sigma) realizada en la empresa Pentaquim S.A. en Agosto de 1994. La situación era la siguiente:

Equipo:	Bomba Goulds 3196 ST
Tamaño:	4 x 3 – 7
Fluido:	Sulfato de aluminio.
Temperatura:	55° C

Presión descarga: 40 psi

Velocidad giro: 1750 rpm

Las reparaciones y/o cambio de las piezas de la bomba que se realizaban anteriormente (según datos proporcionados), se las resume de manera general en la tabla 4. Para ser más exactos en determinar el costo del mantenimiento que se efectuaba, sería necesario conocer valores como el consumo de energía de la bomba (no se midió), y el valor de la hora – hombre (no disponible, a los obreros se les paga sueldo fijo). Las pérdidas del producto por fugas es un factor que no incidía, puesto que se lo recuperaba, ya que la bomba operaba en un sitio cerrado. Para esto se contaba con otra bomba en stand by que succionaba todo el fluido que escapaba de la bomba principal. Cada reparación tomaba aproximadamente 8 horas.

**TABLA 4**

**GASTOS INCURRIDOS EN EL MANTENIMIENTO DE UNA BOMBA  
PREVIO A LA APLICACIÓN DE MEJORAS.**

Partes de equipo	Valor en \$	Reparación / cambio	Valor total (\$) 1 año	Valor total (\$) 2 años
Empaque cordón teflón/grafito ½ "	25,00	4 días	2.400,00	4.800,00
Camisa de eje A. I. 304 (relleno-cambio)	80,00	2 meses	480,00	960,00
Rodamientos motor	27,00	3 meses	108,00	216,00
Retenedores motor (2)	3,00	3 meses	24,00	48,00
Rodamientos bomba	40,00	7 días	1.920,00	3.840,00
Retenedores bomba (2)	3,00	7 días	288,00	576,00
Aceite de caja rodamiento ( 3lts)	3,50	7 días	168,00	336,00
<b>Total (\$)</b>			<b>5.388,00</b>	<b>10.776,00</b>



IB - ESPOL

Luego de las mejoras sugeridas e implementadas, incluida una bomba Goulds 3656 de 3 HP para el agua de inyección en la cajera, los gastos que se incurren, según datos proporcionados, se resumen en la tabla 5. Si bien es cierto no se tienen datos de la energía consumida por la bomba antes y después, se conoce que una bomba con sello mecánico consume aproximadamente el 40% menos que utilizando empaquetaduras. Las fugas de producto se han reducido a cero, y se ha suprimido la bomba adicional que se tenía debido a la confiabilidad que les ofreció el nuevo sistema. Esta bomba la han utilizado para duplicar la producción y también se instaló un sistema similar. Considerando que las intervenciones se han minimizado, se concluye que se reducen las probabilidades de daños en el mismo.

**TABLA 5**  
**GASTOS INCURRIDOS EN EL MANTENIMIENTO DE UNA BOMBA**  
**LUEGO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS.**

Partes de equipo	Valor en \$	Reparación / cambio	Valor total (\$) 1 año	Valor total (\$) 2 años
Sello mecánico 891 1-3/4" (carbón-cerámica) marca Chesterton	565,92	+ 2 años	565,92	565,92
Eje sólido A. I. 304 (sin camisa)	120,00	+ 2 años	120,00	120,00
Bomba Goulds 3656 3 HP	765,00	+ 3 años	765,00	765,00
* Rodamientos motor	27,00	* 1 año	27,00	54,00
* Retenedores motor (2)	3,00	* 1 año	6,00	12,00
* Rodamientos bomba	40,00	* 1 año	40,00	80,00
* Retenedores bomba (2)	3,00	* 1 año	6,00	6,00
Aceite de caja rodamiento (3 lts)	3,50	2 meses	17,50	35,00
<b>Total (\$)</b>			<b>1.547,42</b>	<b>1.637,92</b>

\* Realmente los rodamientos empezaron a dar signos de vibración mucho tiempo antes del año debido a la contaminación, pues los retenedores dejaban pasar suciedad y permitían fugas de aceite.

Si se comparan los datos de ambos cuadros, se observa que el costo del mantenimiento en el lapso de dos años se ha reducido aproximadamente en un 85%, que se ha obtenido una mayor productividad "pues al equipo se lo mantiene más tiempo operativo", se ha reducido el número de equipos (de 2 a 1), y se tiene un ambiente más limpio.

Pero podemos observar ahora que el problema ya no son las fugas sino los rodamientos los cuales deben ser protegidos de una mejor manera, pues necesariamente se tiene que intervenir al equipo para rellenar o cambiar el aceite y para cambiar los rodamientos por lo menos al año de operación, pero que realmente debería hacérselo antes, pues se está prolongando su trabajo a un año con el riesgo de que se genere algún problema serio.

