

5
2e



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
" ARAGON "**

**ANALISIS DE LA CORROSION EN
BOMBAS CENTRIFUGAS**

T E S I S

QUE PRESENTA :

LAURA CHACON KURI

PARA OBTENER EL TITULO DE :

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

MEXICO, D.F.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1988



Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

I. ASPECTOS GENERALES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS.

I.1 CLASIFICACION

I.1.1 Antecedentes

I.1.2 Criterios de clasificación

I.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

I.2.1 Cubierta

I.2.1.1 Partes de la cubierta

I.2.1.2 Criterios de clasificación

I.2.2 Impulsor o rodete

I.2.2.1 Velocidad específica

I.2.2.2 Partes del impulsor

I.2.2.3 Criterios de clasificación

I.2.3 Eje o árbol motor

I.2.3.1 Velocidad crítica

I.2.4 Empaques y sellos mecánicos

I.2.4.1 Empaque

I.2.4.2 Sello mecánico

I.2.4.3 Parámetros de selección

I.2.5 Cojinetes

I.2.5.1 Clasificación

I.2.5.2 Parámetros de selección

I.2.6 Soportes

I.2.7 Partes menores

I.2.7.1 Estopero

I.2.7.2 Anillos de desgaste

I.2.7.3 Manguitos

I.2.7.4 Elementos de balanceo hidráulico

I.2.8 Acoplamiento

I.2.9 Unidad motriz

I.3 GENERALIDADES DEL DISEÑO

I.3.1 Propiedades del fluido

I.3.2 Características de funcionamiento

I.3.3 Gráficas de las características de funcionamiento

I.4 MATERIALES DE CONSTRUCCION

I.4.1 Materiales ferrosos

I.4.2 Materiales no ferrosos

I.4.3 Polímeros

I.6 APLICACIONES

II. PLANTEAMIENTO TEÓRICO DE LA CORROSIÓN EN LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA BOMBA CENTRÍFUGA.

II.1 ANTECEDENTES

II.2 CLASES BASICAS DE CORROSION

II.2.1 Corrosión uniforme o general

II.2.2 Corrosión por hendiduras

II.2.3 Corrosión por picaduras

II.2.4 Corrosión intergranular

II.2.5 Corrosión galvánica o bimetalica

II.2.6 Corrosión selectiva o lixiviación selectiva

II.2.7 Corrosión por hidrógeno

II.2.8 Corrosión bajo esfuerzo

II.2.9 Corrosión erosión

II.3 EL AMBIENTE CORROSIVO Y LOS FACTORES NOCIVOS MAS IMPORTANTES

II.3.1 Fluidos acuosos

II.3.1.1 Agua de alimentación a calderas

II.3.1.2 Aguas negras

II.3.1.3 Pasta para la producción de papel y cartón

II.3.1.4 Salmuera

II.3.1.5 Agua clorada

II.3.1.6 Líquido colorante

II.3.2 Fluidos no acuosos

II.3.2.1 Residuos de petróleo crudo

- II.3.2.2 Producto químico para protección agrícola
- II.3.3 Factores nocivos
- II.4 CUANTIFICACION DE LA CORROSION
 - II.4.1 Métodos de evaluación
 - II.4.2 Velocidad del proceso de corrosión
 - II.4.2.1 En función de la concentración de reactivos y productos
 - II.4.2.2 En función de la energía eléctrica liberada
- II.5 CORROSION EN LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LAS BOMBAS CENTRIFUGAS

III. ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA DE CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA.

- III.1 ANTECEDENTES
- III.2 INVESTIGACION DE CAMPO
- III.3 ELABORACION DEL CUESTIONARIO
 - III.3.1 Datos generales
 - III.3.2 Tipo de bomba empleada
 - III.3.3 Construcción
 - III.3.4 Características de operación
 - III.3.5 Material
 - III.3.6 Fluido bombeado
 - III.3.7 Problemas
 - III.3.8 Corrosión
 - III.3.9 Mantenimiento, instalación y número de unidades
- III.4 PRUEBA Y APLICACION DEL CUESTIONARIO
 - III.4.1 Nivel de confianza de la información
- III.5 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION
 - III.5.1 Gráficas de respuestas directas
 - III.5.2 Gráficas de respuestas compuestas
 - III.5.3 Cuadros comparativos de respuestas compuestas

IV. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

- IV.1 ANTECEDENTES

- IV.2 DISCUSION DE LAS RESPUESTAS DIRECTAS
- IV.3 DISCUSION DE LAS RESPUESTAS COMPUESTAS
- IV.4 EVALUACION DE LA APLICACION DEL MATERIAL DE CONSTRUCCION
- IV.5 OTROS DATOS DEL CUESTIONARIO

CONCLUSIONES

ANEXO A: CUESTIONARIO

ANEXO B: INTERVALO DE CONFIABILIDAD DE LA INFORMACIÓN REGISTRADA.

ANEXO C: RELACIÓN DE FIGURAS

ANEXO D: GLOSARIO DE TÉRMINOS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INTRODUCCIÓN

La información que existe sobre bombas y corrosión es en extremo extensa, pero a pesar de ello prácticamente no se trata el proceso de corrosión en bombas centrífugas, por lo que surgió la inquietud de investigar el problema en la industria, conocer los tipos constructivos y materiales de fabricación empleados, así como la importancia que se le da considerando otro tipo de fallas en la unidad.

A continuación y en forma breve se presenta una descripción del contenido de cada capítulo del presente trabajo de investigación.

CAPITULO I.

Se presenta un panorama general sobre los criterios de clasificación expuestos por los autores consultados, obteniendo el criterio que se considerará en el proyecto de investigación.

En forma breve se describen los elementos constitutivos de las bombas centrífugas, exponiendo también algún parámetro de diseño o selección de los componenetes citados.

Las propiedades del fluido y características de funcionamiento de la unidad de bombeo se exponen como generalidades del diseño.

Brevemente se describen los materiales de construcción empleados para bombas centrífugas, así como la información requerida para realizar una adecuada selección de él.

Finalmente se citan las aplicaciones generales de las bombas centrífugas, estableciendo cuales servicios se tratarán en la investigación.

CAPITULO II.

Considerando el proceso en un medio acuoso, se describe la corrosión electroquímica de acuerdo con la morfología del ataque, señalando las características generales y mecanismos de desarrollo, así como algunos parámetros de evaluación que sugieren los autores.

Se describen las características del fluido de los servicios ya definidos, citando brevemente los pasos del proceso en el que están incluidos, así como algunos factores que influyen en el desarrollo del proceso de corrosión.

Así mismo, se generar criterios de comportamiento de los elementos constitutivos en contacto con el fluido susceptibles al daño por el proceso de corrosión.

CAPITULO III

Se presenta el desarrollo de la investigación de campo, discutiendo el cuestionario, su prueba y aplicación, así como la descripción de las gráficas que muestran los resultados obtenidos, considerando para estos un intervalo de confianza.

CAPITULO IV

Se analizan los resultados, señalando las causas posibles de las fallas o daños encontrados, empleando los conocimientos ya expuestos para bombas centrífugas y corrosión electroquímica.

NOTA: Las unidades empleadas pertenecen al Sistema Internacional a menos que la información se haya tomado de alguna fuente específica citada.

**I ASPECTOS GENERALES
DE LAS
BOMBAS CENTRIFUGAS**

I.1 CLASIFICACION

I.1.1 Antecedentes.

Antes de presentar los criterios de clasificación referentes a las bombas centrífugas, es necesario partir de una clasificación fundamental de las máquinas, dentro de las cuales tenemos a las de fluido, donde existe un intercambio de energía del fluido y energía mecánica.

C. Mataix (45) las divide en máquinas hidráulicas y máquinas térmicas, considerando como criterio el comportamiento de la densidad del fluido en el diseño y estudio de las mismas; en las máquinas hidráulicas la densidad es constante y en las térmicas es variable.

Dentro de las máquinas hidráulicas; están los ventiladores, bombas y turbinas hidráulicas, en las máquinas térmicas; tenemos las turbinas de vapor y de gas, turborreactores y compresores (cuya relación de compresión sea mayor de 10 kN/m²).

Considerando el principio fundamental de su funcionamiento, se presenta la siguiente clasificación:

		· TURBOMAQUINAS	· MOTORAS
·	· MAQUINAS	· MAQUINAS DE DESPLAZAMIENTO	· GENERADORAS
·	· HIDRAULICAS	· POSITIVO	·
MAQUINAS.	·	· MAQUINAS GRAVIMETRICAS	
DE	·		
FLUIDO	·		
·			
·	· MAQUINAS TERMICAS		
·			

Nuestra área de interés se localiza dentro de las máquinas hidráulicas, por lo que enseguida se explica brevemente su división.

- Las turbomáquinas basan su funcionamiento en la ecuación de

$$\text{Euler: } Y = +/- (U_1 C_{1u} - U_2 C_{2u}) \quad \text{-Energía-}$$

$$H = +/- [(U_1 C_{1u} - U_2 C_{2u}) / g] \quad \text{-Altura-}$$

Ver página 69

Y el órgano transmisor de energía (impulsor o rodete) funciona siempre con movimiento rotacional.

- Las máquinas de desplazamiento positivo rigen su funcionamiento por la disminución de volumen de una cámara que origina el movimiento del fluido, es decir, por el principio del desplazamiento positivo. El órgano transmisor de energía puede tener tanto movimiento alternativo como rotativo.

- En las máquinas gravimétricas el intercambio de energía es en forma de energía potencial -Elevadores de canchilones, Tornillo de Arquímedes, Ruedas hidráulicas, etc.-.

Las turbomáquinas y las máquinas de desplazamiento positivo pueden ser generadoras (+), si absorben energía mecánica y la restituyen al fluido, o motoras (-) cuando absorben energía del fluido y restituyen energía mecánica.

1.1.2 Criterios de clasificación.

Dentro de las máquinas hidráulicas generadoras se encuentran las BOMBAS; que transforman la potencia mecánica de entrada en una potencia hidráulica útil de salida, en forma de suministro o caudal.

La información sobre bombas es amplia y variada, debido a esta diversidad no existe un criterio de clasificación unificado. Cada autor presenta una clasificación desde muy particulares aspectos y puntos de vista, aún cuando todos ellos se pueden englobar en criterios similares.

A continuación y en forma breve se presentan los criterios y consideraciones que utilizan diversos autores para obtener la división principal de las bombas.

Igor Karassik (38) considera los siguientes pasos para obtener la clasificación de las bombas:

- a. Definir el principio por el cual se agrega energía al fluido.
- b. Investigar el medio por el cual se implementa el principio.
- c. Delinear las geometrías específicas comúnmente empleadas.

Por lo que presenta dos grupos: DINAMICAS y de DESPLAZAMIENTO.

Las dinámicas son aquellas donde la energía se agrega en forma continua, incrementándose la velocidad del fluido a un valor mayor del que existe en la salida de la bomba (descarga), es decir, hay una reducción de la velocidad del fluido dentro de la bomba que produce un incremento en la presión del mismo.

En las de desplazamiento positivo se agrega energía periódicamente, mediante la aplicación de una fuerza al volumen del fluido, lo que resulta en un incremento directo de presión.

M. Viejo Zubicaray (64) define a un equipo de bombeo, como aquél que recibe energía mecánica y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad.

La división que presenta Viejo Zubicaray la basa en la publicada por el Instituto de Hidráulica (E.U.A): de DESPLAZAMIENTO POSITIVO y DINAMICAS.

R. Focke (23) considera el principio de transmisión de energía al fluido y presenta dos grupos: ROTATIVAS y ALTERNATIVAS CON EMBOLO. Define a las bombas rotativas como aquellas cuyo elemento transmisor de energía está provisto de paletas, originando a la salida una presión elevada, además de una velocidad de corriente alta. No trata las bombas alternativas con émbolo.

C. Mataix (45) define a la bomba como una máquina que absorbe energía mecánica y restituye al líquido que la atraviesa energía hidráulica, por lo que presenta dos grupos:

- Bombas ROTODINAMICAS. Considera que todas y solo las bombas que son turbomáquinas pertenecen a este grupo, les denomina así por su movimiento rotativo y porque la dinámica de la corriente juega un papel esencial en la transmisión de energía. Su funcionamiento se basa, como ya se mencionó, en la ecuación de Euler.
- Bombas de DESPLAZAMIENTO POSITIVO. Posee las características ya mencionadas para las máquinas del mismo nombre, cabe señalar que el principio de desplazamiento positivo hace que todas las máquinas sean fundamentalmente reversibles.

T. G. Hicks (30) presenta la división de las bombas según las características del movimiento del fluido, dejando aquellas que se basan en la aplicación específica.

Por lo tanto, T. Hicks considera tres clases de bombas: CENTRIFUGAS, ROTATORIAS y RECIPROCANES.

- Bombas centrifugas. Son aquellas donde la conversión que tiene lugar, es de energía de velocidad a energía de presión. Consta esencialmente de rodete, cubierta y elementos menores.
- Bombas rotatorias. Generalmente son unidades de desplazamiento positivo. Consisten de una caja fija que contiene; engranes, aspas, levas o segmentos, tornillos, etc. donde estos y la caja fija operan con un claro mínimo, es decir, atrapan el fluido, lo empujan contra la caja fija y después lo descargan en un flujo continuo.
- Bombas reciprocantes. Son unidades de desplazamiento positivo que descargan una cantidad definida de líquido durante el movimiento del pistón o émbolo a través de la distancia de carrera, es decir, proporcionan un flujo pulsante.

Jiménez de Cisneros (36) considera la naturaleza del flujo a través de la bomba y presenta tres grupos; ROTODINAMICAS, ALTERNATIVAS y ROTATIVAS.

- Rotodinámicas. Aquellas donde la acción de bombeo se produce al aplicar la máquina una impulsión al fluido manejado, simultáneamente la circulación del fluido por la bomba origina una reducción de presión o succión en el lado de la admisión.
- Alternativas. Las define como bombas de desplazamiento oscilante, donde la acción de bombeo deriva de la carrera de un dispositivo en la cámara.

- Rotativas. Las características de desplazamiento directo van unidas a las de movimiento rotativo. Se define como aquella cuyos elementos rotativos forman cámaras activas de volúmenes alternativamente en expansión y contracción.

De lo anterior se observa que la división de las bombas que presentan los autores consultados, la hacen basándose en:

- I. El principio de transmisión de energía.
- II. Características de movimiento del fluido -dinámica de la corriente-.
- III. Medio y funcionamiento para implementar la operación.

Además se observa que los primeros cuatro autores analizados consideran dos grupos principales; dinámicas y de desplazamiento positivo. Y los dos últimos consideran tres grupos principales, es decir, dividen al grupo de las de desplazamiento positivo en dos y dan diferente denominación al grupo de las dinámicas:

Tyler G. Hicks presenta:

- | | | |
|----------------|---------------|-----------------|
| a. Centrifugas | b. Rotatorias | c. Alternativas |
|----------------|---------------|-----------------|

Jiménez de Cisneros presenta:

- | | | |
|------------------|--------------|------------------|
| a. Rotodinámicas | b. Rotativas | c. Recíprocantes |
|------------------|--------------|------------------|

Dentro de los autores que consideran dos grupos, J. Focke y C. Mataix dan diferente denominación al grupo de las dinámicas, el primero les llama rotativas y el segundo rotodinámicas.

Como se observa J. Focke y Jiménez de Cisneros dan la misma denominación a diferentes tipos de bombas:

Focke denomina rotativas a las bombas que consisten "...fundamentalmente de una rueda móvil provista de paletas..." cuyo movimiento de rotación da lugar a la transmisión de energía al fluido.

Jiménez de Cisneros considera las bombas rotativas como aquellas "... cuyos elementos rotativos forman cámaras activas de volúmenes alternativamente en expansión y contracción."

A continuación se presentan once criterios de clasificación para el grupo de las dinámicas o rotodinámicas, señalando algunos problemas que se presentan en la comprensión del primer criterio y la posición que presentan los autores ya mencionados.

Criterio no. 1

La dirección del flujo en el órgano transmisor de energía

Viejo Zubicaray considera dentro de este grupo tres subgrupos:

- | | | |
|------------------|-----------------|------------------------|
| a. Centrifugas | b. De canal | c. De efecto especial |
| a.1 Flujo radial | b.1 Periféricas | c.1 De chorro |
| a.2 Flujo mixto | b.2 Lateral | c.2 Elevación por aire |
| a.3 Flujo axial | | c.3 Electromagnética |

Karassik y T. Hicks incluyen dentro de las centrifugas a las bombas de canal o tipo turbina, es decir, sólo consideran dos subgrupos.

Los autores C. Mataix y Jiménez de Cisneros consideran dentro de las bombas rotodinámicas -según su denominación- cuatro clases:

- | | |
|----------------------------------|-------------------|
| a. Centrifugas o de flujo radial | c. De flujo axial |
| b. De flujo mixto | d. De canal |

no considerando las bombas de efecto especial.

R. Focke presenta dentro del mismo grupo de bombas, rotativas según su denominación, dos clases:

- a. Centrifugas
- b. De flujo axial

 - a.1 Flujo radial
 - a.2 Flujo mixto

es decir, no considera las bombas de canal ni las de efecto especial.

En seguida se explican los conceptos utilizados en este primer criterio y se da una breve descripción de los tipos de bombas que se han señalado.

La designación de la dirección del flujo a través del impulsor se da en relación con el eje de rotación, así el flujo radial es perpendicular a éste, el flujo axial es paralelo y el flujo mixto es ya perpendicular ya paralelo.

Las bombas de canal poseen un impulsor o rodete que lleva álabes tipo turbina y que giran a velocidades altas dentro de un canal anular, la diferencia entre forma y posición de dichos canales da lugar a los subtipos, donde sobresalen la bomba periférica y la de canal lateral.

Dentro de las bombas de efecto especial se tiene:

- Bomba de chorro (Eyector). No tiene partes móviles y utiliza un fluido en movimiento (fluido motivador) bajo ciertas condiciones controladas para lograr el bombeo del fluido de succión. Consta de tres partes básicas; boquilla, difusor y cámara de succión o cuerpo. Algunos subtipos son; Eductor, Inyector, Compresor a chorro, Sifón, etc.

- Bomba de elevación de agua por medio aire. Como su nombre lo indica se utiliza una alimentación de aire comprimido en la tubería de succión, por lo que el mecanismo generador de carga es la diferencia del peso específico de la mezcla de líquido y aire dentro de la tubería de la bomba y el líquido fuera de ella.
- Bomba electromagnética. No tiene partes móviles y se manejan solo metales líquidos de alta conductividad, debido a que el principio de operación de la bomba es el mismo que el de un motor de inducción. Es decir, la aplicación de una corriente alterna en un devanado genera un campo magnético en él y una corriente inducida, cuyo campo magnético coacciona con el del devanado y origina el flujo del metal líquido en el campo magnético móvil del devanado.

A continuación se enumeran los restantes criterios, donde la descripción de los tipos de bomba que resulten se explicarán en el punto correspondiente a la parte que se considere dentro de dicho criterio. Es decir, cuando el criterio se base en algún elemento constitutivo o parámetro importante de él, el lector puede remitirse al punto en el que se trate dicho elemento.

Criterio no. 2

Según el diseño mecánico del rodete

Los autores consultados coinciden en señalar tres tipos:

- a. Abiertos
- b. Semiabiertos
- c. Cerrados

Criterio no. 3

Según el número específico de revoluciones

Se asigna un número a saber a toda la familia de bombas geométricamente semejantes (45).

"... En números, la velocidad específica es la velocidad, en revoluciones por minuto a la cual un impulsor deberá girar si su tamaño se reduce para dar un gasto de un litro por segundo contra una columna de un metro." (30)

Criterio no. 4

Según el número de flujos en la bomba o tipo de succión

Todos los autores consultados señalan los siguientes dos tipos:

- a. De un flujo o de simple aspiración.
- b. De dos flujos o de doble aspiración.

Criterio no. 5

Según la posición del eje de rotación

La referencia que generalmente se considera es la del plano de apoyo o sujeción.

- a. Eje horizontal
- b. Eje vertical
- c. Eje inclinado

Criterio no. 6

Según el tipo de cubierta o carcasa

- a. Espiral o voluta
- b. Difusor

Criterio no. 7

Según el número de pasos o número de rodetes

- a. Simple o de un escalonamiento
- b. Múltiple o de varios escalonamientos

Criterio no. 8

Según los materiales de construcción

- a. Toda de hierro
- b. Toda de bronce
- c. Con aditamentos de bronce
- d. Bronce de composición específica
- e. Toda de acero inoxidable
- f. Con aditamentos de acero inoxidable

Criterio no. 9

Según la aplicación específica

La clasificación de las bombas dinámicas de acuerdo con su empleo y uso específico, es utilizada con mayor frecuencia que en las de desplazamiento positivo, donde los fabricantes especifican para un tipo dado las aplicaciones a que haya lugar.

- a. Bombas para agua o de propósito general
- b. Bombas para procesos industriales
- c. Bombas químicas
- d. Bombas de la industria de la alimentación
- e. Bombas para barros y lodos
- f. Bombas para aceites
- g. Bombas para la marina
- h. Bombas para sólidos

Criterio no. 10

Según la presión de operación o altura de elevación

- a. Bombas de baja presión; hasta 15m.
- b. Bombas de media presión; de 15 hasta 50m.
- c. Bombas de alta presión; más de 50m.

Criterio no. 11

Según el tipo de instalación

- a. Serie
- b. Paralelo

Por lo que se concluye, después de conocer la posición de los autores consultados que los criterios de clasificación de mayor importancia son:

- I. Principio de transmisión de energía
- II. Tipo de elemento transmisor de energía
- III. Características de movimiento del fluido
- IV. Número específico de revoluciones
- V. Características estructurales y generales
- VI. Materiales de construcción
- VII. Aplicación específica

En cuanto a los criterios de clasificación para las bombas de desplazamiento positivo el lector puede remitirse a la bibliografía expuesta en el presente trabajo, donde sugiero a los autores I. Karassik, M. Viejo Zubicaray, Tyler G. Hicks y Jiménez de Cisneros.

Considerando los criterios que se basan en el principio de transmisión de energía y las características de movimiento del fluido, la clasificación que se considerará en el presente trabajo presenta los siguientes grupos principales:

- I. Dinámicas o rotodinámicas.
- II. Rotativas
- III. De desplazamiento positivo o recíprocos.

Y dentro del grupo donde se encuentra nuestra área de interés se consideran los siguientes tipos:

- I.1 De flujo radial
- I.2 De flujo mixto
- I.3 De flujo axial
- I.4 De canal

Donde la denominación de BOMBAS CENTRIFUGAS se aplicará estrictamente a aquellas donde el flujo a través del impulsor tiene una componente mayor en la dirección radial.

1.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

Para implementar la operación de la bomba requerimos de un cierto número de elementos que la constituyen como unidad. La cantidad que manejan los autores es pequeña comparada con la que establecen las normas publicadas por el Instituto de Hidráulica de Estados Unidos, pero su comprensión es más clara.