Este sistema se puede mejorar aún más implementado protectores de rodamientos como los mencionados anteriormente con lo cual se alargará la vida de los rodamientos y se reducirá aún más el consumo de aceite. También se puede instalar un Spiral Trac para que el sello mecánico trabaje en un ambiente mucho más limpio y se pueda reducir el consumo del agua inyectada. Con estas mejoras, la bomba fácilmente llegaría a los tres años de operación sin intervención. En la tabla 6 se observa los costos del mantenimiento de la bomba si se implementara las mejoras mencionadas.

TABLA 6

**GASTOS A INCURRIRSE EN EL MANTENIMIENTO DE UNA BOMBA SI SE IMPLEMENTARAN LA TOTALIDAD DE LAS MEJORAS PROPIETAS.**

Partes de equipo	Valor en \$	Reparación / cambio	Valor total (\$) 1 año	Valor total (\$) 2 años	Valor total (\$) 3 años
Sello mecánico 891 1-3/4" (carbón-cerámica) marca Chesterton	565,92	+ 3 años	565,92	565,92	565,92
Eje sólido A. I. 304 (sin camisa)	120,00	+ 3 años	120,00	120,00	120,00
Bomba Goulds 3656 3 HP	765,00	+ 3 años	765,00	765,00	765,00
Rodamientos motor	27,00	+ 3 años	27,00	27,00	27,00
Rodamientos bomba	40,00	+ 3 años	40,00	40,00	40,00
Protectores rodamientos (total 4)	1.467,08	+ 3 años	1.467,08	1.467,08	1.467,08
Spiral Trac	650,00	+ 3 años	650,00	650,00	650,00
Aceite de caja rodamiento (3 lts)	3,50	1 año	3,50	7,00	10,50
<b>Total (\$)</b>			<b>3.638,50</b>	<b>3.642,00</b>	<b>3.645,50</b>

### 3.8. Preguntas referentes al Seis Sigma

#### a. ¿Qué se requiere para implantar Seis Sigma ?.

Primero que nada reconocer la necesidad de emprender un cambio organizacional importante, que apoyado por la estrategia Seis Sigma produzca los cambios requeridos que garanticen la permanencia en el tiempo de la organización. En segundo lugar, el apoyo y soporte decidido de la alta Gerencia y Directiva de la organización, que promueva, incentive y guíe en el desarrollo de cada una de las



etapas de esta estrategia, además del compromiso incondicional para asegurar el éxito.

**b. ¿Cuánto tiempo toma implantar Seis Sigma ?.**

Depende del tipo de organización, actividad y del nivel al cual se dirija la iniciativa. Generalmente un proceso de esta magnitud puede tomar en promedio unos tres a cinco años, pero, si se inicia en una división de negocios en particular, y se enfoca adecuadamente, en unos seis a nueve meses se puede comenzar a experimentar los primeros grandes resultados, una vez completadas las primeras fases de Medición y Análisis que corresponden.

**c. ¿Cuánto cuesta implantar Seis Sigma ?.**

El costo depende de la organización y del nivel al cual se quiera aplicar. Lo más importante es una vez tomada la decisión de ir con esta estrategia, asignar un presupuesto exclusivo para la iniciativa y tomar en cuenta los siguientes puntos claves: costo directo de los individuos dedicados 100% a Seis Sigma; costo indirecto por el tiempo utilizado por los ejecutivos, gerentes, miembros de equipos y otros dedicados parcialmente a estas actividades; costo de entrenamiento y consultoría y finalmente costos que conllevan a la implementación de las mejoras y nuevas soluciones a aplicar.

La experiencia indica que en promedio cada proyecto Seis Sigma puede generar retornos o ahorros entre 150.000 a 175.000 dólares, y existen muchos casos en donde se alcanzan hasta 230.000 dólares por proyecto.

**d. ¿Cuántos expertos se deben entrenar ?.**

No existe una regla general en este sentido, pero si hay un patrón que se puede denotar de manera general el cual está dado por la experiencia de algunas organizaciones exitosas referente a los principales roles, y es el siguiente: un Champion por Unidad de Negocios o Sitio de Manufactura; un Master Black Belt por cada 30 Black Belts o por cada 1.000 empleados; un Black Belt por cada 100 empleados para Industrias y uno por cada 50 empleados para Comercio; y finalmente, un Green Belt por cada 20 empleados.

**e. ¿Cuánto entrenamiento deben recibir ?.**

Existen variantes de acuerdo al tipo y tamaño de la organización, pero en promedio el entrenamiento requerido para los principales roles, es el siguiente: de 24 a 40 horas para los Champions; de 240 a 400 horas para los Master Black Belts; de 160 a 240 horas para los Black Belts; y finalmente, de 48 a 120 horas para los Green Belts.