Por lo que de manera general se pueden establecer los siguientes componentes, que pueden observarse en la figura (1-1):

- CUBIERTA
- IMPULSOR O RODETE
- EJE
- EMPAQUES Y SELLOS MECANICOS
- COJINETES
- SOPORTES
- PARTES MENORES
- ACOPLAMIENTO
- UNIDAD MOTRIZ

No todos los autores consultados manejan los elementos citados, por lo que cuando se trate cada uno de ellos se especificara la posición que presenten dichos autores.

1.2.1 Cubierta.

Se trata del elemento que envuelve o aloja todas las partes básicas citadas, excepto el acoplamiento y la unidad motriz. Todos los autores la consideran dentro de los elementos constitutivos básicos, algunos denominándole carcasa.

25

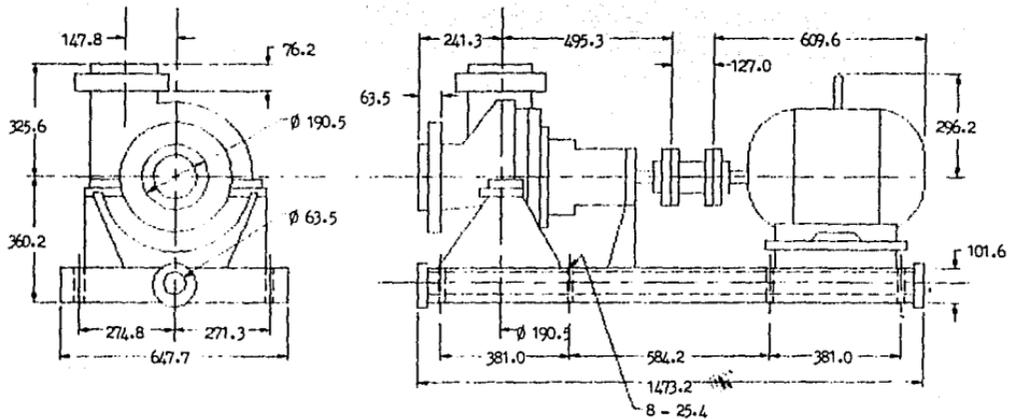


Figura (1-1)

ENSAMBLE BOMBA CENTRIFUGA

Las funciones de la cubierta son:

- a. Guiar el líquido al impulsor.
- b. Convertir la energía cinética del líquido en energía de presión.
- c. Guiar el líquido hacia la salida (boquilla de descarga) con pérdidas mínimas de energía.

I.2.1.1 Partes de la cubierta.

Dentro de la cubierta existen otros elementos que forman parte de ella, algunos dependiendo del diseño de la misma y la aplicación requerida. Los primeros tres elementos, que a continuación se citan, son partes indispensables y los siguientes pueden considerarse opcionales.

- Caja de la bomba, caja espiral o voluta.

Es propiamente la carcasa, el nombre de caja espiral procede de una construcción especial de la misma, que consiste de una caja formada por dos planos paralelos y cerrada por una superficie cilíndrica cuya directriz es una espiral logarítmica. Aumenta en área de su punto inicial hasta que circunda los 360 grados alrededor del impulsor y luego se ensancha a la abertura final de descarga, dicha configuración pretende recuperar la energía por conversión de la altura de velocidad en altura de presión.

- Cabeza de succión.

Este elemento cubre totalmente la primera función de la cubierta, siendo de suma importancia en la distribución de velocidades antes del impulsor, porque puede afectar la eficiencia de la bomba y ocasionar el fenómeno de cavitación
-ver página 64-.

- Boquilla de descarga o tubo difusor troncoconico.

Es la parte final de la bomba. realiza una segunda etapa de transformacion de energia dinamica en energia de presion.

- Corona directriz. elemento difusor o paletas directrices.

Son alabes fijos, normalmente situados detras del impulsor propiamente dicho. Proporciona ventajas estructurales -balancea las reacciones radiales en el rotor- pero puede afectar las caracteristicas hidraulicas sin mencionar el costo. Cuando es parte de la cubierta se le denomina a esta del tipo difusor.

- Lengüeta de la voluta o tajamar.

Divide la seccion inicial y la porcion de la boquilla de descarga.

- Pieza de detencion.

Es una proyeccion divisoria situada entre la boquilla de succion y el ojo del impulsor -entrada antes de los alabes-, que da lugar a la division del flujo de liquido para evitar la prerrotacion -cuando el liquido gira en espiral en la tuberia de succion hasta cierta distancia adelante de la entrada real del impulsor- originando que el liquido entre a los alabes del impulsor a un angulo no previsto en el diseno.

- Costillas de refuerzo.

Se aplican cuando la operacion de la bomba se realiza en condiciones de alta presion, situandose en los puntos sujetos a mayor esfuerzo.

- Soporte central.

Se requiere cuando la operacion es a temperaturas elevadas y se origina un desalineamiento debido a la expansion del material.

- Diafragma o separador de etapas.

Elemento fijo requerido en las bombas múltiples para que el escurrimiento entre una y otra etapa se de en la separación de las juntas entre las partes fijas y rotatorias de la bomba.

I.2.1.2 Criterios de clasificación.

A continuación se presentan cuatro criterios de clasificación para la cubierta, atendiendo a las características estructurales.

1. Según el tipo de cubierta.

Se basa en la forma de efectuar la conversión de energía, por lo que se tienen:

a. De voluta b. De difusor

- Simple

- Doble

Voluta es el tipo más comúnmente utilizado, como ya se dijo recibe el nombre por la envoltura en forma de espiral.

Cuando se utiliza la voluta simple y la operación de la bomba se lleva a cabo a una capacidad diferente de la de diseño, sobre la periferia del impulsor actúan presiones no uniformes por lo que se origina una reacción radial o empuje radial, que junto con el peso del impulsor, el claro del eje y el momento de torsión que se tiene que transmitir, originan una deflexión que afecta al diámetro del eje y el tamaño del cojinete.

Para evitar el empuje radial se requiere una cubierta que desarrolle una fuerza de reacción radial pequeña a capacidades parciales, este tipo es el de voluta doble, también llamada voluta gemela o voluta dual.

Cuando la cubierta posee el elemento difusor, generalmente se le considera como del tipo difusor, las ventajas y desventajas que presenta ya se mencionaron cuando se comentó el elemento difusor o corona directriz.

2. Según su construcción.

a. De una pieza o sólida

b. Partida por un plano o bipartida

La cubierta sólida, que en realidad debe poseer un lado abierto para la colocación e instalación del impulsor, se considera así porque las vías de conducción hacia la boquilla de descarga son parte de una sola pieza. Estrictamente puede considerarse como una cubierta dividida por un plano, generalmente radial.

En el tipo de cubiertas divididas, la posición del plano cortante está referida al eje de rotación, por lo que las hay:

b.1 Axiales.

Divididas por un plano paralelo al eje de rotación. Posee ventajas de acceso, inspección y reparación respecto a las cubiertas divididas por un plano normal al eje. Normalmente las boquillas de succión y descarga se encuentran en la mitad inferior. La presión de operación se sitúa entre las bajas y las moderadamente altas (6.8 y 10.9 MPa), con cualquier número de pasos.

b.2 Radiales.

Divididas por un plano perpendicular al eje de rotación. Se aplican en bombas de múltiples pasos y de alta presión, en diseños de acoplamiento directo o de montaje sobre marco.

b.3 Cubierta dividida por un plano inclinado.

Se considera como un diseño especial, cuyas características abarcan las señaladas para los tipos axial y/o radial dependiendo de su construcción.

Pueden combinarse los tipos de cubiertas divididas, por ejemplo el diseño del tipo barril, que es una combinación de una carcasa radial y otra axial conteniendo una a la otra, que se aplica cuando existe una presión alta de operación con cuatro o más etapas.

3. Según las características de succión.

- a. Simple
- b. Doble

En realidad estas características están en función del tipo de entrada del fluido al impulsor. Cuando el fluido penetra a éste por un sólo lado se trata de la succión simple, que puede localizarse en el extremo lateral, superior o inferior de la carcasa. Cuando el fluido penetra por ambos lados del impulsor la succión es doble, por lo que la configuración de la carcasa debe contener doble boquilla de succión.

4. Según el número de pasos o etapas.

- a. De un paso o etapa
- b. De varios pasos o multipasos

Considerando como una etapa, cuando la presión de operación es sólo una y la carcasa contiene sólo un impulsor.

En las bombas multipasos hay tantos valores de presión o tantos impulsores como etapas existan. La carcasa aloja a cada impulsor en una cámara o cavidad.

I.2.2 Impulsor o rodete.

Se considera como el corazón de la bomba centrífuga. Todos los autores consultados lo incluyen dentro de los elementos constitutivos más importantes, pues sus características de diseño y operación se emplean para clasificar los diversos tipos de bombas.

Consta de un cierto número de alabes o aspas que imparten energía al fluido; cinética y de presión (45). El impulsor hace girar la masa del líquido con la velocidad periférica de las partes extremas de los alabes determinándose la altura de elevación o la presión de operación de la bomba.

La forma geométrica del impulsor gobernará la aceleración del líquido a través de la bomba, por lo que dicha configuración va estrechamente ligada a la velocidad específica de la misma, como se observa en la figura (1-2).

La velocidad específica es un parámetro importante y "...exclusivo de las bombas rotodinámicas..." (36), que además se utiliza como criterio de clasificación y selección e interviene en el diseño de la bomba.

I.2.2.1 Velocidad específica.

El concepto de velocidad específica se basa en el principio de "Similitud dinámica" -teoría expresada en 1687 por Issac Newton- y abarca tres factores principales del funcionamiento: Capacidad, Carga y Velocidad rotatoria.

La velocidad específica 'Ns' se define como aquella a la cual un impulsor geoméricamente similar al impulsor en cuestión, desarrollará una carga unitaria a una capacidad unitaria.

RELACION APROXIMADA ENTRE VELOCIDAD ESPECIFICA, FORMA DEL IMPULSOR Y EFICIENCIA.

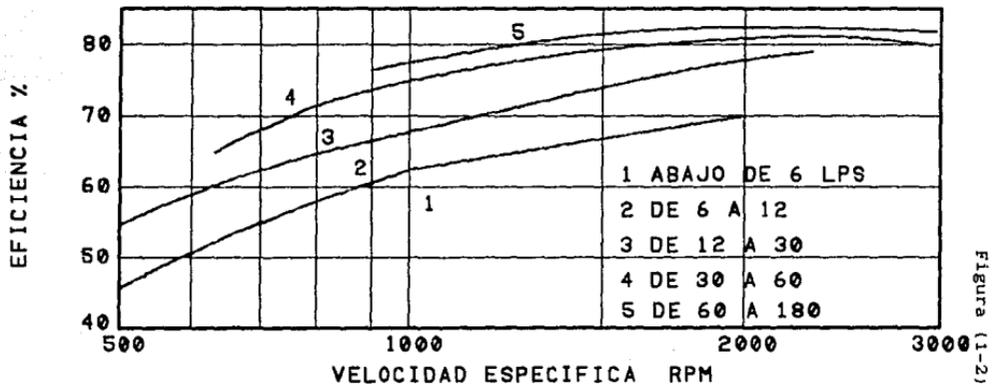
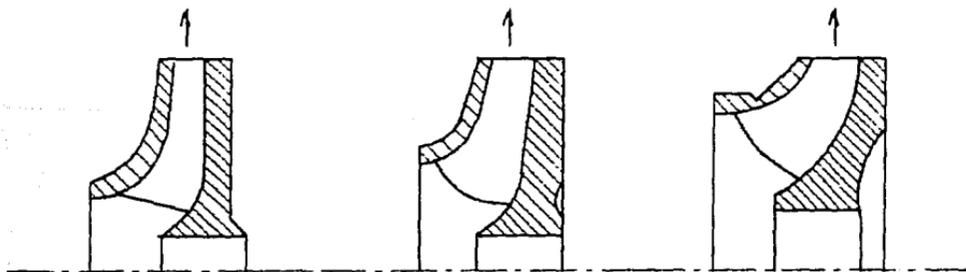


Figura (1-2)

32



FUENTE: I. KARASSIK.

Expresandose por la siguiente relación:

$$N_s = n \cdot Q^{1/2} \cdot H^{-3/4}$$

donde, N_s = Velocidad específica

n = Velocidad de operación (rpm)

Q = Caudal en el punto característico (gpm)

H = Carga total por etapa (pies)

Al establecer el valor numérico de ' N_s ' es conveniente especificar el sistema de unidades empleado, para considerar el rango de variación apropiado.

Algunas notas importantes sobre la velocidad específica se señalan a continuación:

- a. Es un número tipo para impulsores geoméricamente semejantes, en la práctica la velocidad específica determina el perfil del impulsor y la relación entre garganta y diámetro del mismo. Se utiliza en el diseño de las características de operación (velocidad, carga y capacidad) solamente para el punto de eficiencia máxima, pero es posible obtener una curva de la velocidad específica para distintas condiciones de operación, denominándose 'velocidad específica tipo' cuando se tiene la eficiencia máxima, esto puede observarse en la figura (1-3). También existe relación entre la velocidad específica y la elevación de aspiración; al aumentar dicho parámetro decrece la elevación de aspiración disponible a una altura de trabajo determinada, como se observa en la figura (1-4).
- b. Para el mismo impulsor o semejantes, la velocidad específica es constante al cambiar la velocidad de operación y/o el tamaño.

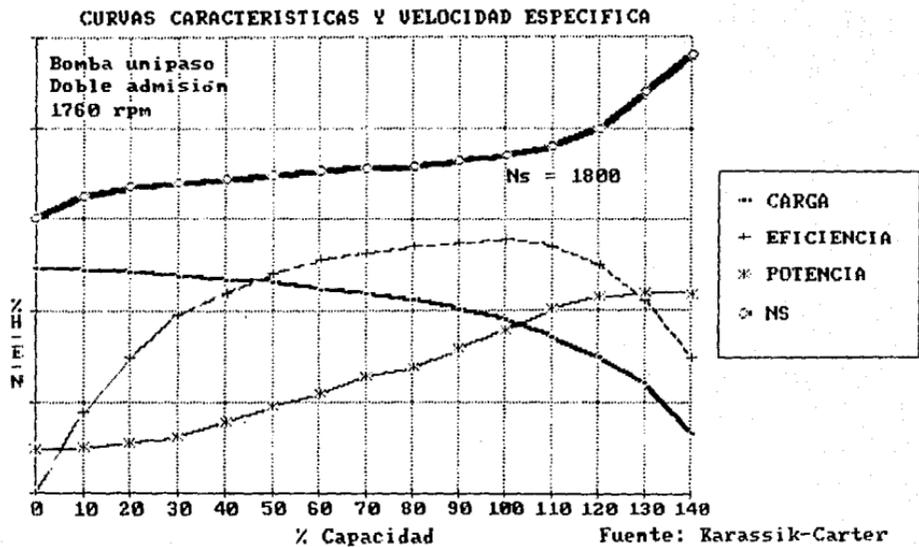


Figura (1-3)

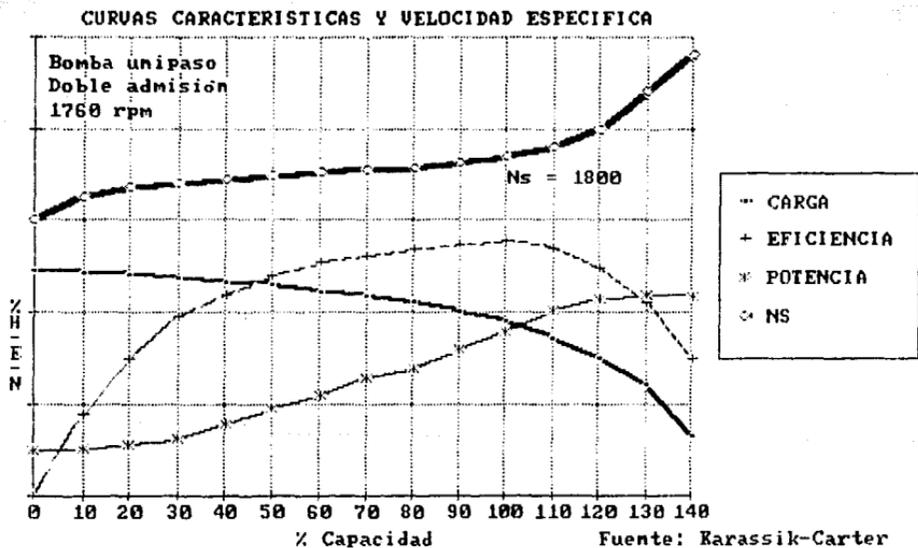
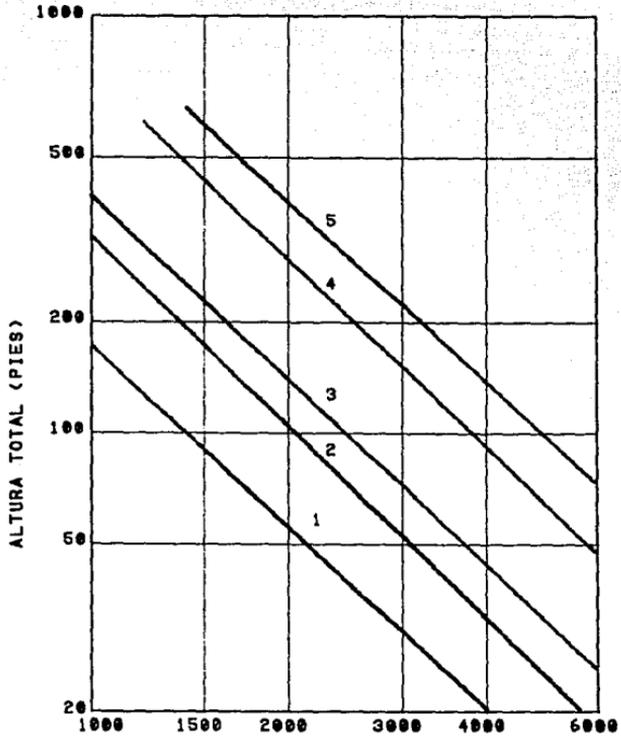


Figura (1-3)

Figura (1-4)



$$\text{VELOCIDAD ESPECIFICA} = \frac{\sqrt{\text{GPM} \times \text{RPM}}}{\text{ALTURA TOTAL}}$$

- 1: ELEVACION 25
- 2: ELEVACION 20
- 3: ELEVACION 15
- 4: ELEVACION 0
- 5: ALTURA 15

FUENTE: JIMENEZ DE CISNEROS

- c. El intervalo de velocidad específica normal, para bombas donde el flujo a través del impulsor es radial:
- De 500 a 5000 utilizando unidades inglesas.
 - De 35 a 1800 empleando para n (rpm), Q (gpm) y H (m).
- d. De la figura (1-5) se obtiene el valor numérico de la velocidad específica, donde puede observarse claramente que se incrementa con la velocidad de operación y decrece al aumentar la carga.
- e. Las velocidades específicas altas corresponden a bombas de tamaño pequeño y velocidad de operación alta que se ve limitada por el tipo de unidad motriz empleada.

1.2.2.2 Partes del impulsor.

En realidad son pocos los elementos que pueden señalarse pero es necesario aclarar la nomenclatura utilizada y sus conceptos.

- Alabes o aspas.

En función de su forma se determina el tipo de impulsor de que se trata, ellos imparten energía al fluido.

- Cubo o mamelón central.

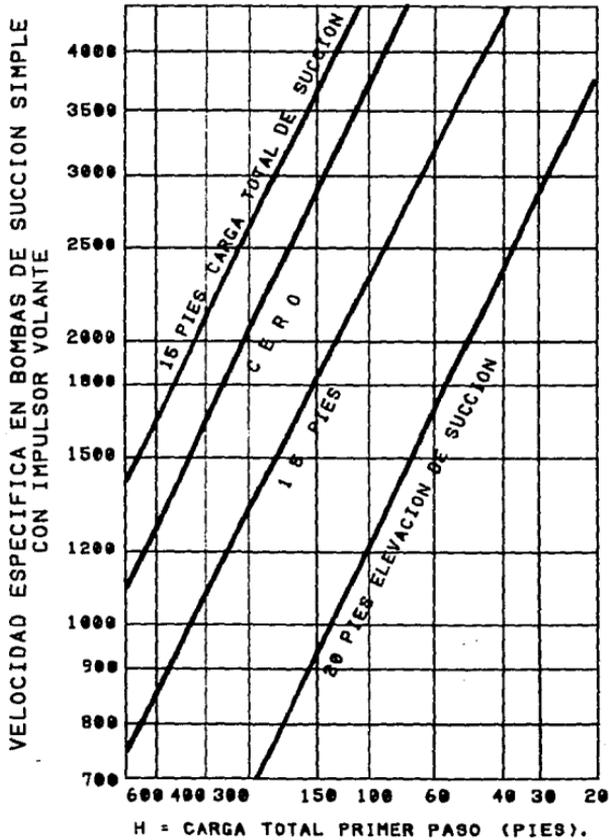
Es una parte generalmente cilíndrica que aloja al eje de la bomba y que sujeta a los alabes.

- Placas o cubiertas laterales.

Cuando se incluyen en la configuración del impulsor encierran a los alabes y el flujo a través del impulsor deberá ser conducido desde el ojo de succión hasta la periferia del mismo, considerándole 'encerrado'. El ojo del impulsor es la entrada precisamente antes de los alabes.

Figura (1-5)

AGUA CLARA A 30° C A NIVEL DEL MAR.



FUENTE: INSTITUTO DE HIDRAULICA.

1.2.2.3 Criterios de clasificación.

Los autores consultados coinciden en señalar los siguientes cinco criterios como los más importantes:

1. Según el valor de la velocidad específica.

En los impulsores donde el flujo es radial el valor de la velocidad específica es considerado como bajo, y el rango que comprende es de 500 a 5000 -unidades inglesas-, como ya se indicó.

2. Según el diseño mecánico.

- a. Abiertos b. Semiabiertos c. Cerrados

El impulsor abierto consiste únicamente de álabes sujetos a un cubo o mamelón central que se ubicará en el eje de la bomba, no posee forma alguna de paredes por lo que presenta desventajas en cuanto a su resistencia estructural, reforzándose en ocasiones con costillas o paredes parciales cuando es necesario.

Se utilizan en el manejo de líquidos con sólidos en suspensión y/o partículas abrasivas; en bombas pequeñas y de bajo costo.

El diseño del impulsor semiabierto consiste de álabes sujetos al cubo central y una cubierta o pared posterior en donde pueden o no incluirse álabes, cuya función será la de reducir la presión en la parte posterior del cubo del impulsor y evitar que materia extraña se acumule e interfiera en la operación apropiada.

En el impulsor cerrado los álabes sujetos al cubo central están contenidos entre cubiertas o placas laterales, es decir, el flujo del líquido se encuentra encerrado desde el ojo de succión hasta la periferia del impulsor, lo que evita el escurrimiento que ocurre en impulsores abiertos y semiabiertos. Se aplican principalmente en el manejo de líquidos limpios.

3. Según las características de succión o entrada del líquido.

- a. Admisión o succión simple b. Admisión o succión doble

En el impulsor de succión simple el líquido penetra al ojo de succión sólo por un lado y la entrada al impulsor de succión doble es por ambos lados. Podemos decir que este último es un arreglo de dos impulsores de succión simple, uno contra otro.

Para unidades pequeñas, en bombas con cubierta radial, en bombas donde el impulsor está volante -soportado solamente por uno de sus extremos-, y en bombas de múltiples pasos, se prefiere el impulsor de simple succión que posee ventajas de sencillez en el diseño, en la construcción, costo y mantenimiento.

La desventaja que presenta el impulsor de simple succión, es que está sujeto a empuje axial debido a la diferencia de presiones en el ojo de succión y la parte posterior de éste -una sujeta a la presión de succión y la otra a la de descarga-.

El impulsor de doble succión se prefiere cuando la cubierta es de diseño axial de sólo un paso, porque proporciona ventajas tales como, la consideración teórica de que existe balanceo de ésta en el eje, además de que la operación para una carga dada se lleva a cabo con un valor menor de carga neta de succión positiva (NPSH), se prefiere también cuando se requieren grandes gastos ya que en comparación con el impulsor de succión simple, para la misma carga maneja doble gasto.

4. Según la forma y moldeado de los álabes o aspas.

Se presenta a continuación una explicación breve de dos diseños de álabes aplicables a impulsores de flujo radial:

a. Alabes derechos, radiales o de curvatura simple.

Se generan por líneas rectas paralelas al eje de rotación, localizándose en un plano normal al eje. Se utilizan para gastos pequeños y cargas altas lo que implica una velocidad específica baja y manejan líquidos sin sólidos grandes en suspensión.

b. Alabes tipo francis, alabes de tornillo francis o de tornillo.

En este tipo de impulsor las superficies de los alabes tienen doble curvatura, los alabes son anchos y el flujo tiende a ser radial con una pequeña componente axial.

5. De acuerdo con las aplicaciones específicas.

Este criterio se aplica a impulsores contruidos especialmente para un uso determinado, pudiendo considerarse el diseño como una combinación de las características mencionadas en los criterios anteriores y que se requieren para el servicio solicitado, por ejemplo:

a. Impulsor para bombas que manejan aguas negras.

Diseñado para manejar líquidos que contienen 'trapos', materiales fibrosos y sólidos. Su configuración es la de un impulsor de dos, tres o cuatro alabes radiales que no se obstruyen, con bordes romos y vías de agua amplias.

b. Impulsor para bombas que manejan pulpa de papel.

Es un impulsor totalmente abierto, no se obstruye y posee alabes tipo francis y radiales curvilíneos, donde el extremo conductor de tornillo sobresale bastante dentro de la boquilla de succión permitiendo el manejo de pasta de alta consistencia [(38) op.cit. pag. 54-55].

1.2.3 Eje o árbol motor.

El eje de transmisión es un elemento de sección circular rotatorio sobre el que van montados los elementos mecánicos de transmisión de fuerza o potencia, puede estar sometido a cargas de flexión, tensión, compresión o torsión, actuando individualmente o combinadas.

En la bomba centrífuga la función básica del eje es transmitir los momentos de flexión o torsión que se presentan en el arranque y durante la operación, además de soportar el peso de los elementos giratorios.

De los autores consultados C. Mataix y T. G. Hicks no lo consideran como elemento constitutivo de la bomba, sino como parte de la unidad motriz.

1.2.3.1 Velocidad crítica.

Para la adecuada operación del eje deben considerarse las velocidades críticas y las señales de desgaste en los ajustes importantes, tales como el calibre del cubo del impulsor, manguito y cojinetes.

La velocidad crítica es aquella en que la frecuencia de operación corresponde a la frecuencia natural 'Wn', lo que da lugar a la resonancia originando inestabilidad -vibraciones excesivas-.

La relación para obtener la primera velocidad crítica es la siguiente:

$$W_n = [(C g) / W]^{1/2}$$

donde: C es la rigidez a la flexión; g es la aceleración de la gravedad y W es el peso.

Cuando la operación del eje se efectúa a una velocidad menor que la crítica, se denomina al eje como 'rígido' y cuando la velocidad de operación es mayor que la primera velocidad crítica el eje se denomina 'flexible'.

Se aplica como factor de seguridad para la operación adecuada, que la velocidad crítica de una bomba de eje rígido, sea 20% mayor que la velocidad de operación y que la velocidad crítica de una bomba de eje flexible, sea del 60 a 75% de la velocidad de operación.

Los ejes se protegen contra la corrosión, erosión y desgaste mediante 'camisas de flecha', también llamadas 'manguitos'. Esto es debido al menor costo de ellos con respecto al eje, cuando se requiere el cambio o reposición.

1.2.4 Empaques y sellos mecánicos.

Son elementos intercambiables cuya función es evitar tanto el flujo del líquido manejado hacia el exterior, como el flujo de aire hacia el interior de la bomba y entre etapas, debido a que cada cámara se encuentra a un nivel de presión diferente.

De los autores consultados sólo C. Mataix no lo considera como elemento constitutivo básico.

1.2.4.1 Empaque.

Se considera como un anillo de sellado que debe cumplir con los siguientes puntos para su adecuado funcionamiento:

1. Poseer un comportamiento plástico para ajustarse mediante el prensaestopas y operar adecuadamente.

2. Características adecuadas de consistencia para resistir la presión a la que se someterá durante el funcionamiento.
3. Absorción de energía sin dañar al eje o manguito.
4. Contar con medios de lubricación y enfriamiento adecuados.
5. El líquido manejado no deberá actuar como solvente del lubricante que se utiliza para impregnar la empaquetadura.

Los tipos principales de acuerdo con el material de construcción son:

- De asbesto.
- De fibras sintéticas.
- Loneta.
- Empaquetadura metálica.
- Cañamo en cuerda o trenza.
- Tipo chevrón, etc.

1.2.4.2 Sello mecánico.

Constan de un elemento giratorio y otro estacionario cuyas superficies obturadoras, altamente pulidas, se localizan en un plano perpendicular al eje de rotación, deslizándose una sobre otra y manteniéndose en contacto continuo por la acción de un resorte. Es decir, el sello básico más elemental se compone de:

- Cara rotatoria
- Resorte
- Cara estacionaria
- Dos empaques

El sello permite cierto grado de desalineamiento residual, tanto axial como radial. Y no da lugar al desgaste en el eje, este sólo se presenta en las superficies del sello que están en contacto, por lo que se requiere un sistema de enfriamiento entre ellas para su buen funcionamiento, ya sea mediante fuentes externas cuando el líquido manejado no es conveniente para dicho fin o utilizando una parte del líquido bombeado.

Hay tres puntos importantes donde debe efectuarse el sellado:

- Entre el elemento estacionario y la cubierta.
- Entre el elemento giratorio y el eje o su manguito.
- Entre las superficies acopladas de los elementos giratorios y estacionarios del sello.

En cuanto a los tipos constructivos se tienen cuatro grupos principales considerando dos aspectos; Condición y Posición.

- Sello balanceado o compensado. En donde la presión de operación no excede 1 MPa.
- Sello no balanceado o sin compensar. Extiende su campo de aplicación hasta presiones mayores de los 8.5 MPa.
- Sello interno. El elemento giratorio está en contacto con el líquido manejado.
- Sello externo. No hay contacto del elemento giratorio con el líquido manejado.

Hay gran cantidad de sellos mecánicos, desde el básico ya mencionado hasta los más sofisticados, utilizados en aplicaciones especiales. Entre los arreglos típicos se encuentran; el sello doble, el de fuelle metálico y el arreglo en tandem.

I.2.4.3 Parámetros de selección.

En la selección de empaques y sellos mecánicos se considera:

- a. El escurrimiento permisible en la operación de la bomba.
- b. Nivel de lubricación que proporcione o permita el líquido bombeado.
- c. El costo inicial y la preferencia personal.
- d. Presión, temperatura y velocidad de operación.

e. Fluido del proceso de bombeo -comportamiento químico, viscosidad, presión de vapor y la presencia de sólidos en suspensión-.

La operación adecuada del sello se ve limitada por la tendencia del líquido para formar cristales por el cambio de temperatura o el asentamiento del sello. También por interrupciones en el servicio, teniendo periodos largos en los que la bomba puede hasta vaciarse, en estos casos es cuando se prefiere el empaque.

1.2.5 Cojinetes.

Se consideran como elementos de apoyo para el eje y de compensación para las cargas que se presenten en el funcionamiento de la bomba.

El objetivo de los cojinetes es soportar al eje de la bomba en correcto alineamiento bajo la acción de las cargas radiales y axiales existentes. Al cojinete que compensa las cargas radiales se le llama de alineación y aquél que acepta las cargas axiales se le denomina de empuje o axial.

1.2.5.1 Clasificación.

Se consideran dos grupos importantes de cojinetes; los hidrodinámicos o chumaceras y los antifricción o rodamientos. El primero basa su funcionamiento en el deslizamiento, por lo que existe un coeficiente de fricción. "...El principio de operación está basado en la sustentación hidrodinámica, que provoca la inyección de aceite dentro del cojinete y hace que el eje sea soportado por una finísima capa de aceite, evitando así el contacto del eje con el cojinete." [(61) op.cit. pag. 127].

Los cojinetes antifricción deben ser retenidos en el eje, ya sea mediante un ajuste a presión, topes o tuercas en el eje. Su funcionamiento se basa en el rodamiento, aun cuando existe una pequeña cantidad de deslizamiento -teóricamente éste es nulo debido a la operación a una velocidad constante-.

A continuación se muestran los tipos constructivos aplicables a las bombas centrífugas:

	a. Hidrodinámicos	b. Antifricción
	-----	-----
RADIALES	<ul style="list-style-type: none"> * De mangas. * Zapatas basculantes autoalineantes. 	<ul style="list-style-type: none"> * De bolas. * De rodillos. * Doble hilera oscilante * De surco profundo de una o dos hileras.
AXIALES	<ul style="list-style-type: none"> * Zapatas basculantes de múltiples segmentos. * Kingsbury 	<ul style="list-style-type: none"> * Cónicos. * Contacto angular una o dos hileras (bolas y rodillos).

I.2.5.2 Parámetros de selección.

Para el funcionamiento adecuado se consideran los siguientes puntos:

- a. Tamaño de la bomba (diámetro del eje).
Deben considerarse las dimensiones comerciales de los cojinetes, así como la disposición del impulsor.
- b. Tipo de lubricación que se permitirá en el campo de servicio.
Considerando la temperatura de operación y el comportamiento del lubricante bajo la acción de la humedad.
- c. Velocidad de operación.
- d. Posibilidad de contacto con el líquido bombeado.
- e. Economía de construcción y preferencia personal.

Los cojinetes que se señalan como adecuados para soportar cargas radiales son capaces también de soportar cargas axiales, cuando estas no son excesivas. Utilizándose solamente los cojinetes axiales cuando las cargas de empuje tienen valores altos.

I.2.6 Soportes.

Como su nombre lo indica son elementos que sirven de apoyo o sujeción para las demás partes constitutivas.

Se consideran como elementos de soporte de la unidad; el de cojinetes, el de la bomba, la base de montaje y la cimentación, que a continuación se describen brevemente.

- Soporte de cojinetes.

Deberá alojar al cojinete y contener el lubricante necesario para la operación, cuando se trata de cojinetes axiales deben además cumplir la función de localizar a dicho cojinete, en su posición axial adecuada. Además debe transmitir a la base de la bomba la carga radial.

De los autores señalados Karassik lo incluye dentro de otro elemento, ya sea la cubierta o el propio cojinete [(38) op.cit. pag.128] y Viejo Zubicaray lo considera como se ha señalado en el presente trabajo.

- Soporte de la bomba.

Sirve de sostén a las diversas partes constitutivas; carcasa con su cabeza de succión, cojinetes que a su vez soportan al eje y demás partes menores. Además sirve de asiento a toda la unidad, montándose en una base metálica común para la bomba y la unidad motriz, cuando se trate de unidades horizontales.

Sus dimensiones estaran determinadas por las de otros elementos; la longitud por la del eje y su altura por el diámetro de la carcasa. Debe tener un peso tal que contrarreste el efecto de volteo que producen la carcasa, cabeza de succión e impulsor.

En las unidades verticales el diseño de este soporte es de gran importancia, puesto que en raras ocasiones se utiliza el soporte del grupo bomba-unidad motriz, es decir, es frecuente que el soporte de la bomba generalmente cumpla con la función de servir de apoyo para la unidad motriz.

- Bases de montaje.

La base del grupo bomba-unidad motriz proporcionara una superficie de montaje para la propia bomba y el medio de accionamiento o de transmisión de potencia, que descansará sobre la cimentación, fijada por medio de pernos de anclaje.

Los autores ya mencionados (38) y (64), coinciden al señalarla como elemento constitutivo así como en su descripción y función.

- Cimentación.

La cimentación es una estructura rígida de peso suficiente para que proporcione un soporte fijo permanente a toda el área de la plancha de la base y absorva cualquier esfuerzo o impacto normal.

En ella se fija la base del grupo bomba-unidad motriz mediante una lechada de concreto para evitar el movimiento lateral de esta, aumentar su masa para reducir la vibración, así como suavizar las irregularidades en la cimentación.

I.2.7 Partes menores.

Podemos citar en este punto los siguientes elementos constitutivos:

1. Estopero.
2. Anillos de desgaste.
3. Manguitos o camisas de flecha.
4. Elementos de balanceo hidráulico.

Los autores I. Karassik y T. G. Hicks no los consideran como partes menores, sino que los colocan como elementos básicos de la bomba, pero Viejo Zubicaray, C. Mataix y Jiménez de Cisneros los agrupan como aquí se presenta.

I.2.7.1 Estopero.

Se puede definir como una cavidad concéntrica con el eje que aloja los anillos de empaquetadura.

El estopero ejerce presión para equilibrar la que existe en el interior de la bomba, mediante el prensaestopas que comprime al empaque obteniéndose el ajuste deseado en el eje o manguito de este. Pueden considerarse como partes del estopero:

- Jaula de sello.
- Prensaestopas con sus pernos y tuercas correspondientes.

El objeto de la jaula de sello es permitir la entrada de una pequeña cantidad de líquido de sello a la empaquetadura con el propósito de brindar lubricación y enfriamiento, sellar al eje e impedir la entrada de materia extraña, además de dividir la empaquetadura en secciones aproximadamente iguales.

Para obtener el liquido de sello, el estopero puede estar conectado a la descarga de la bomba, a un paso intermedio o a una fuente de abastecimiento externa.

El prensaestopas ademas de proporcionar el ajuste al empaque, junto con él evita la entrada del aire en la carcasa cuando la presión dentro de ella se encuentra bajo la atmosférica y limita el escape de la carcasa a un mínimo cuando la presión es superior a la atmosférica.

El fondo extremo interior de la caja del estopero puede estar formado por la propia cubierta de la bomba, un buje garganta o un anillo base.

1.2.7.2 Anillos de desgaste.

Debido al inevitable desgaste que sufren los impulsores al estar girando y rozando en la cavidad de la carcasa y cabeza de succión, se utilizan los anillos de desgaste, también llamados anillos de sellado o anillos carcasa.

Constituyen un elemento intercambiable económico entre el impulsor y la carcasa, evitando el desgaste costoso de estos elementos en la junta de operación.

Los anillos pueden ajustarse a la carcasa, al impulsor o en ambos. La ventaja económica sólo se verifica en unidades grandes y donde el elemento estacionario (carcasa) es parte de una fundición complicada. Los tipos constructivos más comunes son:

- a. Plano
- b. L (Boquilla, Lavado con agua a presión, etc.)
- c. Laberinto (De interferencia, De escalón, etc.)

El montaje de los anillos puede hacerse mediante:

- Un ajuste de prensa.
- Ajuste de contracción.
- Colocación de tornillos prisioneros o pasadores.
- Roscado del impulsor y del anillo, para atornillarlo uno contra otro.

La selección del tipo de anillo más apropiado depende de:

- a. Líquido de trabajo y diseño particular de la bomba.
- b. Presión diferencial a través de la junta de escurrimiento.
- c. Velocidad de fricción.

1.2.7.3 Manguitos.

Su objetivo es proteger al eje contra desgaste, corrosión y erosión. Su aplicación no es efectiva en unidades pequeñas, debido a las consecuencias que origina el aumento en el diámetro del eje:

- Disminución peligrosa del área de succión.
- Si se aumenta el área del ojo del impulsor, se requiere aumentar la velocidad de operación.
- Mayores pérdidas hidráulicas y en el estopero.

1.2.7.4 Elementos de balanceo hidráulico.

El objetivo de estos elementos es equilibrar el empuje axial que se presenta en las bombas multipasos y reducir la presión en el estopero, adyacente al impulsor de la última etapa.

Como ya se mencionó, cuando el impulsor es de admisión simple está sujeto a un empuje axial originado por la diferencia de presión entre sus dos caras.

Solo I. Karassik lo senala como elemento constitutivo de las bombas centrifugas, debido a que otra forma de reducir el empuje axial es colocar impulsores opuestos, eliminando la necesidad de este dispositivo. Cuando se elige el arreglo de impulsores se requieren juntas movibles distribuidas a lo largo de la bomba, el autor citado considera que en realidad las juntas movibles, siendo de longitud apropiada, son dispositivos balanceadores y tan solo es una cuestion de semántica la diferencia que se marca. Existen dos tipos básicos de dispositivos:

- a. El tambor balanceador.
- b. El disco compensador.

De manera general se componen de una parte fija al eje de la bomba, por lo tanto rotativa y otra fija a la cubierta de la bomba, llamada en cada caso cabeza, ya sea del tambor o del disco. Dichas cabezas separan una cámara de compensación de la cara posterior del último impulsor.

La principal desventaja del tambor balanceador es que no compensa automáticamente un cambio en el empuje axial y no ejecuta alguna función de restauración hasta el momento en que el empuje y la fuerza del tambor sean iguales.

El disco compensador tiene como característica principal la compensación automática, que no puede realizar el tambor balanceador. Pero existe una desventaja y es que la presión en el empaque del estopero es variable, condición perjudicial en la vida útil de la empaquetadura.

Existen variaciones en el diseño de cada uno de estos elementos o combinaciones de ellos, lo que da lugar a otros tipos que pueden localizarse en la referencia bibliográfica del autor citado.

I.2.8 Acoplamiento.

Es considerado como el mecanismo de transmisión de potencia de la unidad motriz a la bomba, excepto en unidades conectadas en forma compacta en las que el rodete o impulsor está colocado en una extensión del eje del medio de accionamiento.

Los acoplamientos tienen por objeto unir dos ejes, por lo general colocados uno a continuación de otro o muy poco separados entre sí, pero también brindan la posibilidad de unirlos cuando la distancia entre ellos es considerable. De modo que el movimiento de rotación y el par del uno, se transmita con la menor alteración posible, cuando así se desea, al otro.

De los autores consultados sólo I. Karassik y Jiménez de Cisneros los señalan y los grupos que marcan pueden resumirse en los siguientes:

- I. Permanentes. II. De embrague. III. Mecánicos.

Jiménez de Cisneros considera el primer grupo como el de mayor importancia y aplicación, los dos grupos restantes los marca para aplicaciones particulares presentando la ventaja de un cambio de velocidad en el sistema de transmisión.

Igor Karassik considera que el segundo y tercer grupo no son verdaderos acoplamientos, en el sentido estricto de la palabra, puesto que su función es variar la velocidad de bombeo más que proporcionar un medio de conexión entre la unidad de bombeo y el medio de accionamiento.

En ocasiones la aplicación de los acoplamientos no se restringe a un tipo, sino que pueden encontrarse arreglos donde se aplican de un grupo y de otro.

A continuación se describen los grupos ya mencionados sin hacer una exposición profunda, debido a la amplitud del tema, que por sí sólo puede constituir un proyecto de investigación.

I. Acoplamientos permanentes.

Se denominan así porque no es posible interrumpir el acoplamiento durante el funcionamiento de la unidad, es decir, como su nombre lo indica es permanente durante toda la operación. La aplicación de los acoplamientos permanentes se realiza principalmente cuando la velocidad de la unidad motriz, está proyectada de acuerdo con la de la bomba y cuando el par de dicha unidad supere al requerido por la carga inicial de la bomba centrífuga, que aproximadamente es del 15 al 20% más que el par de régimen. Dentro de este grupo están las dos categorías siguientes:

A. Rígidos

B. Flexibles

- Mecánicamente flexibles

- De material flexible

II. Acoplamientos de embrague.

Cuando se requiere que el eje conducido conserve cierta independencia respecto al movimiento de rotación que recibe del eje motriz, de manera que aquél pueda admitir el movimiento o permanecer inactivo a voluntad, se aplican los acoplamientos de embrague. También cuando el par proporcionado por la máquina motriz es inadecuado para la bomba.

Sus funciones incluyen además:

- Proporcionar cierto grado de protección contra las sobrecargas en virtud de su capacidad de deslizamiento, sin menoscabo del desgaste excesivo y considerable generación de calor.

- Mantener constante la velocidad requerida así como el par, este último limitándolo cuando el funcionamiento así lo requiera.

- Funciones de irreversibilidad o sobrevelocidad.

Se pueden dividir en tres categorías básicas:

A. Embragues mecánicos.

Estos pueden subdividirse en dos clases; de fricción y los de dientes o embrague positivo.

Los embragues de fricción encuentran gran aplicación dentro del campo de las bombas y basan su operación en el deslizamiento axial o radial de sus superficies de acoplamiento originando fricción entre ellas. El embrague de dientes generalmente no se aplica para la transmisión de potencia en las bombas debido a la imposibilidad de acoplar en marcha y lograr un embrague gradual y sin choques, sin embargo, como dispositivos de desconexión se usan extensamente.

B. Embragues eléctricos.

Se define como un dispositivo electromecánico transmisor de par, que se instala entre un elemento motriz principal de velocidad constante y una carga, para obtener una operación a velocidad variable. Por lo que sólo se justifica su aplicación si las variaciones de las condiciones de operación requieren de dispositivos de velocidad de salida variable. Requieren de un alineamiento preciso y su costo de mantenimiento es elevado. "...La única aplicación ventajosa es en el servicio de bombeo de tanques acumuladores o similares en los que la demanda varía ampliamente ..." [(38) op.cit. pag.158].

C. Embragues de fluido.

Al igual, que la transmisión magnética solo se aplica cuando las necesidades de velocidad variable de salida lo justifican. La denominación se aplica a los dispositivos que utilizan algún fluido para la transmisión de potencia, siendo éste invariablemente un aceite sintético o natural, empleado además por sus características lubricantes y su capacidad de absorber y disipar calor. La transmisión de potencia se basa en tres aspectos; la energía cinética, energía de presión y en la viscosidad del fluido.

III. Acoplamientos mecánicos.

Permiten la transmisión del movimiento de rotación y del par motriz, así como cierto desalineamiento angular y/o axial, además de permitir un valor de sobrecarga y no dar lugar al deslizamiento como el que se presenta en los embragues.