**f. ¿Quiénes pueden ser entrenados ?.**

Por lo general, cada rol requiere de un conjunto de habilidades, destrezas y experiencias adecuadas al tipo de actividad y responsabilidad a manejar pero en general los mas adecuados: Alta Gerencia y Ejecutivos familiarizados con las herramientas estadísticas, como Champions; Gerentes o Jefes con grados técnicos y dominio de las herramientas estadísticas básicas y avanzadas, como Master Black Belts; Ingenieros, técnicos o personal con cinco o más años de experiencia, con dominio de las herramientas estadísticas básicas, como Black Belts; y finalmente, personal técnico o de soporte del área involucrada, con conocimientos básicos de las herramientas estadísticas, como Green Belts.



**g. ¿Cómo se puede definir Seis Sigma, en forma sencilla ?.**

Seis Sigma se puede definir como una gran base que está soportada por tres grandes columnas: Enfoque en el Cliente, para asegurar que todas las salidas (del proceso) satisfagan los requerimientos y expectativas del cliente; base de Datos, para así poder identificar las entradas (al proceso), los procesos y las áreas específicas de mejora; y finalmente, se apoya en una Metodología

Robusta y Sistemática, la cual nos permita definir, medir, analizar, mejorar y controlar los procesos para de ésta manera maximizar la productividad del negocio, al tiempo de satisfacer por completo las expectativas y necesidades del cliente.

**h. ¿Cuál es la diferencia entre DMAIC y DMADV ?.**

La metodología DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) se utiliza cuando un proceso o producto existente no satisface a plenitud los requerimientos y necesidades del cliente o tiene un pobre desempeño. Por otro lado, la metodología DMADV (Define, Measure, Analyze, Design, Verify) se utiliza cuando el producto o proceso no existe y requiere ser desarrollado, o cuando uno existente (con pobre desempeño) debe ser rediseñado y reemplazado en su totalidad por el mal resultado obtenido.

**3.9. Objetivos y resultados tangibles**

Objetivos difíciles pero alcanzables son los que otorgan mejores resultados. No se debe esperar que a corto plazo (ejemplo un año) ya podamos pasar de un nivel de calidad de 3 a 4 Valor Sigma. Algunos procesos realmente si deberán mejorar en este orden de magnitud, pero el valor global tardará probablemente mas tiempo en alcanzarse.

Deben aceptarse algunos viejos principios. Seis sigma se nutre de probados principios de calidad. Todas estas metodologías amparadas por una sistematización de medir y presentar los valores de medida, la infraestructura de los Black Belt y no menos importante el entusiasmo necesario es lo que ha permitido cosechar resultados con Seis Sigma.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El mantenimiento en una industria en general es muy costoso hoy en día, debido a que se siguen realizando los mismos procedimientos que hace muchos años atrás. La gran mayoría de industrias tienen como práctica normal hacer un mantenimiento correctivo, el cual se lo realiza, como su nombre lo indica, para corregir un equipo luego de que se produce un daño o mal funcionamiento. Es muy frecuente solamente cambiar o reparar las piezas que resultan afectadas, con lo que se consigue dejar al equipo en las mismas condiciones iniciales, y por lo tanto con las mismas posibilidades anteriores de que vuelva a fallar. Esto ocasiona que se programen los mantenimientos de acuerdo al tiempo estimado (realmente comprobado) que va a operar un equipo hasta que vuelva a fallar (tiempo entre paradas). Estos mantenimientos programados suelen realizarse más de una vez al año, por lo que se vuelve repetitivo.

El gran problema es que no se toman en cuenta las verdaderas causas de las fallas, y por lo tanto no se las corrige. Las causas más frecuentes de fallas en

los motores eléctricos son la contaminación interior, su limpieza deficiente y los rodamientos; y en las bombas centrífugas son los sellos mecánicos y los rodamientos (75%). Pero estos a su vez se ven influenciados por factores tales como el hacer operar a los equipos fuera de su punto de máxima eficiencia (BEP), factor de esbeltez demasiado alto, mala selección, instalación incorrecta y lubricación inadecuada del rodamiento, contaminación en la lubricación del rodamiento, mala selección, incorrecta instalación y operación fuera de los parámetros de diseño del sello mecánico. Además las estructuras (carcazas, impellers, etc.) también se ven afectadas y pueden provocar una parada del equipo.