Dentro de este grupo se consideran las siguientes clases de transmisión de potencia; mecanismos de engranes, cadenas, catarinas y arreglos de bandas y poleas.

Poseen características para disminuir el flotamiento axial (juego axial) y en general no dan lugar a la transmisión de empuje.

A continuación se enumeran los parámetros de selección para los acoplamientos:

- a. Potencia a transmitir.
- b. Variaciones del par.
- c. Velocidad de operación.
- d. Distancia entre terminales de los ejes.

- e. Alineamiento.
- f. Juego axial y/o radial.
- g. Posición del equipo.
- h. Frecuencia y facilidad de mantenimiento.
- i. Efectos del medio ambiente de trabajo.
- j. Fabricación nacional.
- k. Costos y tiempo de entrega.

1.2.9 Unidad motriz.

Es el elemento que proporciona a la bomba la potencia requerida para su operación y en función del tipo de energía suministrada se tendrán las diferentes clases de unidad motriz.

De los autores consultados I. Karassik, Tyler G. Hicks y Jimenez de Cisneros lo consideran dentro de los elementos constitutivos de las bombas centrifugas y coinciden al señalar las siguientes clases:

1. Motor eléctrico.
2. Motor de combustión interna.
3. Turbinas.

En donde el motor eléctrico es el de uso más frecuente, debido a las múltiples ventajas que ofrece. Pero no por ello se pueden dejar de considerar las otras clases, que en condiciones específicas serán la mejor opción para el acoplamiento de las bombas centrifugas.

1. Motor eléctrico.

Es un aparato destinado a transformar la energía eléctrica de suministro en energía mecánica. Puede ser de corriente directa o de corriente alterna, según la naturaleza de la misma.

		Serie	
Motor de C. D.		Derivación	
		Compuesto	
Motor de C. A.		Inducción	Rotor de jaula de ardilla
			Rotor devanado
		Síncronos	

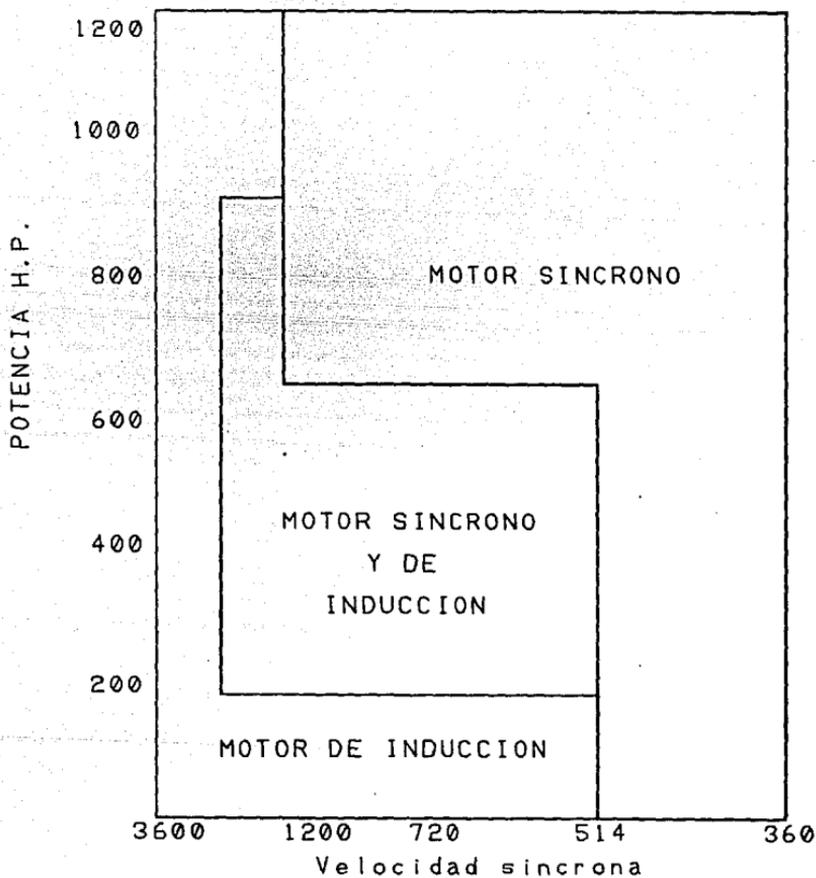
Las características de velocidad y par de arranque que se requieren para el accionamiento de las bombas centrífugas las brindan los motores de C.D. en derivación, los motores de C.A. síncrono y de inducción de jaula de ardilla.

En la figura (1-6), puede observarse la aplicación de los motores síncronos y de inducción de acuerdo con la velocidad de operación y su potencia.

En general las ventajas de los motores eléctricos son:

- Rendimiento elevado. De ninguna forma el rendimiento del grupo bomba-motor eléctrico es superado por cualesquiera de los otros medios de accionamiento.
- Pueden ser sellados a prueba de goteo, explosión, sumergibles, etc. en función de las características de protección que proporcione la cubierta externa del motor respecto al medio ambiente.
- Funcionamiento continuo a plena carga sin sobrecalentamiento, es decir, son diseñados para llegar a una temperatura final estable.
- Adecuados para el control automático y velocidad variable.
- Bajo mantenimiento, limpios y silenciosos.

Figura (1-6).



FUENTE: KARASSIK-FRASER.

2. Motor de combustión interna.

Maquina mediante la cual se convierte la energía térmica en trabajo mecánico, a través de la combustión de una mezcla de aire con gas, líquido o materia sólida pulverizada.

La aplicación del motor de combustión interna es extensa dentro del campo de las bombas centrífugas, efectuándose en: áreas aisladas, para unidades portátiles, grupos de emergencia, servicio de irrigación y pozos petroleros, utilizándose combustibles tales como; Gasolina, Diesel y Gas.

3. Turbinas.

Es un elemento motriz principal que convierte la energía térmica del fluido directamente en energía mecánica, en el caso de las turbinas de vapor y de gas. Cuando se trata de turbinas hidráulicas convierte la energía de presión a energía mecánica. Se aplican principalmente cuando se dispone del fluido de trabajo como elemento inherente del sistema donde se requiere la unidad de bombeo.

Para la adecuada selección de la unidad motriz, se deben considerar los siguientes parámetros:

- a. Potencia requerida.
- b. Características del par-velocidad.
- c. Vibraciones y esfuerzo de torsión.
- d. Atmosfera de operación (temperatura, humedad, etc.).
- e. Espacio disponible.
- f. Mantenimiento.
- g. Evaluación de los costos de instalación, equipo adicional, operación y desde luego el de la unidad motriz.

UNIDADES MOTRICES PARA BOMBAS CENTRIFUGAS

PARAMETRO	MOTOR C. A.	MOTOR C. C.	MOTOR GASOLINA	MOTOR DIESEL	MOTOR FUEL OIL	TURBINA VAPOR	TURBINA GAS	TURBINA HIDRAU- LICA
INVERSION	A	L	A					
GASTO COMBUSTIBLE	A	A		A	A	A		A
ESPACIO OCUPADO	A	A	A			A	A	
ARRANQUE RAPIDO	A	A	L	L	L	A	L	A
CONTROL VELOCIDAD	L	A	A	A	A	A	A	
ALTA VELOCIDAD			A					
BAJA VELOCIDAD	A	A	A	A	L			A
AMBIENTE PELIGROSO						A		A
CALIDO						A		A
HUMEDO			L	L	L	A	A	A
POLVOSO	L	L				A	A	
MANTENIMIENTO	A	L	A	A	A	A	A	A
VIDA UTIL	A	L	L	A	L	A	L	A

AADECUADO L=LIMITADO

FUENTE: JIMENEZ DE CISNEROS.

A continuacion se muestra un cuadro comparativo -figura (1-7)-
 donde se manejan las unidades motrices adecuadas para el
 accionamiento de las bombas centrifugas.

1.3 GENERALIDADES DEL DISEÑO.

Dos aspectos esenciales para el diseño o selección de un equipo de bombeo son las condiciones de servicio y la naturaleza del fluido, sin menoscabo de las necesidades propias de la unidad, tales como; simplicidad, bajo costo, calidad, facilidad de instalación, operación y reparación, entre otras.

Los parámetros más importantes concernientes al líquido de bombeo y que tienen influencia sobre las características de funcionamiento de la bomba son:

- Presión
- Temperatura
- Viscosidad
- Densidad
- Propiedades químicas

Y los más importantes dentro de las condiciones de servicio que marcan las características de funcionamiento son:

- Capacidad
- Carga hidráulica
- Potencia
- Requerimientos de succión

La selección o diseño de la unidad debe cumplir con las necesidades propuestas por las características del líquido y de funcionamiento, pero bajo estándares de normalización, que marcan tipos, características cuantitativas y cualitativas del equipo de bombeo.

En las normas consultadas, citadas en la bibliografía, se incluyen los siguientes puntos, que aquí se mencionan brevemente.

1. Definición y descripción de los parámetros señalados en las propiedades del fluido y condiciones de servicio.
2. Diseño básico de los elementos constitutivos, señalando rangos dimensionales, ajustes, tolerancias, acabado, características estructurales, etc.
3. Reglas para la conducción de pruebas, determinando los parámetros definidos en el primer punto, señalando procedimiento e instrumentación para su desarrollo.
4. Materiales de construcción.
5. Hoja de datos para especificación y solicitud del equipo, así como para el reporte de pruebas.

I.3.1 Propiedades del fluido.

Para definir las características que debe tener la unidad de bombeo requerida, es necesario tener perfecto conocimiento de las propiedades del líquido a manejar, cuánto y de dónde a dónde lo queremos transportar. A continuación se describen en forma breve y concisa los parámetros del líquido ya señalados:

a. Presión 'P'.

El comportamiento de la presión a través de la bomba es de suma importancia debido a la participación que tiene sobre la carga hidráulica desarrollada y la capacidad de succión, así como la influencia sobre los problemas de cavitación y golpe de ariete que se presentan debido a las variaciones de este parámetro.

Los diferentes términos de presión que se utilizan en el bombeo se muestran claramente en la figura (1-8).

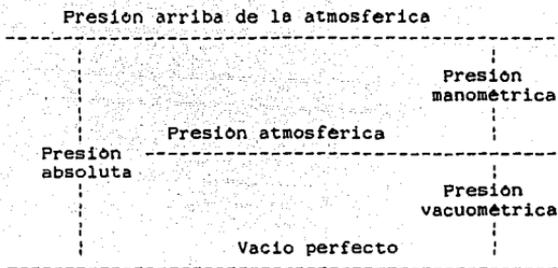


Figura (1-8)

En seguida se describen brevemente los problemas de cavitación y golpe de ariete:

Cavitación.

La presión en cualquier punto de un sistema que maneja líquidos nunca deberá reducirse a un valor menor que el de la presión de vapor del líquido a condición de la temperatura de operación. Es decir, no debe de operar el sistema a la presión de vaporización debido a que el fluido a la temperatura de ebullición o cerca de ella se encuentra en un estado volátil.

La cavitación se produce siempre que la presión en algún punto o zona de la corriente del líquido desciende por debajo del valor mínimo admisible, debido al desarrollo de una velocidad de corriente alta. Y se caracteriza por la evaporación local del líquido, dando lugar a la formación de burbujas que se desplazan, chocando unas contra otras o con la superficie del material, a zonas de mayor presión, donde sufrirán una condensación violenta; Implosión.

El peligro de cavitación limita: la velocidad específica, conforme se incrementa su valor así aumenta la tendencia a la cavitación; la capacidad de succión y el caudal de la bomba, que no deberá estar fuera del rango permisible.

Los efectos a que da lugar, son destructivos y por lo tanto indeseables, siendo estos; daño a las superficies del material, ruido, vibraciones y deterioro de las características hidrodinámicas.

Golpe de ariete.

Es un fenómeno transitorio que se presenta en las bombas, cuando se detiene el funcionamiento sin haber cerrado previamente la válvula en la tubería de impulsión o cuando existe una falta imprevista del suministro de energía a la unidad motriz. Creando una onda de presión y choque que somete a la tubería de impulsión a esfuerzos de expansión y a la zona de descarga de la bomba a cargas de impacto.

b. Temperatura 'T'.

Propiedad intensiva definida como la medida de la energía cinética media de cada molécula del líquido y que tiene influencia sobre:

- Viscosidad y densidad del líquido, que sufren una variación apreciable.
- Comportamiento químico del líquido. El incremento de la temperatura de operación acelera las posibles reacciones químicas que origine el líquido en contacto con los materiales de la bomba.

- La selección de sellos y empaques, así como los materiales de construcción.
- Las características de lubricación y/o enfriamiento.
- Aprovechamiento de la capacidad de succión, teniendo una influencia apreciable cuando se maneja por ejemplo, agua a una temperatura mayor de los 150 °C.

c. Viscosidad.

Es la propiedad de un líquido que nos indica la tendencia del mismo a resistir una fuerza cortante interna, se considera como "... la medida de la fricción interna de un líquido, que produce una resistencia al flujo a través de la bomba ..." [(50) op.cit. pag.7].

La viscosidad es función de la temperatura y de la presión, pero en el rango normal de bombeo los efectos de la presión sobre ella son despreciables. La viscosidad absoluta o dinámica se obtiene de la razón entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad: $\mu = \tau / \phi v$

y si a ésta la relacionamos con la densidad del lugar obtendremos la viscosidad cinemática: $\nu = \mu / \rho$

La influencia de la viscosidad del líquido bombeado a velocidad constante se manifiesta por la disminución de la carga y capacidad desarrolladas y por el aumento de la potencia requerida en comparación con los valores que se obtienen manejando agua en condiciones estándar. Por lo que, existen guías para predecir el comportamiento de las características de funcionamiento que correlacionan los datos del líquido viscoso y del agua en condiciones estándar, [(31) op.cit.pag. 104-105].

d. Densidad ' ρ '.

Es una propiedad intensiva que se define como la masa por unidad de volumen, es función de la temperatura y de la presión, siendo la influencia de esta última apreciable cuando existen presiones muy altas.

La densidad implica otro factor muy importante y útil para obtener las características de funcionamiento de la bomba cuando se manejan líquidos diferentes del agua, este es la densidad relativa o gravedad específica: $GS = \rho_l / \rho_w$

La densidad influye directamente en la potencia hidráulica desarrollada por la bomba: $N_u = \rho Q g H_u$.

e. Propiedades químicas.

Determinan el comportamiento del líquido cuando se pone en contacto con los materiales de la bomba y refiere los cambios permanentes que puede sufrir por la acción de la energía -calorífica, cinética, potencial, etc-.

El análisis de la composición del líquido nos proporcionará indicadores de:

- El comportamiento del PH.
- Los sólidos en suspensión o características de abrasividad.
- La acción electroquímica.
- Índice de corrosión.

Que influyen de manera determinante en la selección de los materiales de construcción y las características estructurales de los elementos constitutivos en contacto con el fluido, tales como; cubierta, impulsor, sello o empaque, anillos de desgaste, eje, etc.

1.3.2 Características de funcionamiento.

A continuación se describen brevemente los parámetros señalados en las condiciones de servicio.

a. Capacidad 'Q'.

Es el volumen de flujo manejado por la bomba en la unidad de tiempo a condición de la temperatura de bombeo.

La capacidad requerida determina de manera decisiva el tamaño de la bomba y ancho del impulsor, cuando Q es muy grande puede resultar conveniente dividirla en dos o más bombas operando en paralelo.

b. Carga hidráulica 'H'.

Es la cantidad de energía impartida al líquido operando a una cierta velocidad y manejando un volumen definido.

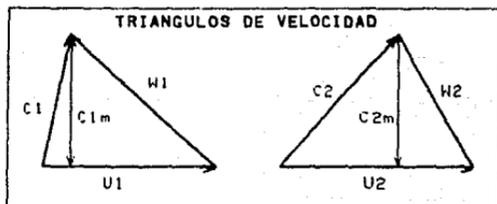
En su 'forma elemental' la carga hidráulica o altura de elevación denota la distancia a la superficie libre del líquido en reposo sobre un plano de referencia.

Para determinar la carga teórica proporcionada por la bomba es necesario establecer las velocidades de entrada y salida del impulsor, que se observan en la figura (1-9), además de los correspondientes triángulos de velocidad que se obtienen. La expresión de la ecuación de Euler nos proporciona el valor de la carga teórica:

$$H_t = (U_2 C_{2u} - U_1 C_{1u}) / g$$

Para determinar la carga hidráulica desarrollada se aplica la ecuación de Bernoulli:

$$H = [(P_2 - P_1)/g] + Z_2 - Z_1 + [(V_2 - V_1)/2g] + H_r$$



LOS PUNTOS 1 Y 2 REFIEREN LA ENTRADA
Y LA SALIDA DEL IMPULSOR .
U = VELOCIDAD PERIFERICA DEL IMPULSOR
C = VELOCIDAD ABSOLUTA DEL FLUJO
W = VELOCIDAD RELATIVA DEL FLUJO

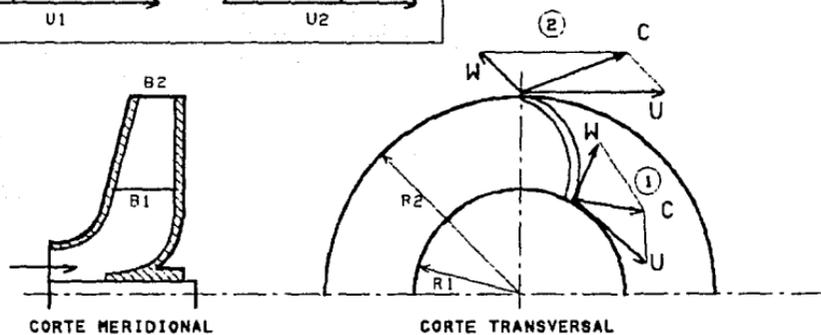


FIGURA (1-9)

Donde se considera:

- La elevación correspondiente a la diferencia de presiones absolutas existentes en el líquido.
- La diferencia de elevación entre el nivel de líquido de descarga y el nivel del líquido de succión, denominada carga estática total, ver figura (1-10).
- La elevación correspondiente a la velocidad que equivale a la distancia que la masa del líquido tendría que caer para adquirir esa velocidad.
- La carga de fricción, a través de la tubería y en los puntos de conexión de esta con la bomba -succión y descarga-, que se ve afectada por; las características del líquido bombeado, el tamaño, tipo y condición de la tubería y accesorios.

El valor de la carga hidráulica total determina el diámetro del impulsor o el número de impulsores que se requieren, por ejemplo para cargas muy altas es conveniente utilizar una bomba de pasos múltiples o bombas de un paso operando en serie.

c. Potencia 'N'.

Es importante determinar el valor de la potencia de suministro a la unidad motriz, la bomba y el líquido para obtener un óptimo aprovechamiento de la energía y desde luego costos de operación reducidos. Esto es debido a que existen pérdidas que disminuyen el valor de la potencia primaria de suministro tales como el rozamiento entre partes mecánicas, entre estas y el líquido y fugas del mismo, por lo que se determina; la potencia de accionamiento, interna y útil que enseguida se describen.

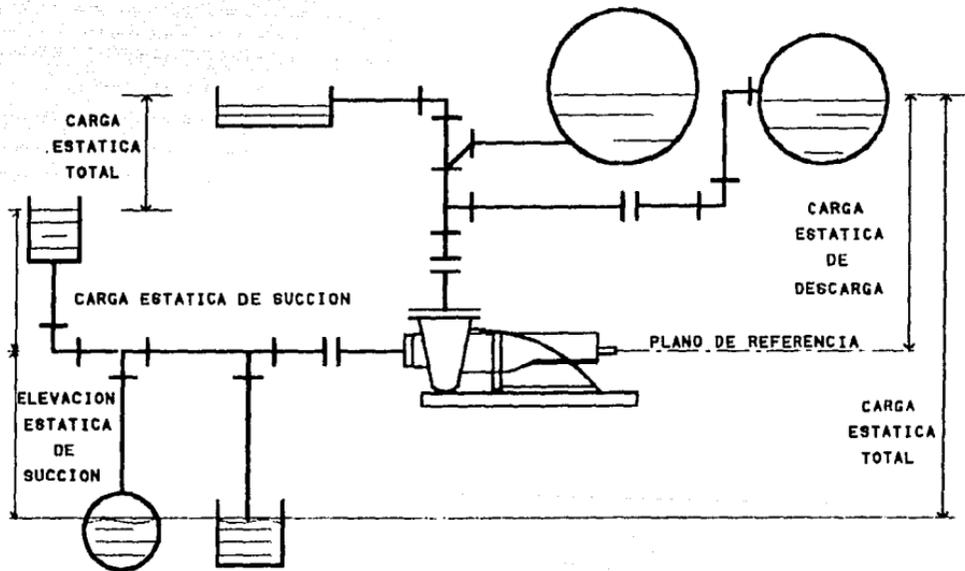


Figura (1-10)

- Potencia de accionamiento 'Na'.

Denominada también como potencia absorbida o al freno. Es la potencia libre en el eje de la bomba, es decir, es el producto de la potencia proporcionada por la red y el rendimiento de la unidad motriz, o; $N_a = M \omega$ donde 'M' es el par de torsión en el eje de la bomba y 'w' es la velocidad angular de dicho eje.

- Potencia interna 'Ni'.

Es la suministrada al rodete y es igual a la diferencia entre la potencia de accionamiento y las pérdidas debidas al rozamiento entre partes mecánicas: $N_i = N_a - p_m$

- Potencia útil 'Nu'.

Es el incremento de potencia que experimenta el líquido en la bomba, donde ya se han considerado las pérdidas por rozamiento entre el líquido y las paredes de la bomba, las fugas y las que se originan por la tendencia del líquido a retornar a la entrada de la bomba debido a la caída de presión que existe entre la succión y descarga.

$$N_u = Q \cdot g \cdot H_u$$

d. Requerimientos de succión NPSH

Es importante disponer de la energía suficiente para pasar el líquido por la tubería de succión y la vía de agua de succión de la bomba dentro del impulsor. A esta energía disponible, "... medida en al abertura de succión de la bomba ..." [(38) op.cit. pag.223], se le denomina Carga Neta Positiva de Succión CPNS -Net Positive Suction Head NPSH-.