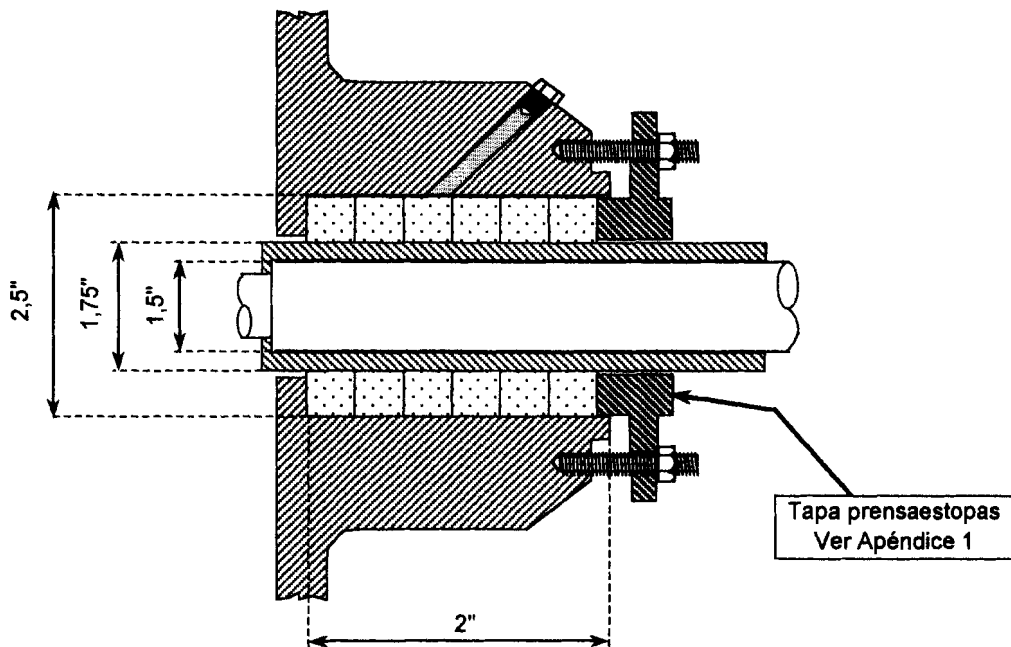
Solamente eliminando las verdaderas razones de las fallas, podemos elevar en un alto grado su confiabilidad y hacer que operen más eficientemente y por mucho más tiempo.


Si adicional a esto se corrigen los distintos procesos que se dan en una industria (por ejemplo los procedimientos de mantenimiento, los procesos de producción, los procedimientos para adquirir las materias primas para la elaboración de un producto, etc.), de tal manera que los errores que se puedan cometer sean lo más mínimo posible (por ejemplo aplicando la teoría del seis sigma), no solamente vamos a obtener equipos más confiables, sino productos finales más confiables para los clientes, reduciendo los costos para su elaboración, aumentando el número de clientes satisfechos y las utilidades de la empresa.

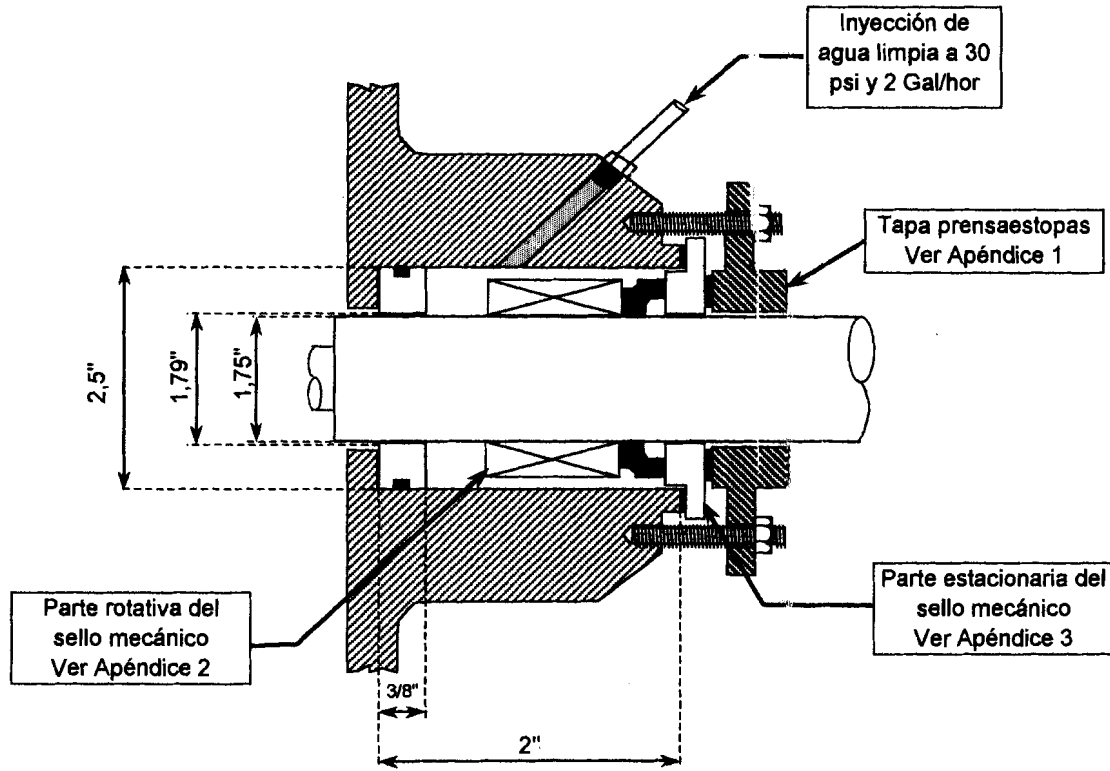
Y es que, el personal de operación y mantenimiento de bombas son ahora vistos como garantías en todo el sistema de bombeo, incluyendo el sello mecánico. Esto obligará que los fabricantes ofrezcan garantías por los sellos que incrementará la confiabilidad a un nuevo y apropiado nivel.