Existen dos valores importantes de este parametro: la NPSH disponible y la NPSH requerida. Donde la primera es una característica del sistema en el que opera la bomba y se determina por la siguiente relación:

$$NPSH_d = [(P_a - P_v) / \rho g] - H_s - H_r \quad (1)$$

$$NPSH_d = [(P_a - P_v) / \rho g] + H_s - H_r \quad (2)$$

Ver figura (1-11)

donde:

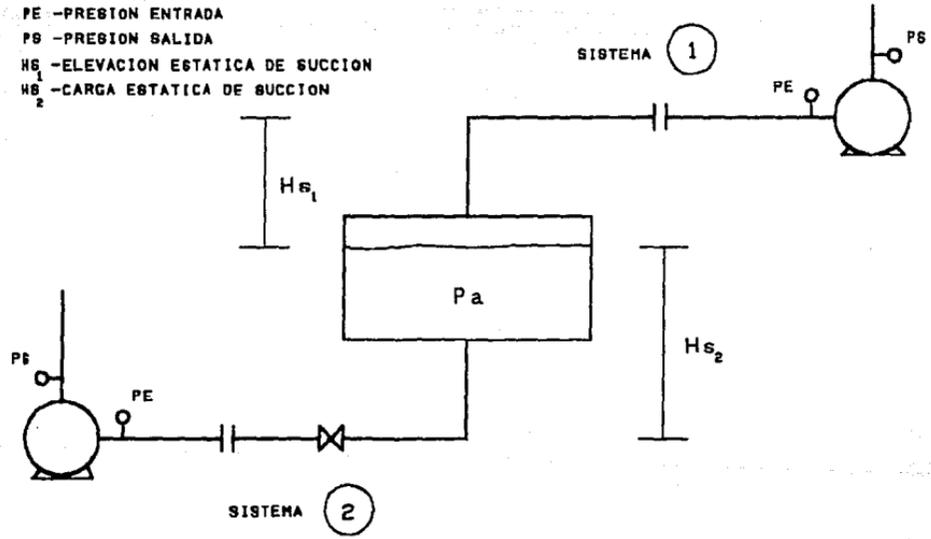
- Pa - Presión en el abastecimiento de succión.
- Pv - Presión de vapor de líquido a la temperatura de bombeo.
- Hs - Carga estática en la línea de succión.
- Hr - Pérdidas de carga por fricción en la línea de succión y el punto de entrada.

La NPSH requerida es función del diseño de la bomba y representa el margen mínimo requerido entre la carga de succión (estática y por fricción) y la presión de vapor a una capacidad determinada. Para la determinación de la NPSH r influyen los siguientes factores:

- Diámetro del ojo de succión y área de succión.
- Forma y número de álabes.
- Área entre álabes.
- Diámetro del eje y cubo del impulsor.
- Velocidad específica del impulsor.
- Presión de vapor y temperatura de bombeo.
- Presión de operación.

Como se aprecia la selección adecuada de la carga o elevación estática de succión también influye en el fenómeno de cavitación, puesto que debe cumplirse: $NPSH_d > NPSH_r$.

PE -PRESION ENTRADA
 PS -PRESION SALIDA
 H_{S1} -ELEVACION ESTATICA DE SUCCION
 H_{S2} -CARGA ESTATICA DE SUCCION



74

Figura (1-11)

FUENTE: MECANICA DE FLUIDOS II

Es decir, cuando la carga de succión es insuficiente, la presión de operación sufre una caída llegando al valor de la presión de vaporización y la bomba no desarrolla las características normales de operación -capacidad, carga y potencia útil-.

1.3.3 Gráficas de las características de funcionamiento.

A la gráfica que presenta la interrelación entre las características de funcionamiento de la bomba generalmente se le denomina carta de curvas características.

Las curvas características nos muestran el comportamiento de la carga, potencia y eficiencia en función de la capacidad desarrollada. A continuación se muestra la figura (1-12) con las curvas características de una bomba centrífuga operando a velocidad constante con un diámetro de impulsor y una viscosidad, cuyos valores son mostrados al margen de la figura.

El perfil de estas curvas se ve determinado por las características estructurales y condiciones de operación, así como la influencia que ejercen los parámetros del líquido bombeado. En la figura (1-13) se muestran las curvas características para condiciones tipo, es decir, aquellas donde la operación es a la velocidad de diseño y donde la curva de eficiencia alcanza su máximo.

La relación gráfica entre la NPSH y la capacidad se muestra en la figura (1-14) que corresponde al sistema (2) de la figura (1-11).

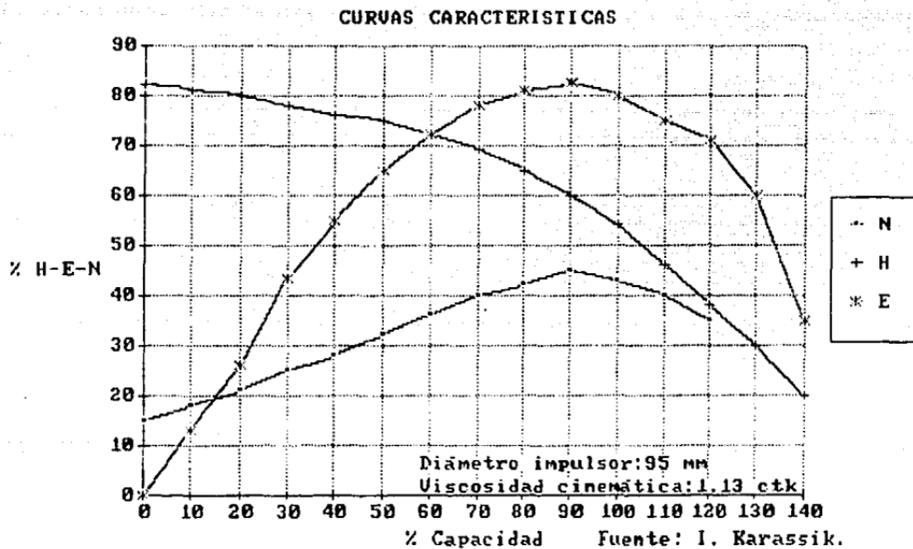


Figura (1-12)

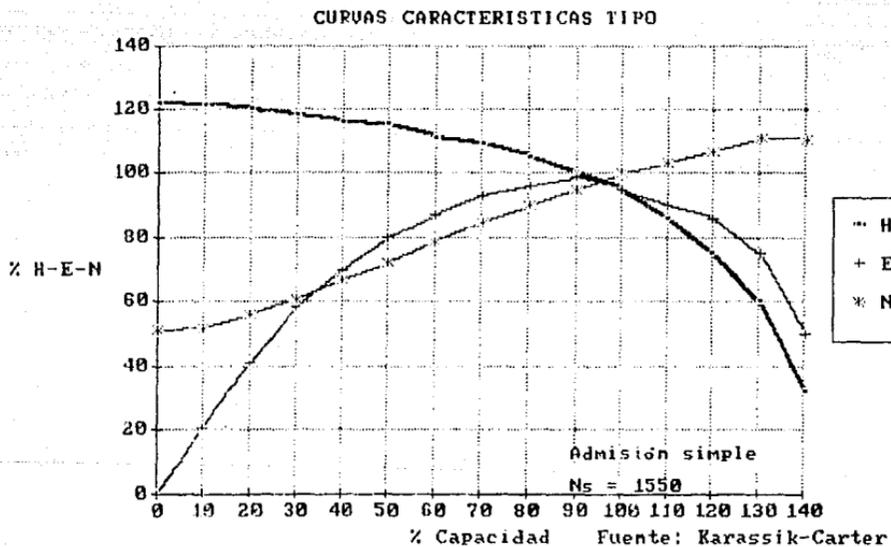


Figura (1-13)

CARGA NETA DE SUCCION POSITIVA

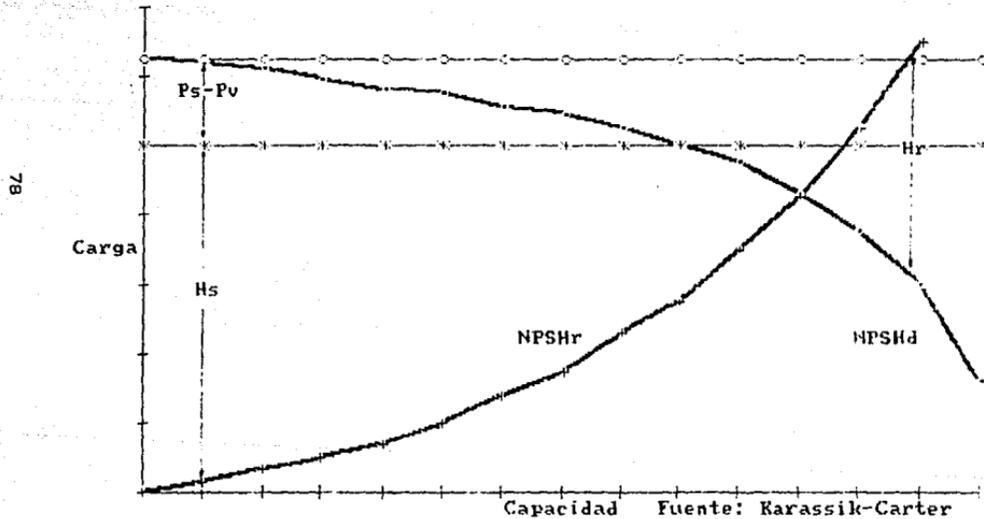


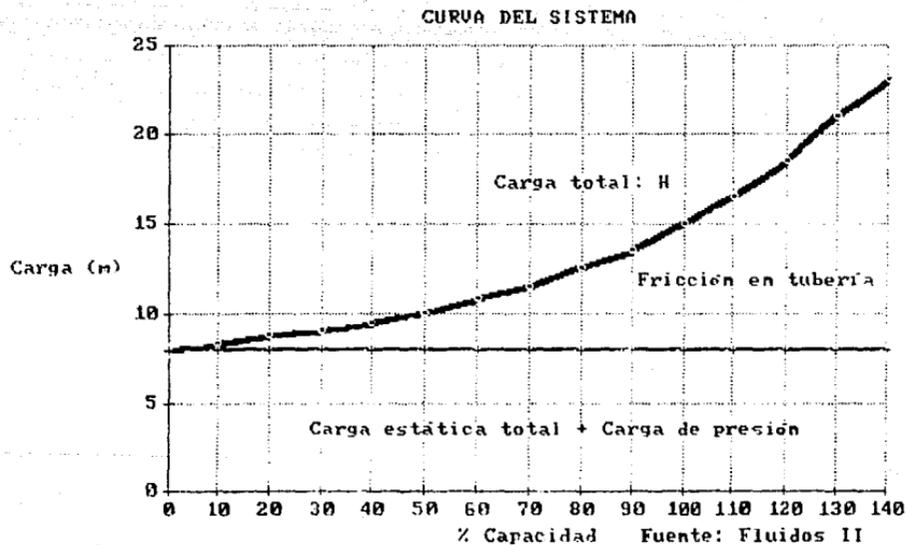
Figura (1-14)

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Considerando la disposición del sistema de bombeo se puede obtener una curva que muestre la interrelación entre la carga y capacidad, que nos permite:

- Cuantificar el rango de $H - Q$ que la bomba es capaz de desarrollar con respecto al sistema y de este modo determinar la compatibilidad de la bomba con el sistema.
- Conocer la carga para valores de capacidad diferentes a los empleados en su diseño y construcción.
- Cuantificar la relación de pérdidas totales de carga con respecto a las cargas de presión y estáticas ($\Delta P/\gamma + \Delta Z$) y las condiciones de la tubería (diámetro, rugosidad, etc.).

En la figura (1-15) se observa la curva del sistema (2) de la figura (1-11).



I.4 MATERIALES DE CONSTRUCCION.

El diseño y detalles del proceso de manufactura de las bombas centrífugas podrá diferir de acuerdo con el fabricante, pero la selección de materiales de construcción sigue un patrón general, que se ha obtenido principalmente de la experiencia de fabricantes y usuarios, así como de pruebas experimentales, teniendo estas últimas algunas limitaciones prácticas debido a la gran cantidad de variables que intervienen en la operación de bombeo. A continuación se enumeran los datos requeridos para obtener una selección apropiada del material, considerando normas estándares aplicables, guías de selección, cuestionarios y sugerencias de los autores consultados:

a. Unidad de bombeo

- Presión y temperatura máxima de operación
- Gasto y carga desarrollados
- Carga neta positiva de succión: NPSH
- Velocidad máxima de operación

b. Características del líquido.

- Tipo de líquido bombeado
- Temperatura
- Gases en solución, impurezas y otros constituyentes
- Sólidos en suspensión
- Principales corrosivos
- Valor del pH, Gravedad específica y Viscosidad dinámica.

c. Otras características

- Aereación
- Tipo de servicio; continuo o intermitente

- Material de la tubería de instalación
- Experiencia en la selección del material
- Costo y vida económica esperada

La mayoría de estos factores también tienen influencia sobre los efectos a los que se ven sujetos los materiales de construcción, siendo aquellos: la cavitación, erosión y corrosión.

Las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los materiales deben cumplir los requerimientos de inspección y prueba de las normas estandares, pero las características generales, que se pueden ver ampliadas para servicios particulares, son las siguientes:

- Adaptabilidad del material para las propiedades estructurales y de operación particulares de la unidad requerida.
- Resistencia a los efectos de concentración, agitación y temperatura del líquido bombeado.
- Resistencia apropiada al impacto y a la fatiga.
- Resistencia adecuada a la abrasión, corrosión y calor.
- Facilidad de fabricación.
- Disponibilidad del material.
- Ventaja económica

1.4.1 Materiales ferrosos.

Los materiales ferrosos comúnmente empleados en la construcción de bombas centrífugas incluyen las fundiciones, aceros al carbón y aleados, incluyendo en éstos últimos los inoxidables.

La temperatura máxima de operación señalada aquí, está marcada en la bibliografía consultada, -(36) y (54)-.

A. Hierro fundido

Es una aleación de Fe y C, con un contenido comercial aproximado de carbono de 2.5% a 4% y elementos tales como Silicio, Manganeso, Fosforo y Azufre.

Las piezas de fundición presentan múltiples ventajas entre las cuales se pueden citar; su bajo costo, fundición sencilla, instalación menos costosa, fusión a temperaturas poco elevadas, facilidad de mecanizado y gran capacidad de amortiguación a las vibraciones, pero presentan valores bajos de resistencia a la tensión y ductilidad. Dichas características pueden variar ampliamente en función del contenido de carbono, contenido de elementos de aleación e impurezas, velocidad de enfriamiento durante y después de la solidificación y tratamiento térmico posterior.

Los tipos de hierro fundido que se emplean en la construcción de bombas centrífugas en función de su estructura metalográfica son:

- Fundición maleable
- Fundición gris
- Fundición nodular
- Fundición aleada
(Cr, Cu, Mo, Ni, V, Si)

La temperatura máxima de operación está relacionada con el punto de transformación eutéctico es decir a la temperatura de 720°C.

B. Aceros al carbono

Aleación de hierro - [0.1-1.7 %] carbono, que contiene además los siguientes elementos: 1.65% Mn, 0.60%Si, 0.07%P y 0.025-0.06%S donde el contenido de carbono ejerce mayor influencia sobre las propiedades mecánicas.

Utilizados donde los requisitos de; resistencia, ductilidad, maleabilidad, tenacidad no son severos. A temperatura ambiente y en atmosferas no altamente corrosivas y donde la templabilidad requerida es relativamente baja. El rango de temperatura para la operación está señalado de -29°C a 538°C .

C. Aceros aleados

Se puede definir como aquel cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente del carbono y entre aquellas que son incrementadas se encuentran:

- Templabilidad
- Resistencia a temperaturas comunes
- Propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas
- Tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima
- Resistencia al desgaste
- Resistencia a la corrosión
- Propiedades magnéticas

Entre los aceros empleados en la construcción de bombas centrífugas se encuentran:

C1. Aceros al cromo molibdeno (serie 41XX)

Con buenas características de endurecido profundo, de ductilidad y de capacidad para sueldarse. El rango de temperatura de operación es señalado de -29 a 649°C .

C2. Aceros inoxidables (serie 2XX, 3XX y 4XX)

Empleados donde se requiere resistencia a la corrosión y el calor, empleándose aceros martensíticos, ferríticos y austeníticos. El rango de temperatura para la operación está comprendido entre -200 y 816°C .

1.4.2 Materiales no ferrosos.

Los materiales empleados en la construcción de bombas centrífugas incluyen los no ferrosos como el Cobre, Níquel, Plomo, Aluminio, Titanio y algunas de sus aleaciones.

A continuación se hace una breve descripción de las propiedades de los metales y aleaciones empleadas para el fin especificado.

A. Cobre y sus aleaciones.

El cobre y la mayoría de sus aleaciones constituyen fases homogéneas únicas, no susceptibles al tratamiento térmico y cuya resistencia puede alterarse por trabajo en frío. El cobre posee alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión, maquinabilidad, resistencia y facilidad de fabricación.

Las aleaciones comerciales aplicadas en la construcción de las bombas centrífugas son los bronce y cuproníqueles. Donde el término bronce se aplica a cualquier aleación de base cobre con excepción del cobre-cinc y cobre-níquel [(12) op.cit.pag.468].

- Bronces al estaño o fosforados (Cu, 1-11Sn, 0.01-0.5P).

Se caracterizan por la tenacidad, alta resistencia a la corrosión, bajo coeficiente de fricción y libertad de presencia de fisuras por esfuerzo de corrosión.

- Bronces al silicio (Cu, 0.6-5Si).

Altas propiedades mecánicas, similares a las del acero al medio carbón. Plasticidad y resistencia a la corrosión.

- Bronce al aluminio (Cu, 4-11Al).

Es posible formar una aleación bifásica ($\alpha + \beta$) susceptible al tratamiento térmico.

- Cuproniqueles (Cu, 0.1-30Ni)

Contienen hasta 30% Ni, formando aleaciones de una sola fase. Tienen alta resistencia a la corrosión por fatiga y a la acción corrosiva y erosiva del rápido movimiento del agua de mar.

B. Niquel y sus aleaciones.

El níquel se caracteriza por tener buena resistencia a la corrosión y oxidación, forman aleaciones de solución sólida dúctil y tenaz. La temperatura máxima de operación es de 205°C. Los elementos de aleación más comunes son el cobre, hierro, cromo, silicio, molibdeno, manganeso y aluminio. Entre las aleaciones que se emplean en las bombas centrífugas están las que a continuación se citan:

- Aleaciones base níquel-cobre.

Propiedades mecánicas superiores a las de los broncees pero menores a las de los aceros aleados, tiene buena tenacidad y resistencia a la fatiga. Encuentra considerables aplicaciones a elevadas temperaturas.

Entre ellas se encuentra el Monel (70Ni, 30Cu), que tiene alta resistencia a los ácidos, álcalis, salmueras, aguas, productos alimenticios y a la atmósfera. La temperatura máxima de operación es de 150 °C.

- Aleaciones níquel-molibdeno-hierro.

Entre ellas se encuentra el Hastelloy B (62Ni, 28Mo, 5Fe), es notable por su alta resistencia a la corrosión por ácidos no oxidadores -hidroclórico, fosfórico, etc.-. La temperatura máxima de operación está entre 752 y 862 °C.

- Aleaciones níquel-cromo-molibdeno-hierro.

Entre ellas se encuentra el Hastelloy C (54Ni, 17Mo, 15Cr, 5Fe, 4W), se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión por ácidos de oxidación -nitrico, crómico y sulfúrico-. Tiene buenas propiedades a altas temperaturas -la máxima de operación es de 1000°C- resistiendo atmósferas de oxidación y reducción.

- Aleaciones níquel-cromo-molibdeno-cobre.

Entre ellas se encuentran el Inconel B, G y R, teniendo las siguientes composiciones: Inconel B (50Ni, 28Cr, 8.5Mo, 5.5Cu), Inconel G (56Ni, 22.5Cr, 6.5Mo, 6.5Cu) e Inconel R (68Ni, 21Cr, 5Mo, 3Cu). Las primeras dos forman aleaciones fundibles de alta resistencia con buenas propiedades contra la corrosión. La tercera es una aleación forjada maquinable con resistencia al calor y la corrosión. Temperatura máxima de operación 205 °C.

C. Plomo y sus aleaciones.

Las principales propiedades del plomo son; peso elevado, alta densidad, suavidad, maleabilidad, bajo punto de fusión y baja resistencia mecánica; además tiene propiedades de lubricación, baja conductividad eléctrica, alto coeficiente de expansión y alta resistencia a la corrosión. La aleación que se emplea en las bombas centrífugas es el plomo duro (94-96Pb, 4-6Sb).

D. Aluminio.

El aluminio tiene buena maleabilidad, formabilidad, alta resistencia a la corrosión y gran conductividad eléctrica y térmica, además de un peso ligero, naturaleza no tóxica ni magnética.

Los elementos de aleación más comunes son cobre, manganeso, silicio, magnesio, cinc y magnesio-silicio, que generalmente elevan su resistencia.

E. Titanio

El titanio tiene excelente resistencia a la corrosión, especialmente a la corrosión por hendiduras y picaduras por agua de mar. Resiste el ácido nítrico, el cloruro ferrico y soluciones cloradas calientes.

Los elementos de aleación empleados son aluminio -aleación unifásica-, cromo, molibdeno, vanadio, manganeso e hierro -aleaciones bifásicas-. Su temperatura máxima de operación es de 480°C.

I.4.3 Polímeros.

La aplicación de los polímeros en la industria del bombeo se ha extendido en los últimos años, aún cuando no ha sido totalmente aceptado su empleo general.

Los polímeros presentan la siguiente clasificación basada en su procesamiento y uso final:

	:	:	Termoendurecibles
	:	Plásticos	:
	:	:	Termoplásticos
Polímeros	:	Fibras	:
	:	:	:
	:	Elastómeros	:

El campo de aplicación comprende los plásticos y elastómeros, utilizando los primeros en la construcción parcial o total de la bomba y también cubriendo el propósito de los elastómeros, que son empleados como recubrimientos de los elementos en contacto con el líquido a manejar.

Los plásticos en función del comportamiento que presentan durante el calentamiento se dividen en; termoendurecibles y termoplásticos. Los plásticos termoendurecibles, también denominados termofijos o termofraguantes, después de la aplicación de calor con o sin presión presentan un estado rígido (duro), no fusible y no soluble. Generalmente tienen una estructura molecular de red tridimensional.

Los termoplásticos funden bajo la acción de calor y se endurecen durante el enfriamiento, existiendo la posibilidad de refabricación varias veces pero en detrimento de sus propiedades físico-mecánicas. Pueden tener una estructura cristalina o vítrea.

Los plásticos a temperatura ambiente están bajo el punto de transición vítrea, es decir, aquel en el que hay un cambio de pendiente en la curva de volumen-temperatura debiendo ser empleados bajo este punto para obtener estabilidad dimensional.

Los elastómeros a temperatura ambiente están por encima del punto de transición vítrea, por lo que tienen un módulo de elasticidad y una resistencia muy elevadas al ser estirados, recobrando finalmente su estado original. Tienen una estructura molecular de red tridimensional.

Las características generales de los polímeros se mencionan a continuación:

- Bajo valor de la densidad.
- Baja resistencia al calor, generalmente de -60 a 200 °C.
- Índice bajo de transferencia de calor -conductividad térmica-.
- Baja dureza (6-60 HB).

- Estabilidad química en medios agresivos.
- Propiedades electroaislantes.
- Alta resistencia mecánica.
- Rápida elaboración y múltiples opciones de fabricación -colado, inyección, extrusión, etc.-.
- Posibilidad de obtener tolerancias exactas y excelentes acabados de la superficie, así como gran diversidad de colores.
- Posibilidad de envejecimiento por efectos del medio ambiente.
- En ocasiones un costo elevado.

Algunos de los materiales empleados en la construcción de bombas y características sobresalientes se citan a continuación:

A. Plásticos termoendurecibles

Resina fenólica.- Material duro, de alta resistencia, durable, capaz de ser moldeado bajo una amplia variedad de condiciones. Alta resistencia al calor y al agua. Temperatura máxima de operación 94-177 °C.

Resina epóxica.- Tiene poco 'encogimiento', buena resistencia a las sustancias químicas, excelentes características eléctricas, propiedades físicas firmes y buena adherencia. Temperatura máxima de operación 122-205 °C.

Silicones.- Estabilidad, resistencia a altas temperaturas por largos periodos de tiempo, buenas características a baja temperatura, excelentes características eléctricas y repelencia al agua.

B. Materiales termoplásticos.

Poliestireno.- Bajo peso específico (1.07), resistente al agua y a la mayor parte de los agentes químicos, estabilidad dimensional y buenas características de aislamiento. Temperatura máxima de operación 125-170 °C.

PVC - Cloruro de polivinilo.- Resina acrílica con alto grado de resistencia a muchos solventes. No soporta la combustión. Temperatura máxima de operación 87 °C.

Polietileno.- Flexible a temperatura ambiente normal y a bajas temperaturas, a prueba de agua, resistente a la mayoría de los agentes químicos. Temperatura máxima de operación 85 °C.

Polipropileno.- Excelentes propiedades eléctricas, alta resistencia al impacto y a la tensión, con buena resistencia a los productos químicos y al calor. Temperatura máxima de operación 94-122 °C.

C. Elastómeros.

Entre los de este tipo son empleados el Caucho natural (70-80°C), el Butadieno-estireno [Buna S] (80-90°C), el Nitrilo [Buna N] (121°C) y el Cloropreno [Neopreno] (100°C), que generalmente tienen resistencia mecánica elevada, aún cuando los sintéticos tienen mejor resistencia al frío y a la acción de los disolventes.

I.5 APLICACIONES.

Debido a la amplia gama de necesidades que satisface la bomba centrífuga en la industria, sería demasiada extensa la lista de aplicaciones particulares, pero pueden citarse algunos procesos generales de aplicación, tales como:

- Suministro de agua a zonas agrícolas, rurales y urbanas.
- Procesos en plantas de fuerza; alimentación de calderas, circulación del condensado, etc.
- Procesos industriales; sistemas hidráulicos de alta presión, suministro general de agua, sistemas contra incendio, tratamiento de aguas negras, etc.
- Industria química; manejo de líquidos de características variables, desde los inertes hasta los altamente corrosivos y reactivos.
- Industria petrolera; transporte de crudo, trasiego de productos refinados como la gasolina y el diesel, etc.
- Proceso y manejo de alimentos; transporte de lácteos, cerveza, salmuera y otros.
- Servicio a la marina; servicios auxiliares como circulación de agua de mar, agua corriente, alimentación a calderas, etc.; bombeo de fangos y otros.
- Industria papelera; manejo de agua, pulpa de baja consistencia, licores, productos químicos con sólidos en suspensión, etc.
- Industria minera; servicios generales como el transporte y manejo de agua de mina, servicio de achique, etc.
- Usos especiales; manejo de cenizas, grava, estiercol, arena y servicio de dragado.

Los rangos de operación de las características de la bomba están sujetos al diseño, materiales de construcción y líquido de bombeo, pero pueden establecerse de manera general algunos de ellos sin ser estrictos.

La presión de descarga varía desde muy pequeña, como 0.15 MPa en una bomba de uso doméstico, hasta muy alta tal como 36 MPa en una bomba de alimentación de caldera en una planta de fuerza.

La capacidad así como la presión, va desde muy pequeña hasta muy grande, por ejemplo; 1.5 a 13500 m³/h.

La altura de elevación o carga varía desde 10 m en una bomba de una etapa hasta 5000 m en una de etapas múltiples.

En cuanto a la carga neta positiva de succión disponible generalmente comprende valores entre 4.5 y 6 m.

La gran diversidad de líquidos que se pueden manejar incluyen desde los limpios y claros hasta aquellos viscosos y con sólidos en suspensión. Incluyendo para los últimos pequeñas modificaciones en el diseño y materiales de construcción, existiendo algunas recomendaciones generales para su manejo, tales como:

- Temperatura de operación de acuerdo con la establecida por el límite máximo del material de construcción -sección I.4-.
- Manejo de líquidos cuya viscosidad cinemática sea menor a los 100 centistokes.
- Selección adecuada del material de construcción pudiendo considerar la guía de las normas del Instituto de Hidráulica [op.cit. 276-296], así como la aplicación de recubrimientos polímeros.

- Manejo de líquidos con sólidos en suspensión limitándose a la capacidad proporcionada por las características estructurales del impulsor de la bomba.

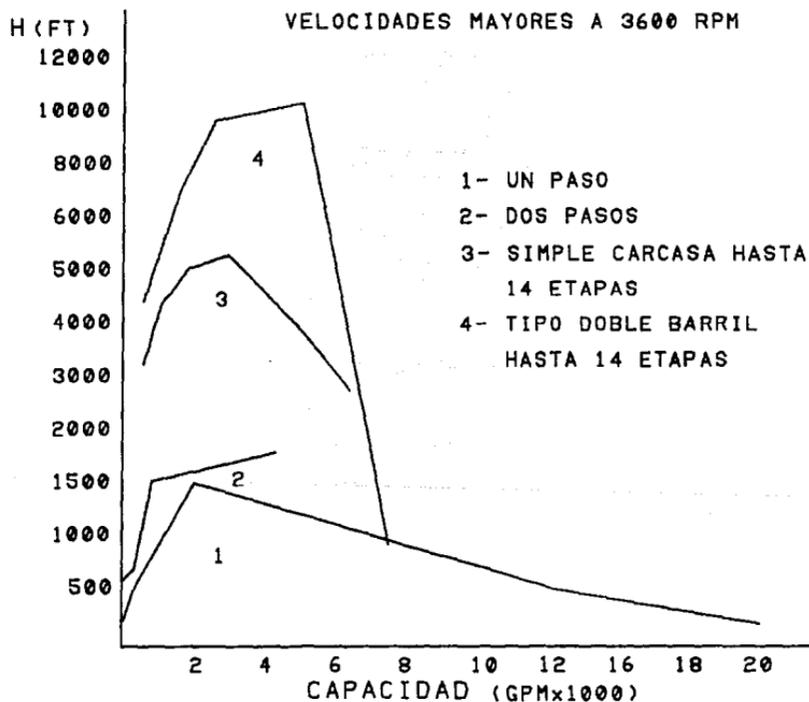
En la figura (1-16) se pueden apreciar las aplicaciones de los distintos tipos de bombas centrífugas de acuerdo a la capacidad y altura requeridas.

En el desarrollo del presente trabajo el líquido bombeado será el agua, por su amplio manejo y aplicación en todos los ambientes. En la industria, por ejemplo, la cantidad empleada excede la de cualquier otro material, siendo el uso principal en las calderas, dispositivos de enfriamiento y propósitos generales. A lo largo de la presente investigación se tratarán diversas aplicaciones tales como el agua de alimentación de calderas, manejo de agua cruda en el proceso de tratamiento de aguas negras, manejo de fluidos con sólidos en suspensión en la industria del cartón y algunas aplicaciones particulares tales como el manejo de salmuera, agua clorada y líquidos colorantes cuyo componente principal también es el agua.

También se tratarán algunos servicios que manejan productos químicos abrasivos y/o corrosivos tal como los residuos de petróleo crudo y un producto químico de uso en la agricultura.

Analizando para los servicios mencionados el problema de corrosión, en el caso de estar presente, sus causas y consecuencias.

TABLA DE COBERTURAS COMERCIALES DE BOMBAS CENTRIFUGAS
 HORIZONTALES -IMPULSOR DE FLUJO RADIAL- $N < 3600$ RPM



FUENTE: SULZER

Figura (1-16)

II PLANTEAMIENTO TEORICO
DE LA CORROSION EN
LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE
LA BOMBA CENTRIFUGA

II.1 ANTECEDENTES

El problema de la corrosión tiene para el ingeniero una importancia que sólo es inferior a la del diseño de los elementos, debido a la influencia que tiene sobre el aspecto económico (pérdidas directas e indirectas) y la seguridad humana.

Desde el momento en que fué posible obtener los metales a partir de los minerales, se puso marcha atrás al proceso natural que los llevó, combinados con otros elementos, a formar parte de diversas formaciones geológicas. El estado metálico presenta un contenido elevado de energía con respecto al mineral original, por lo que es de esperar que los metales vuelvan al estado de energía más bajo con la liberación correspondiente de la misma.

En la corrosión se combinan los siguientes factores; "...la química del medio, los aspectos metalúrgicos y físicos de los metales y la cinética de reacciones heterogéneas entre los metales y el medio que les rodea..." [(26) op.cit.pag.851] que hacen al problema general sumamente complejo debido al número de variables que intervienen. Pero la conservación de los metales es una necesidad inmediata, por lo que una de las funciones del ingeniero es comprender el problema y conocer las medidas que pueden tomarse para reducir al mínimo el desperdicio y deterioro prematuro.

El tipo de corrosión más frecuente, señalado por los autores consultados, es la corrosión electroquímica que implica una reacción que involucra a las especies químicas y a las cargas eléctricas.

II.2 CLASES BASICAS DE CORROSION

Son diversas las definiciones que se tienen de la corrosión en un medio acuoso, pero pueden resumirse en la siguiente:

'Deterioro o destruccion gradual de los materiales debido a un proceso electroquimico a causa de la interacción del material con el medio ambiente que le rodea.'

El deterioro, en ocasiones visible, puede manifestarse por los productos de la corrosión -herrumbre-, pérdida de peso, variación de las propiedades mecánicas, etc.

La tendencia de los materiales a corroerse es debido a la inestabilidad energética que existe entre ellos y los productos de su corrosión, siendo éstos una muestra de que el material tiende a volver a su estado mineral estable. Sin embargo no es la tendencia a la corrosión -aspecto termodinámico- lo que determinará la utilidad de un material en un medio agresivo, sino la velocidad del proceso -cinética química-.

Siendo la corrosión un proceso electroquímico se requieren cuatro elementos para su desarrollo:

- Zona anódica o activa
- Electrolito
- Zona catódica o pasiva
- Conductor eléctrico

teniendo una representación muy simple en la figura (2-1).

En dicho proceso existen dos reacciones, una anódica o de oxidación que se puede representar por la siguiente expresión:

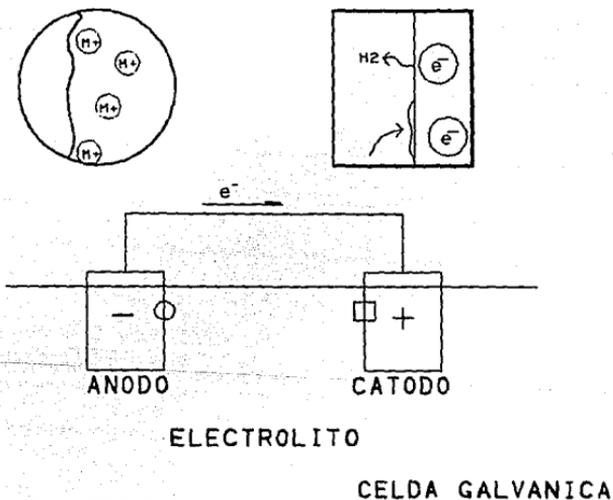


y la otra catódica o de reducción, que nos muestra siempre un 'consumo de electrones', pudiendo obtenerse una neutralización de iones positivos o generación de iones negativos.

Figura (2-1)

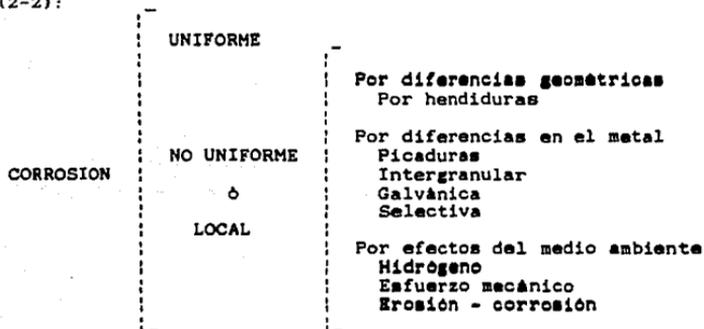
CORROSION ELECTROQUIMICA .

HAY FORMACION DE IONES Y LIBERACION DE ELECTRONES EN LA SUPERFICIE ANODICA. SIMULTANEAMENTE EXISTE UN ' CONSUMO DE ELECTRONES ' EN LA SUPERFICIE CATODICA.



Esto implica que para el desarrollo de la corrosión debe haber formación de iones y liberación de electrones en la superficie anódica donde se efectúa la oxidación o deterioro del metal. Simultáneamente en la superficie catódica deben aceptarse los electrones generados en el ánodo.

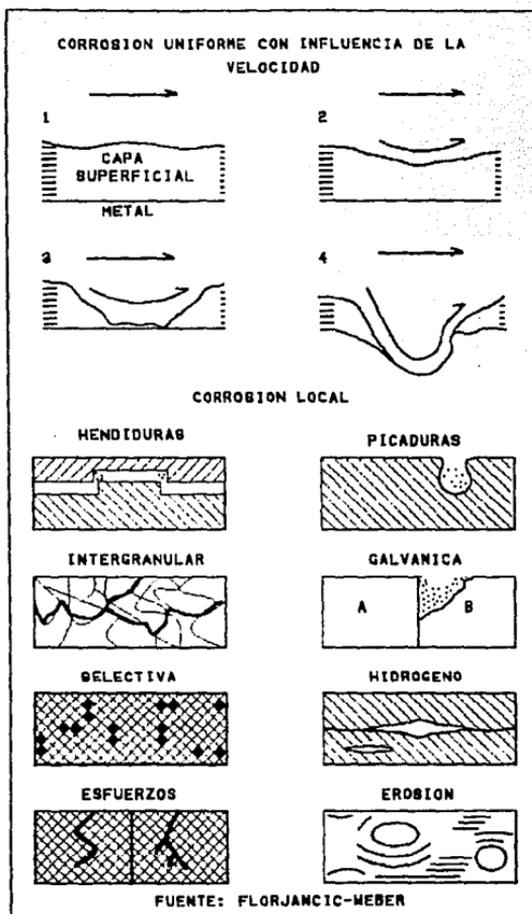
A continuación se presenta una clasificación de la corrosión según la forma en la cual se manifiesta, siendo la base la apariencia del metal corroído -morfología del ataque-, ver figura (2-2):



Virtualmente todas las formas conocidas de corrosión pueden ocurrir durante la operación de la bomba. En cada caso el riesgo de corrosión debe ser evaluado considerando el líquido bombeado, selección del material, tipo de bomba y parámetros hidráulicos de la misma.

A continuación se hará una breve descripción de los tipos de corrosión del esquema anterior, mencionando puntos tales como; características generales, materiales susceptibles, medios propicios y el mecanismo de desarrollo.

Figura (2-2)



II.2.1 Corrosión uniforme o general.

Se caracteriza por el ataque homogéneo a la superficie del material originando la disminución uniforme de su volumen y formación de productos de la corrosión solubles, a un ritmo constante. Lo que implica una pérdida de peso apreciable que eventualmente da lugar a la falla.

Los autores consultados lo sugieren como un caso ideal, debido a la poca frecuencia de su desarrollo, pero es posible observarlo en medios ácidos y fuertemente alcalinos sobre algunos materiales, por ejemplo, metales anfóteros en álcalis fuertes [(26) op.cit.pag.882].

Existe la posibilidad de predecir la vida útil de los elementos susceptibles a la corrosión uniforme por pruebas simples de inmersión en el líquido a manejar.

II.2.2 Corrosión por hendiduras.

Corrosión de carácter local que se presenta en áreas cerradas y hendiduras sobre la superficie del metal expuesto al medio corrosivo. es decir, zonas geoméricamente adecuadas que se caracterizan por permitir la entrada del líquido y mantenerlo estancado, por ejemplo; agujeros, cavidades, gargantas estrechas, juntas traslapadas, etc. o bajo depósitos producto de la corrosión, arena, polvo y otros sólidos.

A grandes rasgos el desarrollo del ataque se inicia con un largo periodo de incubación cuyo final se presenta con el inicio de la disolución del metal 'M' en la hendidura.

Pero debido a la convección restringida en dicha cavidad la reacción de reducción (oxígeno a iones hidroxilo $O \rightarrow OH$) es casi nula, pero la disolución continua dando lugar a un exceso de carga positiva, por lo que se presenta una neutralización local y/o reducción del valor del pH, fenómenos que aceleran el proceso de corrosión.

Un parámetro importante para la evaluación de la susceptibilidad de un material a la corrosión por hendiduras es el valor del pH de activación, por debajo de él el material una vez activo no se volverá pasivo nunca más. Un material con un valor bajo de pH de activación es menos sensible a la corrosión por hendiduras.

El proceso de corrosión por hendiduras es denominado autocatalítico, es decir, es un proceso autoestimulado y autopropagado. Dentro de este tipo de corrosión existe un caso especial denominado corrosión filiforme, que se presenta comunmente en superficies esmaltadas o laqueadas dañando la apariencia de los componentes.

II.2.3 Corrosión por picaduras.

Ataque extremadamente localizado que se caracteriza por la presencia de cavidades pequeñas, hemisféricas, con diámetro superficial igual o menor que su profundidad, es decir, la apariencia muestra agujeros finamente definidos -ánodos- y carencia de dano sobre la mayor parte de la superficie -catodo- expuesta al medio ambiente.

Son susceptibles al dano por picaduras especialmente los materiales pasivos, es decir aquellos cuyo comportamiento es similar al de un cátodo, medios insuficientemente inhibidos o materiales y medios no homogéneos, por ejemplo, la diferencia en reactividad de las direcciones cristalográficas del material, la diferencia en la concentración del medio y las películas no uniformes formadas por los productos de la corrosión insolubles. La corrosión por picaduras es también un proceso autocatalítico y el mecanismo de desarrollo es virtualmente idéntico al de la corrosión por hendiduras, por lo que Fontana-Greene [op.cit.pag 51] concluyen que en realidad es un caso especial de ésta pero siendo una forma autoiniciada. El periodo de iniciación de la picadura es extenso -meses o años- y surge "...al volverse la razón de disolución del metal momentáneamente alta en un punto en particular debido a una rayadura en la superficie, el surgimiento de una dislocación u otro efecto así como variaciones casuales en la composición de la solución..." [(24) op.cit. pag 52].

El crecimiento de la picadura es generalmente en dirección de la gravedad y requiere también un periodo extenso para perforar el material, frecuentemente el dano subsuperficial es más severo que el indicado por la apariencia de la superficie exterior.

Es difícil evaluar cuantitativamente el dano sufrido por un material puesto que el número de picaduras y/o su extensión no tienen un comportamiento homogéneo en condiciones idénticas, además de no ser uniforme con respecto a la superficie ni su rapidez constante en el tiempo. Y la falla por perforación sólo representa una pequeña pérdida de peso del elemento o estructura.

Aun cuando es viable obtener la profundidad promedio de las picaduras, no es posible estimar el dano, puesto que por lo general la picadura más profunda es la causa de la falla, cuya medición en realidad nunca se lleva a cabo para predecir la vida útil del equipo. debido a que es función del tamaño del elemento. Sin embargo, para fines de comparación de resistencia de los materiales a la corrosión por picaduras puede evaluarse la profundidad máxima de las picaduras.

II.2.4 Corrosión intergranular.

Su desarrollo depende de la estructura metálica, de las condiciones de enriquecimiento o empobrecimiento de algún elemento de aleación o impurezas y de los planos de deslizamiento. Se caracteriza por el ataque restringido al límite de grano que actúa como ánodo con respecto al grano mismo siendo este el cátodo. De lo que se deduce que el desarrollo del proceso es de naturaleza microscópica y no se observan efectos del ataque intenso a simple vista por lo que el elemento falla a consecuencia de la pérdida de cohesión entre los granos.

Son susceptibles las aleaciones en las que exista precipitación preferencial ya sea a través del proceso de soldadura -en la zona de influencia térmica-, el endurecimiento o algún tratamiento térmico.

Se marcan de manera especial los aceros inoxidable austeníticos en donde surge el problema debido al empobrecimiento del cromo en los límites de grano y aleaciones de aluminio que dependen de las fases precipitadas para fortalecerse.

II.2.5 Corrosión galvánica o bimetalica.

Corrosión localizada que se presenta cuando dos metales disimiles estan en contacto e inmersos en una solución conductiva, pudiendo presentarse el contacto galvánico a nivel microscópico por ejemplo entre un grano y su limite.

Los metales y aleaciones han sido clasificados considerando la diferencia de potencial eléctrico que se establece al ponerlos en contacto:

- a). Con un electrodo de referencia cuando se trata de metales puros expuestos a un medio ambiente que contiene sus iones en condiciones estandar en la serie electromotriz -EMF-, figura (2-3).
- b). Con otro metal o aleación de interés en un electrolito comun son clasificados en la serie galvánica -figura (2-4)-, donde se observan grupos en los cuales el potencial generado, cuando estan conectados los materiales de dicho grupo, es minimo.

Por lo que es posible establecer una tendencia a la corrosión de los metales y aleaciones clasificados; cuanto más negativa sea la diferencia de potencial -emf- o la posición relativa sea más distante -serie galvánica-, en el contacto hay un material más activo que sufrirá el daño más severo en un periodo de tiempo más corto.

Dentro del mecanismo de desarrollo los factores particulares más importantes son; la distancia entre la zona de estudio y la zona de unión o empalme considerando la conductividad de la solución y la razón entre las áreas cátodica y anódica.