Implementar todo esto no es cosa fácil ni que se pueda realizar de un día para otro, pero es necesario comenzar a revisar los procedimientos seguidos. La mejor manera de hacerlo es empezando por uno mismo cambiando de actitud y desechando tantos paradigmas que no nos dejan ver otros horizontes.





FIMCP - ESPOL		FECHA	NOMBRE
PROYECTO		Dibujó	i. Chiang
CAJERA CON ANILLOS DE EMPAQUETADURA		Revisó	Ing. Martínez
	ESCALA:	PLANO No. <b>1</b>	
	NONE	MASA:	
CONTIENE:			
Cajera, tapa prensa y anillos de empaquetadura			



FIMCP - ESPOL		FECHA	NOMBRE
PROYECTO		Dibujó	05/01/02
CAJERA CON SELLO MECANICO		Revisó	20/01/02
		I. Chiang Ing. Martínez	
	ESCALA:	PLANO No.	
	NONE	2	
CONTIENE:		MASA:	
Cajera, tapa prensa y sello mecánico (rotativa y estacionaria)			

APÉNDICE A

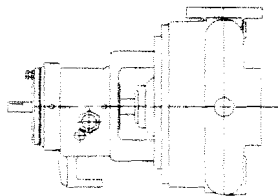
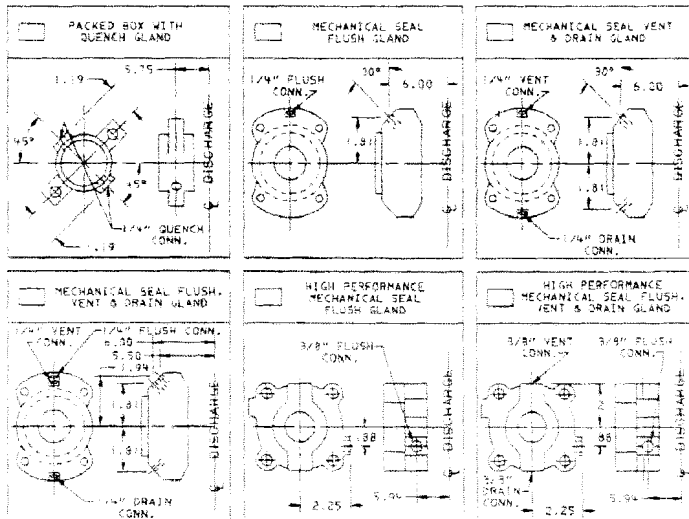
OPCIONES DE TAPAS DE CAJERAS CON EMPAQUETADURAS / SELLO MECANICO PARA BOMBAS GOULDS MODELO 3196 STX