Figura (2-3)

SERIE	ELECTROMOTRIZ	
		^A E H
LITIO +1	-3.02	
POTASIO +1	-2.92	
CALCIO +1	-2.87	
SODIO +1	-2.71	
MAGNESIO +2	-2.34	
ALUMINIO +3	-1.67	
CINC +2	-0.76	
CROMO +3	-0.71	
HIERRO +2	-0.44	
CADMIO +2	-0.40	
COBALTO +2	-0.28	
NIQUEL +2	-0.25	
ESTANCO +2	-0.14	
PLOMO +2	-0.13	
HIDROGENO +2	0.00	Electrodo de referencia
BISMUTO +3	0.23	
COBRE +2	0.34	
YODO +2	0.53	
MERCURIO +2	0.80	
PLATA +2	0.80	
PALADIO +2	0.98	
BROMO +2	1.08	
PLATINO +2	1.20	
OXIGENO +2	1.23	
CLORO +2	1.36	
ORO +2	1.68	
FLUOR +2	2.87	

Figura (2-4)

S E R I E G A L V A N I C A		Agua de mar
ACTIVO o ANODICO	MAGNESIO	
	ALEACIONES DE MAGNESIO	
	CINCO	
	ACERO GALVANIZADO	
	ALUMINIO 1100 -Puro comercial-	
	CADMIO	
	ALUMINIO 2024 -(4.5Cu, 1.5Mg, 0.6Mn)-	
	ACERO -Suave o ligero-	
	HIERRO FORJADO	
	HIERRO FUNDIDO	
	ACERO INOXIDABLE 410 -Activo {13Cr}-	
	ACERO INOXIDABLE 304 -Activo {18Cr, 8Ni}-	
	SOLDADURA ESTA&O PLOMO	
	PLOMO	
	ESTA&O	
	METAL MUNTZ	
	BRONCE AL MANGANESO	
	LATON NAVAL	
	NIQUEL -Activo-	
	ALEACION {76Ni, 16Cr, 7Fe} -Inconel activo-	
	ALEACION {60Ni, 30Mo, 6Fe, 1Mn} -Hastelloy B-	
	LATON AMARILLO	
	LATON ADMIRALTY	
	LATON ROJO	
COBRE		
BRONCE AL SILICIO		
CUPRONIQUELES {70-90Cu, 30-10Ni}		
ALEACION COBRE NIQUEL {70Cu, 30Ni} -Monel-		
SOLDADURA DE PLATA		
NIQUEL -Pasivo-		
ALEACION {76Ni, 16Cr, 7Fe} -Pasiva-		
ACERO INOXIDABLE 410 -Pasiva {13Cr}-		
TITANIO		
ACERO INOXIDABLE 304 -Pasiva {18Cr, 8Ni}-		
ALEACION {54Ni, 17Mo, 15Cr, 5Fe} -Hastelloy C-		
ALEACION {62Ni, 18Cr, 18Mo} -Clorimet 3-		
PLATA		
NOBLE	GRAFITO	
o	ORO	
CATODICO	PLATINO	

II.2.6 Corrosion selectiva o lixiviación selectiva.

Ataque localizado que se presenta en aleaciones bi o multifasicas caracterizandose por la remoción o deposición de un elemento, por lo general el más activo, de dicha aleación por el proceso de corrosión.

Los elementos como Aluminio, Hierro, Cobalto, Cromo, Cinc, etc. pueden ser removidos de algunos sistemas de aleación denominándose al proceso por algún término metalúrgico diferente, pero todos ellos señalados por la lixiviación.

Se mencionan a continuación algunos sistemas de aleación donde se presenta la corrosión selectiva:

- En el latón (Cu-Zn) la lixiviación del cinc produce una masa de cobre casi puro, débil, porosa y permeable -descincación o descincificación-.
- En la fundición gris (Fe-Cr) ocurre la lixiviación del hierro dejando una red de grafito y herrumbre -grafitización-.
- En bronces al aluminio (Cu-Al-Fe) se da el traslado del aluminio, generalmente en medios acidos -dealuminificación-.

Debido al ataque sobre el elemento más activo D. Florjancic y J. Weber [op.cit. pag.92] lo consideran de algún modo un caso especial de corrosión galvánica donde intervienen la concentración y estructura de la aleación.

II.2.7 Corrosión por hidrógeno.

Daño localizado en el metal causado por la presencia de hidrógeno o interacción con él.

Fontana y Greene señalan cuatro tipos: Burbujas de hidrógeno, Fragilización por hidrógeno, Descarburización y Ataque por hidrógeno.

Las burbujas y fragilización son el resultado de la difusión del hidrógeno atómico dentro de la estructura del metal, originando deformación local o destrucción debido a la formación de hidrógeno molecular en vacíos u otros defectos, en el primer caso y en el segundo ocasionando la interferencia en el deslizamiento de los planos.

La descarburización y el ataque por hidrógeno son procesos a alta temperatura, en donde se considera la interacción del hidrógeno con elementos del medio ambiente para formar distintos compuestos, ya sea provocando la remoción del carbono o reaccionando con un componente de la aleación expuesta.

11.2.8 Corrosión bajo esfuerzo.

Ataque localizado que surge ante la presencia de esfuerzos de tensión y un medio ambiente específico.

La apariencia se caracteriza por una fractura frágil fina en progreso, transgranular o intergranular, única o extremadamente bifurcada y carencia de ataque en la mayor parte de la superficie del elemento.

La magnitud de la tensión está en ocasiones dentro del rango de diseño, señalándose del orden del 10 al 70% del límite de fluencia.

La naturaleza de tales esfuerzos puede ser interna o residual y externa, debida; al enfriamiento desigual, proceso de soldadura, trabajo en frío, productos de la corrosión o aplicación directa.

Los ambientes en los cuales una aleación dada tiende a la fractura son reducidos, generalmente la presencia de oxidantes tiene una influencia pronunciada sobre dicha tendencia.

Es característico que las aleaciones en condiciones de no esfuerzo sean atacadas imperceptiblemente en el medio especificado. Los materiales fundidos en general son menos sensibles a la corrosión bajo esfuerzo que los materiales rolados. En el desarrollo del proceso de corrosión, una picadura, canal u otra discontinuidad actúa como un 'productos de esfuerzos'.

Generalmente la fractura se origina perpendicularmente al esfuerzo aplicado y su amplitud en las primeras etapas es estrecha, pero en las últimas etapas la fractura se ensancha, es decir, ocurre una gran deformación plástica y un cambio grande en extensión, y es entonces cuando puede observarse la evidencia del proceso, es decir, hasta que ha ocurrido el daño.

Cuando los esfuerzos aplicados son de naturaleza cíclica en presencia de un medio corrosivo originando una reducción en la resistencia a la fatiga -de 0.8 a 0.2 del límite normal-, se da lugar a un modo especial de la corrosión bajo esfuerzo, la corrosión por fatiga. Que se caracteriza por mostrar en la sección de la fractura una área grande cubierta por productos de la corrosión y otra pequeña donde se muestran indicios de una fractura frágil -superficie áspera-. Pero no siempre esta apariencia es el resultado de la falla de corrosión por fatiga, puede ser también el resultado de una falla ordinaria de fatiga y corrosión posterior, por lo que sólo puede establecerse la diferencia realizando un ensayo de corrosión por fatiga.

La falla de corrosión por fatiga es usualmente transgranular -como ya se sugirió al señalar la fractura como frágil- y no muestra la bifurcación característica de las fracturas de corrosión bajo esfuerzo de otro tipo.

Contrariamente a la corrosión bajo esfuerzo una gran variedad de medios agresivos ocasionan la corrosión por fatiga, siendo más pronunciada a bajas frecuencias de esfuerzo donde existe un mayor contacto entre el medio ambiente y material.

II.2.9 Corrosion erosion.

Es un proceso que combina los efectos de la corrosión y del desgaste mecánico, originando la aceleración o incremento en la razón de deterioro sobre el material por el movimiento relativo entre el líquido y la superficie del mismo.

La apariencia está caracterizada por estrias, canales, valles, ondas y orificios redondeados, exhibiendo generalmente un patrón direccional.

Practicamente todos los metales y aleaciones son susceptibles al daño por corrosión-erosión, particularmente los que desarrollan una película superficial o los de naturaleza suave.

Generalmente los materiales bajo condiciones de estancamiento no muestran un deterioro apreciable pero cuando son expuestos a un ambiente móvil la razón de deterioro se va incrementando conforme aumenta la velocidad del medio, hasta alcanzar un punto crítico en el que el ataque se manifiesta muy rápidamente.

Por lo que, es indispensable considerar la remoción del metal, sus iones disueltos, formación de películas superficiales, formas sólidas de productos de la corrosión o sólidos en suspensión, además de los fenómenos de turbulencia y choque.

Teniendo particular interés en el campo de las turbomáquinas el fenómeno de cavitación, que da lugar a ondas de choque con presiones tan altas como 408 Mpa [(24) op.cit.pag.84], que pueden llegar a producir deformación plástica sin mencionar la destrucción de películas superficiales o el desprendimiento de partículas del metal con tan sólo una burbuja de cavitación.

II.3 EL AMBIENTE CORROSIVO Y LOS FACTORES NOCIVOS MAS IMPORTANTES

En el desarrollo de la corrosión interactúan las propiedades del material, interfase y medio ambiente, marcando la susceptibilidad y forma del daño. Es decir, intervienen la composición e historia metalúrgica del material de construcción, la naturaleza de las películas protectoras y productos de la corrosión, composición del medio ambiente, temperatura, presión, velocidad, esfuerzos, contactos galvánicos y efectos de turbulencia choque y cavitación.

De los factores antes citados a partir de la temperatura los agruparemos bajo el término de efectos nocivos, siendo el medio ambiente a tratar el fluido de los procesos ya mencionados en las aplicaciones que se considerarán en la investigación, -I.5-.

II.3.1 Fluidos acuosos.

Para poder englobar bajo un sólo aspecto algunos de los fluidos que se manejarán a lo largo de la investigación se empleo el término 'fluido acuoso', con el que se denomina a aquéllos cuyo componente principal es el agua y de los cuales a continuación se mencionan sus características más importantes.

Para su empleo es necesario llevar a cabo un análisis que determine las sustancias minerales disueltas, gases disueltos, materia orgánica y microorganismos, que determinan características de turbidez, sedimentos, color, olor, sabor, etc. y algunas propiedades que se requieren conocer para propósitos de bombeo, tales como: contenido de oxígeno, pH - índice del contenido de hidrógeno, sustancias corrosivas e impurezas sólidas y/o gaseosas.

El oxígeno disuelto en el agua da lugar al proceso de corrosión debido a que es un elemento extremadamente activo que se combina con un sinfín de materiales.

Cuando dos puntos de la superficie metálica difieren en la concentración de oxígeno, las superficies en contacto con la solución de menor concentración tendrán un comportamiento anódico respecto a aquellas en contacto con solución de mayor concentración, originando corrosión acelerada en la superficie de comportamiento anódico.

Las diferencias de concentración de oxígeno se ven favorecidas principalmente por las grietas o hendiduras y en grado menor por los gradientes de velocidad. Los metales y aleaciones activos -serie electromotriz y galvánica- tienen una mayor tendencia a sufrir de corrosión por celdas de concentración de oxígeno.

El índice del contenido de iones hidrógeno 'pH' marca el comportamiento del líquido, siendo un medio ácido [pH<7], neutro [pH=7] o alcalino [pH>7], es decir como: $\text{pH} = \log \{H^+\}$, cuanto mayor sea la concentración de iones hidrógeno $\{H^+\}$ el valor del pH es menor. Esto implica que las propiedades de acidez las dan los iones de hidrógeno $\{H^+\}$ y las de alcalinidad los iones oxhidrilo $\{OH^-\}$. El agua puede comportarse como un ácido o una base:



Entre otros los iones hidrógeno estimulan la disolución del material, aceleran la velocidad de corrosión por oxígeno disuelto y bióxido de carbono.

Otras sustancias que promueven la disolución son listadas a continuación, siendo las primeras las de mayor tendencia:

- Iones de cloro o cloruro [+]
- Iones de haluro
- Bromuros
- Hipocloritos
- Fluoruros
- Yoduros [-]

En el agua las sustancias minerales disueltas generalmente son: calcio y magnesio -que determinan la dureza-, sales de sodio, sílice, hierro, aluminio, fluor y gases disueltos, tales como: nitrógeno (N₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y metano (CH₄).

II.3.1.1 Agua de alimentación a calderas.

El agua generalmente proviene de fuentes naturales de superficie, pozos profundos o del sistema de distribución municipal. Requiriendo para su uso de un acondicionamiento especial que se ve marcado por la presión de operación de la caldera, cuyo valor podemos localizarlo entre los siguientes rangos de operación: Baja: 6-10, Media: 12-18, Alta: 24-36 y Muy alta: 42-50 MPa.

El agua de alimentación a calderas al ser bombeada debe tener una temperatura elevada (60 - 370 °C) y deben obtenerse presiones mayores a la de la caldera -entre 15 y 25% más-.

A continuación se listan las operaciones necesarias para el uso del líquido, la ejecución de todas ellas es necesaria para calderas de muy alta presión, no siendo así con las de baja presión, en donde sólo se lleva a cabo la primera acción.

* OPERACION	* TIPO CALDERA
1. Remover dureza	B M A MA
2. Remoción completa de los gases disueltos	M A MA
3. Reducción de la alcalinidad y sólidos totales	M A MA
4. Reducción en el contenido de sílice	A MA
5. Remoción completa de todas las impurezas	MA

El acondicionamiento del agua para caldera es en extremo importante para el buen funcionamiento del generador de vapor evitando depósitos no adherentes -lodos-, depósitos adherentes -incrustaciones- y corrosión que originan fallas y reducen la eficiencia en dicho equipo que excede en mucho el costo de la unidad de bombeo.

II.3.1.2 Aguas negras.

Son el resultado de líquidos y desechos arrastrados por el agua procedentes de la industria, comercios, instituciones y el hogar, además de la que pueda agregarse por precipitaciones pluviales y aguas subterráneas.

En nuestro país las aguas negras procedentes del sistema de alcantarillado generalmente se descargan en corrientes naturales originando los consabidos problemas de contaminación.

El agua negra se considera como un líquido turbio que contiene material sólido en suspensión o en solución y que de acuerdo al estado y aspecto que presentan se clasifican como; frescas, sépticas y estabilizadas. Las primeras poseen un color gris y un olor a moho no desagradable cuyos sólidos en suspensión se identifican fácilmente.

El agua negra septica tiene un color negro, olor desagradable, y los sólidos aparecen como objetos negros no identificables a simple vista. El agua negra estabilizada tiene un olor ligero o nulo con pocos sólidos en suspensión relativamente inertes que están sujetos a una descomposición posterior muy lenta o prácticamente nula.

Además de los sólidos ya sean orgánicos o inorgánicos, el agua negra contiene gases disueltos, tales como, el oxígeno, bióxido de carbono, nitrógeno y ácido sulfhídrico entre los más importantes. Así como organismos vivos tales como, bacterias, virus, otros organismos animales y vegetales, distintas variedades de insectos y gusanos.

Para evitar un grado de contaminación mayor y que en cierta medida puedan emplearse nuevamente, las aguas negras son sujetas a distintas transformaciones como las que se enumeran a continuación:

1. Lagunas de estabilización, donde los procesos que se llevan a cabo son de autopurificación biológicos, químicos y físicos.
2. Tratamiento primario, que remueve materias gruesas flotantes y en suspensión, grasas, aceites y materias sedimentables.
3. Tratamiento secundario, que remueve y estabiliza materia por dispersión, filtración y mediante contacto con organismos vivos.
4. Procesos complementarios, tales como el acondicionamiento para uso posterior de la materia sedimentada conocida comúnmente como lodos.

En el desarrollo de la investigación se consideraran las aguas negras septicas, manejando la unidad de bombeo el agua negra cruda y agua acondicionada para riego.

El agua negra cruda ha pasado por la laguna de estabilización y sometida a un proceso de cribado burdo a través de rejillas -parte de el tratamiento primario-. removiendo sólo sólidos grandes en suspensión.

El agua acondicionada para riego pasa además a través de un tanque de sedimentación primaria, filtros rociadores y un tanque de sedimentación secundaria.

II.3.1.3 Pasta para la producción de cartón y papel.

Hoy en día el uso del papel ha llegado a adquirir tal importancia que por su consumo se ha llegado a clasificar el grado de civilización de las diversas naciones. En nuestro país la industria papelera crece a un ritmo acelerado en virtud del incremento en la demanda de artículos desechables, además de los requerimientos de la industria editorial, tabaquera, etc.

Los tipos de materia prima que se emplean van de acuerdo al tipo de papel o cartón que se desea producir, en la presente investigación se considerará la producción de cartón corrugado, papel kraft, cartoncillo y papel para escritura e impresión. Por lo que la materia prima empleada incluye:

- Madera
- Pasta de cana
- Pasta de recortes de papel y cartón
- Pasta morena

Además de la adición de productos químicos tales como: encolantes -entre otros la cola de resina-, sulfatos -de alumina y de bario-, caolin, talco y yeso. Estos últimos cuatro proporcionando características al producto final, tales como; aumento de peso, carácter opaco, blancura, etc.

A grandes rasgos los procesos que se emplean en la producción de cartón y papel incluyen los siguientes puntos:

1. Selección y preparación -limpieza y desmenuzado- de la materia prima.
2. Proceso de refinación a través de un sistema desfibrador (hidrapulper).
3. Depuración, encolado, adición de productos químicos, adición de color o blanqueo.
4. Fabricación de papel que incluye la formación en telas metálicas o fieltros, el paso a través de prensas húmedas y secadores.
5. Acabado del papel que abarca la disminución de la rugosidad (alisado), procesos de satinado, recubrimientos especiales, corte, etc. que varían de acuerdo con el producto final deseado.

El servicio de bombeo que se tratará a lo largo de la presente investigación es el manejo de pasta, después de haber sido desfibrada y haber sido sometida a una depuración gruesa y cuando es alimentada a la máquina de fabricación de papel.

II.3.1.4 Salmuera.

El servicio de bombeo que se investigará esta incluido en el proceso de producción de carbonato de sodio, donde el fluido manejado será la salmuera, que se define como una solución acuosa que contiene como sales alcalinas principales el cloruro de sodio, el carbonato de sodio y el bicarbonato de sodio, estando presentes en menor proporción las sales de calcio y de magnesio, todas ellas en solución.

Descrito a grandes rasgos el proceso de obtención del carbonato de sodio incluye los siguientes puntos:

1. Extracción del fluido del campo de explotación.
2. Evaporación natural mediante la energía solar.
3. Pre calentamiento del fluido empleándolo como líquido de enfriamiento.
4. Evaporación forzada mediante vapor de agua, llevándose a cabo la transformación química de carbonato de sodio a bicarbonato de sodio.
5. Cristalización del bicarbonato de sodio.
6. Separación del material en estado sólido.
7. Filtración.
8. Transformación del bicarbonato de sodio a carbonato de sodio gris en hornos rotatorios empleando vapor de agua.
9. Calcinación de la materia orgánica obteniendo carbonato de sodio blanco.
10. Enfriamiento del producto elaborado.
11. Reducción de la emisión de material al medio ambiente.
12. Separación final en función del tamaño del producto.

El servicio de bombeo esta incluido en la evaporación forzada, localizandose en el ultimo paso de esta, manejando salmuera con una concentración cercana al 16.5% de Alkali total y una temperatura de 70°C.

II.3.1.5 Agua clorada.

Los efectos de la adición de cloro al agua son esterilizantes y oxidantes, los primeros corresponden a acciones sobre microorganismos, bacterias patógenas y no patógenas, algas, lamas, hongos y bacterias del hierro y manganeso. Los efectos oxidantes se observan sobre materia orgánica, color, bicarbonato ferroso, coagulante ferroso o pequeños residuos de sulfuro de hidrógeno.

El cloro es un agente oxidante fuerte, es decir, un elemento reductor que obtiene una ganancia de electrones, por lo que generalmente actúa como catodo en una celda galvánica.

Las aplicaciones que se considerarán incluyen los dos propósitos de la adición, la acción como esterilizante se tiene en el manejo de agua de alberca y la oxidación en el blanqueo de pasta para la producción de papel -punto II.3.1.3-.

II.3.1.6 Líquido colorante.

Se considerará el servicio de bombeo dentro de la industria textil, donde se emplea un fluido compuesto de agua y productos químicos que proporcionan color al producto elaborado -terciopelo-.

A grandes rasgos el proceso de fabricación incluye los siguientes pasos: Tejido, Eliminación de la goma o 'descruce', Tintorería y Acabado final.

Dentro de la tintorería se lleva a cabo la coloración de la tela, que puede realizarse por medio de dispositivos rociadores que la impregnan del líquido colorante para después pasar a través de rodillos que eliminan los excesos del mismo.

El líquido colorante, que posee pequeños sólidos en suspensión y varía su temperatura entre los 20 y 130°C, es recirculado por la unidad de bombeo.

II.3.2 Fluidos no acuosos.

La desiganción de fluidos no acuosos se realiza para aquellos cuyo componente principal no es el agua, considerando los residuos de petróleo crudo y un producto químico para protección de los cultivos agrícolas, cuyas características principales se describen a continuación.

II.3.2.1 Residuos de petróleo crudo.

De los procesos a los que se somete el petróleo crudo la refinación es uno químico y físico que permite obtener por destilación los diversos hidrocarburos o las familias de hidrocarburos con propiedades físicas y químicas bien definidas. A cuyos derivados se aplican procesos de conversión para obtener productos más valiosos.

El petróleo crudo está formado por una serie de hidrocarburos que comprenden desde el gas licuado hasta el asfalto. Donde los residuos se obtienen después de un proceso de destilación y desintegración, su separación en columnas de destilación se logra aprovechando las diferencias de volatilidad que tienen unos y otros.

El proceso implica suministro de calor para elevar la temperatura y condensación a diferentes temperaturas para obtener distintos condensados.

El residuo de la destilación del petróleo crudo se somete a una nueva destilación al alto vacío para separar componentes menos volátiles, que de acuerdo a las propiedades del petróleo crudo de que se trate serán destinados a lubricantes o a ser desintegrados catalíticamente.

El residuo de la destilación al vacío es asfalto, o bien cargas para la planta de coque o para la hidrodesintegradora de residuales y la subsecuente obtención de destilados.

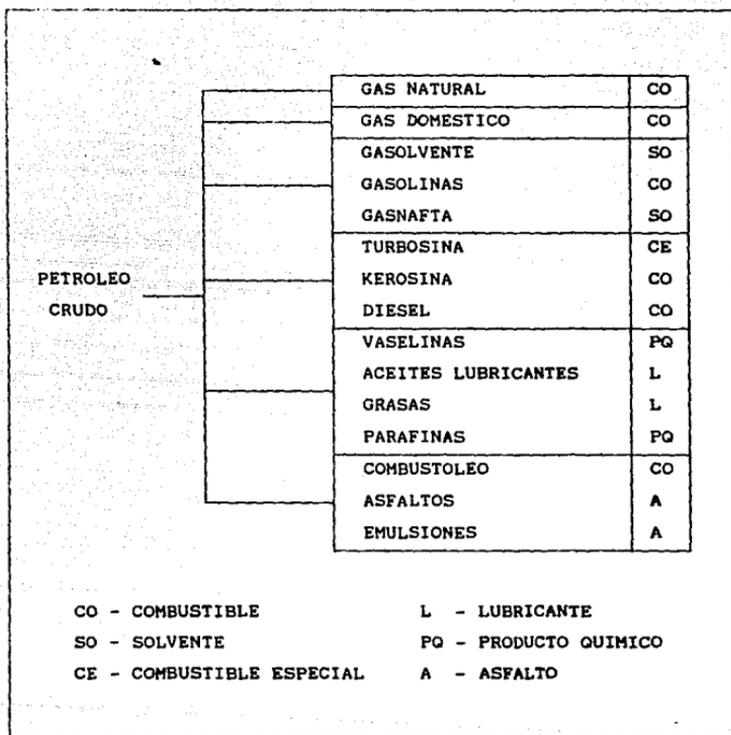
Los destilados al vacío que se destinan a lubricantes se someten a una serie de procesos especiales, donde al final se obtiene de ellos lubricantes básicos que con diferentes aditivos forman los lubricantes que existen en el mercado.