**Model 3196 STX**  
Dimensional Prints - Tapped Openings

**725.5A602**  
September 1, 1994  
(New)

STUFFING BOX/SEAL CHAMBER GLAND OPTIONS  
OPTION FURNISHED WHEN CHECKED



CERTIFIED FOR CONSTRUCTION PURPOSES ONLY WHEN SIGNED

SIGNATURE \_\_\_\_\_ DATE \_\_\_\_\_

CUSTOMER \_\_\_\_\_

GOULDS SERIAL NO. \_\_\_\_\_

CUSTOMER P.O. NO. \_\_\_\_\_

ITEM NO. \_\_\_\_\_

SERVICE \_\_\_\_\_

---

ISSUE \_\_\_\_\_ DRAWN YES \_\_\_\_\_ DRAWING \_\_\_\_\_ REVISION \_\_\_\_\_

DRAWN 11-23-94 \_\_\_\_\_

APPROVED PFM \_\_\_\_\_

05-26-94

A05429A 0 0



## APÉNDICE B

# DIMENSIONES DE INSTALACIÓN DE SELLO MECANICO ESTILO 891 MARCA CHESTERTON

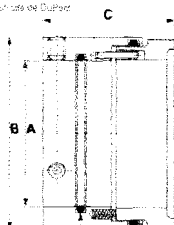
### DATOS TÉCNICOS DEL SELLO ROTATIVO 891 CHESTERTON

**Materiales**  
**COMPONENTES METÁLICOS:**  
 Acero inoxidable 316  
 (Disponibles a pedido especial en Aleación 20, Titanio, Monel, Níquel o Hasteloy B<sup>1</sup> o C<sup>1</sup>)  
**RESORTES:** Hasteloy C  
**CARAS DE SELLO DISPONIBLES:**  
 Carbono Grafito PPSBRC  
 Carburo de silicio ajustados a reacción  
 Carburo de tungsteno soplado  
 con aglutinante de níquel  
**AROS TORNICOS (O-RINGS):**  
 Fluorocarburo instalado  
 Etileno-propileno sustituido con el sello  
 Chemraz<sup>™</sup> o Kälrez<sup>™</sup> disponibles a pedido.

**Presión**  
 711 mm (28 pulgadas) de mercurio hasta

Sello	Tamaño de eje	Estandar	Tornillos prisioneros de Hasteloy
891	18 hasta 30 mm	14 Baras	21 Baras
891	32 hasta 100 mm	28 Baras	42 Baras
891X	120 hasta 200 mm	28 Baras	.....
	1" hasta 4" hasta 4.5"	200 psi	300 psi
	1.5" hasta 4.75"	400 psi	600 psi
891X	4.75" hasta 8"	400 psi	.....

Dimensiones en Hoja adjuntada.  
**Temperatura**  
 Desde -30°C hasta 205°C con Fluorcarburo.  
 Desde -55°C hasta 150°C con Etileno Propileno.  
 Desde -19°C hasta 260°C con Kälrez.  
 Desde -30°C hasta 200°C con Chemraz.  
 Nota: Regístrate en el Directorio de Materiales Resistentes de Hojas Temperadas de la Asociación Nacional de Ingenieros, Fund. & Co. para Materiales Resistentes de Hojas.



A - Diámetro exterior  
 B - Diámetro interior  
 C - Longitud total  
 D - Longitud del eje  
 E - Longitud del tornillo prisionero  
 1 - Hoja técnica (318) en español

891 es una marca registrada de A.W. Chesterton Company.

### A.W. CHESTERTON CO.

Magnolia Park, 2024 Park Drive, Dallas, Texas  
 Chesterton, Magnolia Park, 2024 Park Drive, Dallas, Texas, USA  
 Houston, TX 77019, USA  
 Tel: 214-651-7177 • Fax: (214) 438-1241  
 www.chesterton.com  
 © A.W. Chesterton Co. 2000. Todos los derechos reservados.  
 El Manual de Sellos de Rotación es un documento de propiedad intelectual de A.W. Chesterton Co.

### Dimensiones

TAMANO DE EJE (mm)	A		B		C		D	E
	METRICO	PULGADAS	METRICO	PULGADAS	METRICO	PULGADAS		
18	18.11	713	32.28	1.271	35.00	1.378	116	121
20	20.11	791	34.29	1.350	35.00	1.378	117	122
22	22.11	870	36.30	1.429	35.00	1.378	118	123
24	24.11	949	38.30	1.508	35.00	1.378	119	125
25	25.11	998	39.29	1.547	35.00	1.378	120	125
28	28.11	1.106	42.29	1.665	35.00	1.378	122	127
30	30.11	1.185	44.30	1.744	35.00	1.378	123	128
32	32.11	1.264	46.30	1.823	44.45	1.750	124	130
33	33.11	1.303	47.30	1.862	44.45	1.750	125	131
35	35.11	1.382	49.28	1.941	44.45	1.750	126	132
38	38.11	1.500	54.28	2.137	44.45	1.750	128	134
40	40.11	1.579	56.08	2.208	44.45	1.750	129	135
43	43.11	1.697	59.08	2.326	44.45	1.750	131	137
45	45.11	1.776	61.09	2.405	44.45	1.750	133	139
48	48.11	1.894	64.11	2.524	44.45	1.750	134	141
50	50.11	1.973	66.09	2.602	44.45	1.750	136	143
55	55.11	2.169	71.07	2.798	44.45	1.750	138	145
60	60.11	2.365	77.14	3.037	44.45	1.750	142	149
65	65.11	2.562	83.01	3.286	44.45	1.750	145	151
70	70.11	2.760	88.06	3.483	44.45	1.750	148	152
75	75.11	2.957	93.43	3.725	50.80	2.000	234	238
80	80.11	3.154	104.78	4.125	50.80	2.000	236	240
85	85.11	3.350	107.95	4.250	50.80	2.000	237	241
90	90.11	3.547	114.30	4.500	50.80	2.000	239	243
95	95.11	3.744	117.48	4.625	50.80	2.000	240	244
100	100.11	3.941	123.83	4.875	50.80	2.000	242	246

TAMANO DE EJE (PULGADAS)	A		B		C		D	E
	PULGADAS	METRICO	PULGADAS	METRICO	PULGADAS	METRICO		
1.000	1.004	25.50	1.573	39.95	1.375	35.00	120	126
1.125	1.129	28.68	1.698	43.13	1.375	35.00	122	128
1.250	1.254	31.85	1.823	46.30	1.750	44.45	124	130
1.375	1.379	35.03	1.948	49.48	1.750	44.45	126	132
1.500	1.504	38.20	2.143	54.43	1.750	44.45	128	134
1.625	1.629	41.38	2.268	57.61	1.750	44.45	130	136
1.750	1.754	44.55	2.393	60.78	1.750	44.45	132	138
1.875	1.879	47.73	2.518	63.96	1.750	44.45	134	140
2.000	2.004	50.90	2.643	67.13	1.750	44.45	136	142
2.125	2.129	54.08	2.768	70.31	1.750	44.45	138	144
2.250	2.254	57.25	2.893	73.48	1.750	44.45	140	146
2.375	2.379	60.43	3.018	76.66	1.750	44.45	142	148
2.500	2.504	63.60	3.143	79.83	1.750	44.45	144	150
2.625	2.629	66.78	3.268	83.01	1.750	44.45	146	151
2.750	2.754	69.95	3.393	86.19	2.000	50.80	232	236
2.875	2.879	73.13	3.518	89.37	2.000	50.80	233	237
3.000	3.004	76.30	3.643	92.55	2.000	50.80	234	238
3.125	3.129	79.48	3.768	95.73	2.000	50.80	235	239
3.250	3.254	82.65	3.893	98.91	2.000	50.80	236	240
3.375	3.379	85.83	4.018	102.09	2.000	50.80	237	241
3.500	3.504	89.00	4.143	105.27	2.000	50.80	238	242
3.625	3.629	92.18	4.268	108.45	2.000	50.80	239	243
3.750	3.754	95.35	4.393	111.63	2.000	50.80	240	244
3.875	3.879	98.53	4.518	114.81	2.000	50.80	241	245
4.000	4.004	101.70	4.643	117.99	2.000	50.80	242	246
4.125	4.129	104.88	4.768	121.17	2.000	50.80	243	247
4.250	4.254	108.05	4.893	124.35	2.000	50.80	244	248
4.375	4.379	111.23	5.018	127.53	2.000	50.80	245	249
4.500	4.504	114.40	5.143	130.71	2.000	50.80	246	250

DISTRIBUIDO POR:



APÉNDICE C

DIMENSIONES DE VARIOS TIPOS DE ESTACIONARIAS PARA SELLOS MECANICOS

FORMA-L, 1210, SAS, FORMA-T Y FORMA-L CON DIAMETRO EXTERIOR MENOR

TAMANO DEL EJE PULGADAS	NO. DE GUION	FORMA-L ESTANDAR			1210		SAS		FORMA-T		FORMA-L CON DIAM. EXT. MENOR	
		Diám. A Pulgadas	Diám. B Pulgadas	C Pulgadas	Diám. I Pulgadas	Z Pulgadas	Diám. E Pulgadas	K Pulgadas	S Pulgadas	Diám. F Pulgadas	Diám. M MÍN. Pulgadas	Diám. N MÁX. Pulgadas
.625	5	---	1.63	.500	---	---	---	---	---	---	---	---
.750	6	---	1.75	.500	---	---	---	---	---	---	---	---
.875	7	---	1.88	.500	---	---	---	---	---	---	---	---
.900	7.5	1.557	1.94	.625	---	---	---	.15	.75	1.87	1.56	1.60
1.000	8	1.600	2.05	.625	2.040	.67	1.610	.25	.80	1.9*	1.61	1.75
1.125	9	1.745	2.22	.625	2.125	.67	1.725	.25	.88	2.13	1.75	1.94
1.188	9.5	1.807	2.3*	.625	---	---	---	.25	.88	2.19	1.81	2.00
1.250	10	1.870	2.54	.625	2.250	.67	1.860	.25	.88	2.19	1.88	2.00
1.375	11	1.995	2.41	.625	2.375	.67	1.975	.25	.88	2.31	1.99	2.19
1.400	11.5	2.146	2.56	.625	---	---	---	---	---	---	---	---
1.500	12	2.245	2.70	.625	2.495	.67	2.225	.25	.90	2.54	2.25	2.37
1.625	13	2.370	2.84	.625	2.700	.67	2.360	.25	.88	2.72	2.38	2.52
1.750	14	2.495	3.09	.625	2.815	.67	2.485	.25	.88	2.94	2.50	2.75
1.875	15	2.620	3.22	.625	2.950	.67	2.619	.25	.88	3.12	2.61	2.95
2.000	16	2.745	3.47	.625	3.165	.67	2.775	.25	.88	3.28	2.75	3.18
2.125	17	2.870	3.72	.625	3.250	.67	2.800	.25	.88	3.36	2.88	3.37
2.250	18	2.995	3.84	.625	3.375	.67	2.985	.25	.88	3.50	3.00	3.40
2.375	19	3.057	3.98	.625	3.437	.67	3.047	.25	.88	3.75	3.06	3.56
2.500	20	3.245	4.05	.625	3.625	.67	3.235	.25	.88	3.88	3.24	3.69
2.625	21	3.370	4.22	.625	3.750	.67	3.360	.25	.88	4.00	3.38	3.81
2.750	22	3.545	4.38	1.000	4.250	1.00	3.437	---	---	---	---	---
2.875	23	3.740	4.56	1.000	4.375	1.00	3.562	---	---	---	---	---
3.000	24	3.865	4.56	1.000	4.500	1.00	3.687	---	---	---	---	---
3.125	25	3.990	4.69	1.000	4.625	1.00	3.812	---	---	---	---	---
3.250	26	4.115	4.88	1.000	4.750	1.00	3.937	---	---	---	---	---
3.375	27	4.240	5.00	1.000	4.875	1.00	4.062	---	---	---	---	---
3.500	28	4.365	5.12	1.000	5.000	1.00	4.187	---	---	---	---	---
3.625	29	4.490	5.25	1.000	5.125	1.00	4.312	---	---	---	---	---
3.750	30	4.615	5.38	1.000	5.250	1.00	4.437	---	---	---	---	---
3.875	31	4.740	5.50	2.000	5.375	1.00	4.562	---	---	---	---	---
4.000	32	4.865	5.63	2.000	5.500	1.00	4.687	---	---	---	---	---
4.125	33	4.990	5.75	2.000	5.625	1.00	4.812	---	---	---	---	---
4.250	34	5.115	5.88	2.000	5.750	1.00	4.937	---	---	---	---	---
4.375	35	5.240	6.00	2.000	5.875	1.00	5.062	---	---	---	---	---
4.500	36	5.365	6.12	2.000	6.000	1.00	5.187	---	---	---	---	---

\* Los diámetros interiores mínimo y máximo de la caja para la estacionaria forma-T son las mismas que para la estacionaria forma-L, véase "DATOS DIMENSIONALES DEL 800 Y ESTACIONARIA EN PULGADAS".

\*\* M son los diámetros interiores mínimo y máximo recomendados para la caja.

\*\*\* Use únicamente con rotatoria 770-434.

**CHESTERTON**

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. **Antkowiak Richard P., Technology Highlight: Pumps & Seals , March 1996.**
2. **A. W. Chesterton Co., Market Dominance Training Program, Level One, Mechanical Sealing Devices, Capítulo 1, Boston-USA, 1998.**
3. **A. W. Chesterton Co., Mechanical Seal Training Program, Level Two, Capítulo 1, Boston-USA, 1998.**
4. **Fluid Sealing Association & European Sealing Association, Guías de aplicación de empaquetaduras de compresión, 2001, pp. 2-3, 29-31 A.W. Chesterton Company, Manual de Sellos Mecánicos, 1982.**
5. **Grupo Océano, Enciclopedia Interactiva de los Conocimientos, Volumen 3, pp. 800, 1098-1099, Editorial Océano, Barcelona-España, 2000.**
6. **Hussey Adil, Gerente de Sellado de Fluidos A. W. Chesterton Co. Seminario "Sellos Mecánicos en Aplicaciones Críticas", Guayaquil, Octubre- 2001.**

7. **Karassik Igor J. & Carter Roy, Bombas Centrífugas: Selección, Operación y Mantenimiento, Compañía Editorial Continental S.A., México, 1971.**
  8. **Mc Nally W., La Serie Técnica de Mc Nally, Volumen 4, Número 12, 1991.**
  9. **<http://www.seis-sigma.com/>, Seis Sigma en acción, Estrategia de negocios.**
  10. **<http://www.seissigma.com/>, Club Europeo Seis Sigma**
-