Los destilados al vacío que por sus características no se dedican a lubricantes se desintegran catalíticamente para convertirlos en productos comerciales, como; gas licuado, gasolinas de alto índice de octano y combustible diesel.

El fluido que se manejará en la presente investigación es residuo de los separadores al alto vacío, cuyo fin es la producción de combustóleo.

En la figura (2-5) puede observarse de manera general los productos obtenidos del petróleo crudo.

Figura (2-5)



II.3.2.2 Producto químico para protección agrícola.

El desarrollo de sustancias químicas a base de cobre que proporcionen protección a los cultivos agrícolas se inició desde el siglo pasado, elaborándose actualmente compuestos fijos o insolubles del cobre que actúan como antibióticos, fungicidas, bactericidas, algicidas y microplasmicidas, obteniéndose como polvos humectables o cristales solubles en agua.

El proceso de fabricación de estos compuestos puede citarse brevemente en los siguientes puntos:

1. Selección de la materia prima.
2. Mezcla de la materia en tanques de reacción química.
3. Sedimentación de los sólidos del compuesto obtenido.
4. Recolección del sedimento.
5. Empaque del producto final.

El servicio de bombeo manejará los productos de la reacción para conducirlos al proceso de sedimentación.

II.3.3 Factores nocivos.

Son características del medio ambiente a tratar, es decir del bombeo de un líquido tal como el agua, pero que influyen en forma definitiva en el desarrollo del proceso de corrosión. A continuación se citan los efectos a que dan lugar.

- Temperatura y presión.

El incremento de la temperatura influye en el comportamiento químico del material -sección I.3.1-, acelerando las reacciones de corrosión factibles, provocando el daño o haciéndolo más severo en menor tiempo de exposición.

Pero dicho incremento, también puede compensar la difusión acelerada por el cambio en la solubilidad del oxígeno.

La presión determina la solubilidad de los gases, conforme la primera aumenta la segunda lo hace también proporcionalmente, en nuestro caso es de suma importancia la solubilidad del aire por la cantidad de oxígeno disuelto en el medio.

- Velocidad.

Es un factor inherente a la operación de bombeo y de vital importancia en el desarrollo de la corrosión. La intensidad del ataque varía severamente de un ambiente estático a uno móvil, por lo que puede presentarse en materiales que son completamente resistentes a un ambiente específico en reposo o a bajas velocidades.

Al incrementar la velocidad surgen efectos de desgaste mecánico, siendo más pronunciados cuando existen sólidos en suspensión. lo que en cierto momento evita la deposición de sales o suciedad sobre la superficie.

Pero también se ven fomentadas las celdas de concentración de iones metálicos, donde el material en contacto con la solución de menor concentración actúa como ánodo respecto de aquella en contacto con una concentración mayor. Además inhibe la polarización de concentración, es decir, aquel retardo de la reacción electroquímica por cambios en la concentración de la especie activa -iones de hidrógeno (H⁺)-, donde cualquier incremento en la velocidad de difusión de dicha especie aumenta la velocidad de corrosión.

El efecto de la velocidad y temperatura puede observarse en la figura (2-6), donde se especifica el material y líquido manejado.

- Esfuerzos y contactos galvánicos.

La presencia de esfuerzos -residuales o aplicados- modifica el comportamiento de la resistencia a la corrosión de los materiales, por lo que es necesario considerar la relación material-esfuerzo más medio ambiente, para efectuar una aplicación adecuada de los materiales.

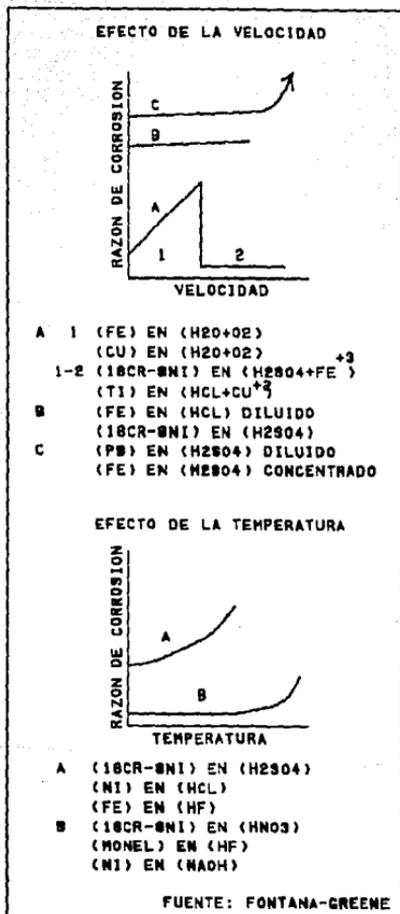
La presencia de esfuerzos de tensión ya sean cíclicos o no, origina sólo corrosión bajo esfuerzo; cuando se trata de esfuerzos de compresión el tipo de corrosión es señalado por la morfología del ataque, por ejemplo corrosión intergranular.

En cuanto al contacto o unión entre metales disímiles es importante conocer su comportamiento en un sistema fluyente, puesto que a menudo si el efecto galvánico es nulo en condiciones estáticas, surge o se incrementa cuando existe movimiento.

- Turbulencia, choque y cavitación.

No sólo favorecen el desarrollo de la corrosión sino también son efectos nocivos para el funcionamiento adecuado de la bomba. Su presencia se conjuga en la operación de bombeo, originando un contacto más íntimo entre el metal y medio ambiente, destruyendo películas superficiales, desprendiendo partículas del material o llegando a producir deformación plástica del material, sin mencionar el ruido, vibración y efectos sobre las características de operación.

Figura (2-6)



- Sólidos en suspensión.

Ejercen una influencia negativa en la operación de bombeo dando lugar a efectos de abrasión -por arranque, por esmerilado y por erosión-: impacto alto, moderado y bajo; esfuerzos por fatiga; cargas de choque y corrosión, que en general producen una disminución de las propiedades mecánicas.

El efecto que producen los sólidos en suspensión va íntimamente ligado al efecto de la velocidad, que siempre incrementará el daño producido.

Es necesario considerar también la historia metalúrgica del material de construcción, para estimar los factores que influyen en forma negativa en la resistencia a la corrosión que presente dicho material ante el medio. Aún cuando las fallas por corrosión en su mayor parte son debidas a los factores ambientales, el ingeniero debe exponer la situación problemática al fabricante para que en un momento dado se tomen las medidas correctivas adecuadas si el daño es debido al proceso de fabricación.

Entre los factores metalúrgicos que reducen la resistencia a la corrosión se encuentra la influencia que ejerce la presencia de defectos puntuales y dislocaciones. Las inhomogeneidades en los granos y estructura resultado de la excesiva deformación, así como los efectos de transformación de fase, precipitación preferencial y presencia de esfuerzos residuales debido al proceso de soldadura.

II.4 CUANTIFICACION DE LA CORROSION

Uno de los aspectos más importantes en el estudio de la corrosión trata sobre la evaluación de los daños y la velocidad con que estos se desarrollan. Los autores consultados consideran que la información que se ha obtenido sobre las velocidades de corrosión y los mecanismos de desarrollo aún no proporciona datos útiles para emplearse en el diseño, pero se han cubierto en forma aceptable los siguientes objetivos:

- Evaluación y selección de materiales para un ambiente específico o una aplicación definida.
- Evaluación de los metales y aleaciones para determinar los ambientes en los cuales es adecuado su empleo.
- Control de la resistencia a la corrosión de materiales o corrosividad del medio ambiente.
- Estudio de los mecanismos de corrosión.

La evaluación de las pérdidas por corrosión se ha realizado a través de pruebas experimentales en laboratorio, en plantas piloto, en plantas o servicios actuales y en campo, efectuándolas siempre en función del tiempo y tratando en lo posible de abarcar la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso.

Las pruebas de laboratorio proporcionan una base para determinar los materiales que garanticen investigaciones adicionales, proporcionando además información confiable en cuanto a la susceptibilidad del material en el medio evaluado.

Las pruebas en plantas piloto son generalmente las mejores y más deseables puesto que aseguran buenos resultados al permitir la evaluación del equipo desde el punto de vista de la corrosión.

Pero es necesario registrar cuidadosamente la información obtenida puesto que en ocasiones las condiciones de operación pueden variar ampliamente procurando obtener un punto óptimo de operación. Las pruebas en el servicio específico o en campo, siempre que sea posible efectuarlas, permiten la evaluación de materiales y el estudio del comportamiento de la corrosión en los ya existentes, así como cuando las condiciones del proceso cambian.

II.4.1 Métodos de evaluación.

En función del tipo de corrosión que se presente se designan las pruebas experimentales adecuadas, cuyo desarrollo comprende la preparación de las muestras o probetas, técnicas de exposición, duración de la prueba, limpieza de las muestras después de la exposición y elaboración de la curva de corrosión en función del tiempo. Si el lector desea documentarse más puede consultar la bibliografía de Fontana-Greene, F. Todt y H. Uhlig.

La observación visual del daño es el primer paso para la evaluación, estableciendo si la corrosión transcurre sin formación de productos sólidos, la forma y cantidad en que los productos de la corrosión se han depositado sobre la superficie y el reconocimiento de defectos superficiales, especialmente grietas.

Cuando la corrosión es de carácter general o uniforme la prueba tradicional es la evaluación de la pérdida de peso en la muestra, expresándose dicha pérdida por unidad de superficie y por unidad de tiempo.

También se emplea la evaluación de los cambios de concentración que se producen en el medio, así como el volumen absorbido de oxígeno o de hidrógeno desprendido en el curso de la reacción de corrosión, cuya ventaja es el seguimiento del proceso sin perturbar la muestra. Pero no proporcionan indicaciones de la localización del ataque y son en esencia métodos análogos al de pérdida de peso.

Cuando el ataque es de carácter local se recomienda la evaluación de propiedades mecánicas tales como la resistencia a la tensión, flexión, tenacidad, mediciones de la variación de alguna propiedad física de la fase metálica como los cambios en la conductividad eléctrica, reflectividad de la luz y brillo, además de un ensayo metalográfico, empleado probetas donde la razón entre la superficie y el volumen sea grande porque en ellas la variación de las propiedades es mayor.

Hay algunos métodos específicos para un ataque particular, tal como el desarrollo de picaduras. Donde se realiza una medición de la profundidad de las picaduras registrando la frecuencia con que se presentan, el número de picaduras por unidad de área y la pérdida de peso. Obteniendo después el 'factor de picadura' -razón entre la picadura más profunda y la profundidad media-, que nos permitirá conocer la tendencia del medio ambiente a producir un ataque por picaduras o general.

II.4.2 Velocidad del proceso de corrosión.

Al estudiar el fenómeno de corrosión es necesario considerar su desarrollo en función del tiempo para obtener información confiable y lograr una evaluación verídica.

Generalmente se presentan tres tipos de relación corrosión-tiempo considerando el material, medio ambiente y productos del proceso. A continuación se describen brevemente dichas relaciones que pueden observarse gráficamente en la figura (2-7).

- a. El caso más sencillo se presenta cuando la superficie expuesta del material y la concentración de los reactivos no cambian en el transcurso de la exposición y los productos de la corrosión no afectan la rapidez del proceso por lo que la reacción es lineal en función del tiempo.

La ecuación que representa dicho comportamiento esta expresada por:

$$dY/dt = k$$

$$Y = k t + c$$

Y ; Cantidad de material atacado en el tiempo t por unidad de superficie.

k ; Constante que depende de la rapidez con la que pueden llevarse los productos a la superficie y por lo tanto es función de la concentración, temperatura y factores mecánicos -agitación- que afectan la rapidez de difusión.

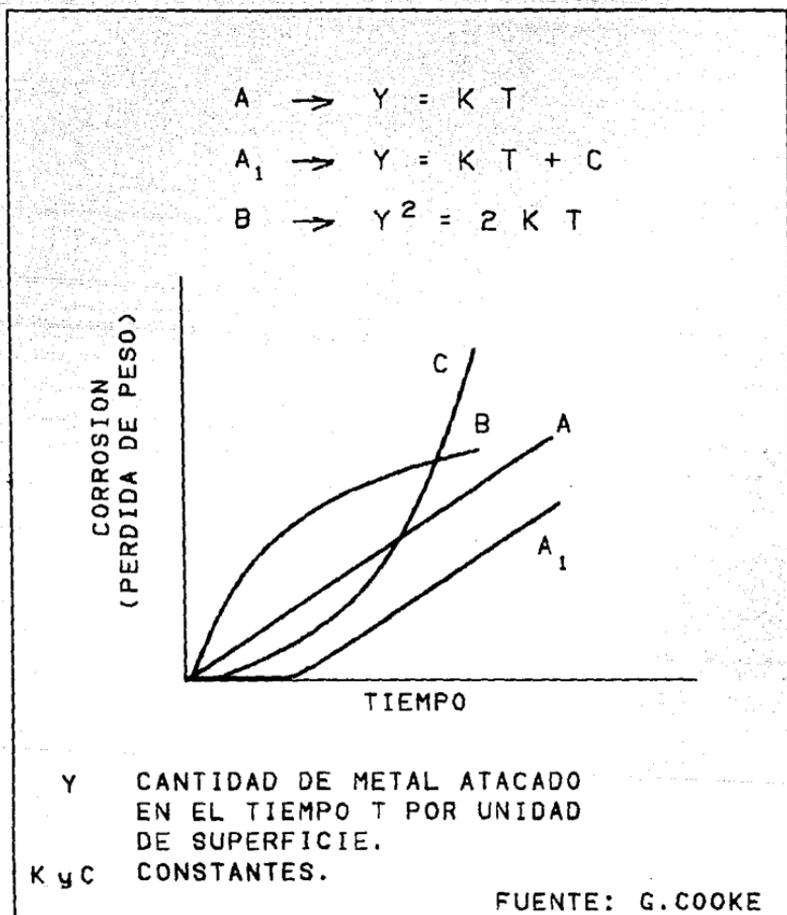
c ; Constante que indica el retardo en el contacto entre medio ambiente y el material. debido por ejemplo a la formación de películas superficiales.

- b. Cuando los productos de la corrosión obstruyen el paso de iones hacia la superficie del metal, la rapidez de corrosión es inversamente proporcional a la cantidad de metal dañado, es decir:

$$dY/dt = k/Y$$

$$Y = \sqrt{2 k t + c}$$

Figura (2-7)



En este caso la rapidez disminuye con el tiempo pero permanece siempre finita. Esta relación corrosión-tiempo probablemente representa en su parte asintota la formación progresiva de una película impermeable de los productos de la corrosión.

- c. Cuando la rapidez aumenta con el tiempo debido a la formación de productos de la corrosión solubles, lo que da lugar al contacto continuo entre el medio ambiente y material.

Prácticamente el desarrollo de la corrosión en función del tiempo es pocas veces lineal, por lo que dar un valor único de la rapidez de corrosión sin hacer referencia a la curva tiene un significado muy limitado.

II.4.2.1 En función de la concentración de reactivos y productos.

Como sabemos el proceso de corrosión puede representarse por dos tipos de reacción una de oxidación con pérdida de electrones y otra de reducción con ganancia de los mismos.

La cinética química trata del estudio de las velocidades de las reacciones químicas y de los mecanismos por las que se producen.

Los reactivos y los productos guardan un estado fundamental de energía -forma de energía potencial- y el paso de unos a otros se ve marcado como un estado intermedio de corta duración y elevada energía, llamado estado de transición. La energía necesaria para obtener ese estado de transición se denomina energía de activación y se obtiene del entorno al sistema. Al proseguir la reacción, hay una liberación de energía del sistema al entorno que incluye la energía de activación y la diferencia de energía entre los estados fundamentales de reactivos y productos es considerada como la energía neta cedida.

Una representación gráfica de la relación entre la energía de la reacción y el progreso de la misma se observa en la figura (2-8).

"...La velocidad de una reacción es la variación de la concentración de un producto o reactivo por unidad de tiempo..." [(66) op.cit.pag.379] y es función de la energía de activación que se origina al ocurrir la transformación de reactivos en productos.

Si representamos gráficamente el cambio de concentración de los reactivos y productos de la reacción con respecto al tiempo, la pendiente de la tangente a la curva en un tiempo 't' es la velocidad de la reacción a ese tiempo, lo cual puede observarse en la figura (2-9).

II.4.2.2 En función de la energía eléctrica liberada.

En la reacción de disolución -oxidación- hay un flujo de electrones generados que es igual al que se consume en la reacción de reducción, denominándose 'densidad de corriente de intercambio'. Que es una característica del material en equilibrio y su magnitud refleja la facilidad que posee esta interfase material-medio ambiente para ceder y aceptar electrones.

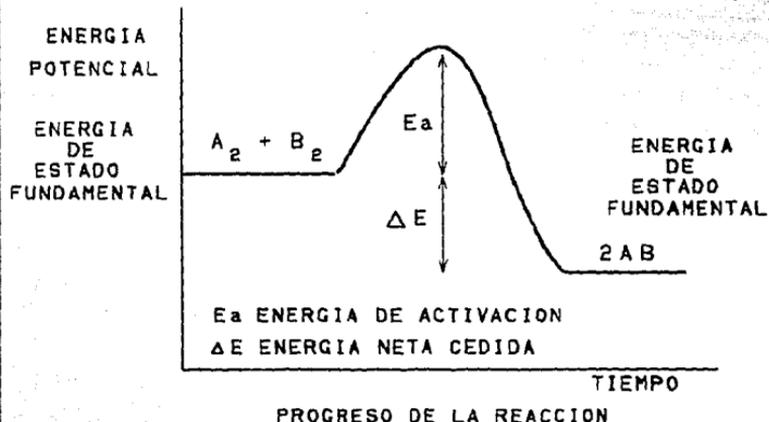
Cuando un material se encuentra en una disolución de sus propios iones, ocurren reacciones de oxidación y reducción donde la carga transferida es de igual magnitud pero de sentido contrario, es decir, hay oxidación del material pero de manera simultánea ocurre la reducción del mismo, por lo que se dice que el sistema está en equilibrio dinámico, al que le corresponde un valor de potencial denominado potencial de equilibrio.

Figura (2-8)

RELACION ENTRE EL PROGRESO DE LA REACCION Y LA VARIACION DE ENERGIA.

REACTIVOS

PRODUCTOS



FUENTE: WHITTEN-GAILEY

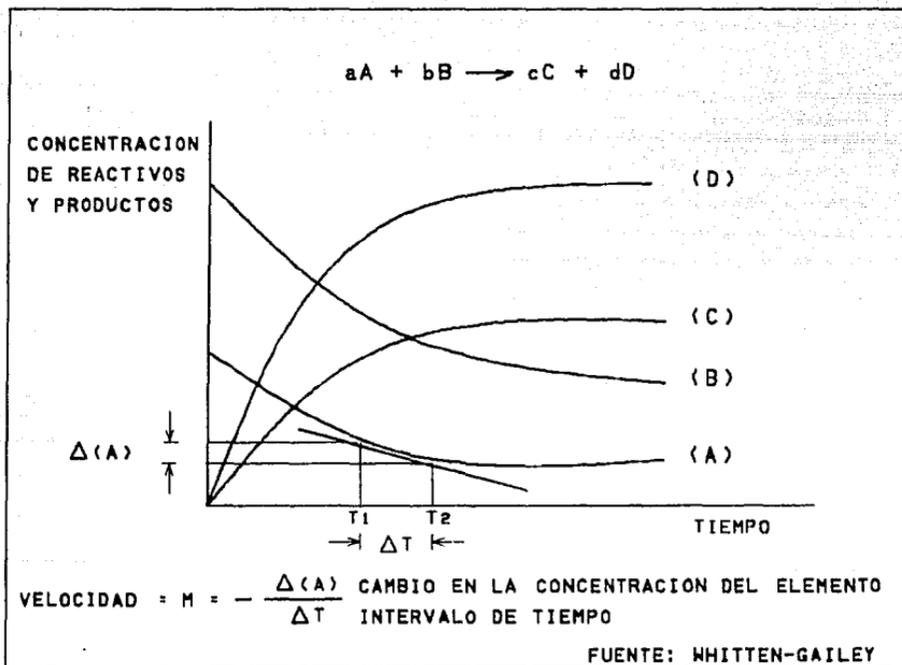


FIGURA (2-9)

Cuando hay un desplazamiento de dicho potencial hacia otro valor por medio de un flujo de corriente eléctrica, la reacción se torna anódica o catódica en función del sentido de la desviación y se denomina al proceso polarización. Dicho flujo de corriente es la diferencia entre las densidades de corriente de intercambio anódica y catódica, que gráficamente contra la desviación del potencial de equilibrio -sobrepotencial-, nos muestra un comportamiento lineal, que puede observarse en la figura (2-10), a dicha relación se le llama relación de Tafel.

Para propósitos de estudio la relación de Tafel se gráfica abatiendo el tercero y cuarto cuadrante obteniéndose una gráfica denominada diagrama de Evans mostrada en la figura (2-11), donde se observa el potencial de equilibrio de dos sistemas y un potencial común de desviación denominado 'potencial de corrosión' y el correspondiente flujo de corriente

La relación entre dicha corriente y la cantidad de material dañado la establece la ley de Faraday a través de la expresión:

$$W = I t P / 96500 e$$

W ; Peso de material oxidado en un ánodo o reducido en un cátodo (gr).

I ; Flujo de corriente eléctrica (A).

t ; Tiempo (seg).

P ; Peso equivalente molecular de una mol de sustancia oxidada o reducida (gr).

e ; Número de electrones cedidos o ganados.

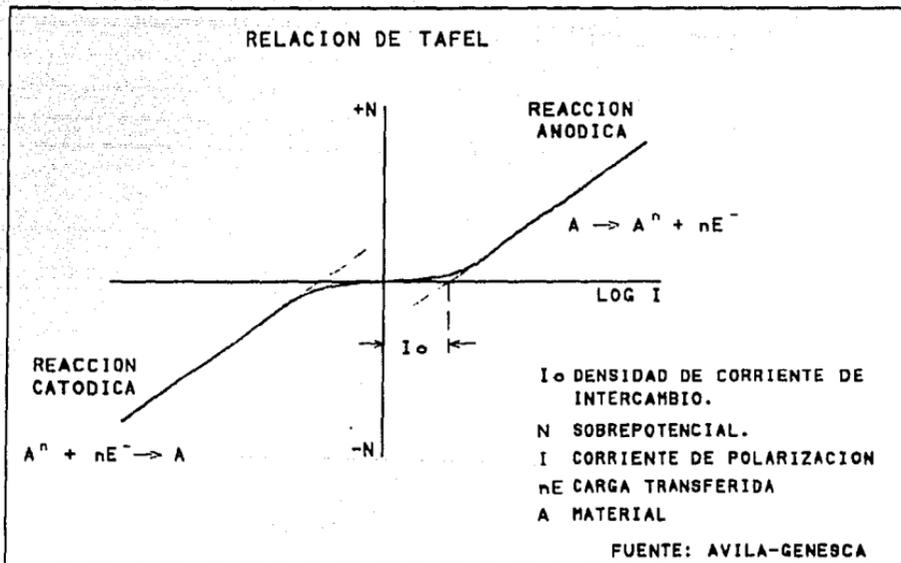
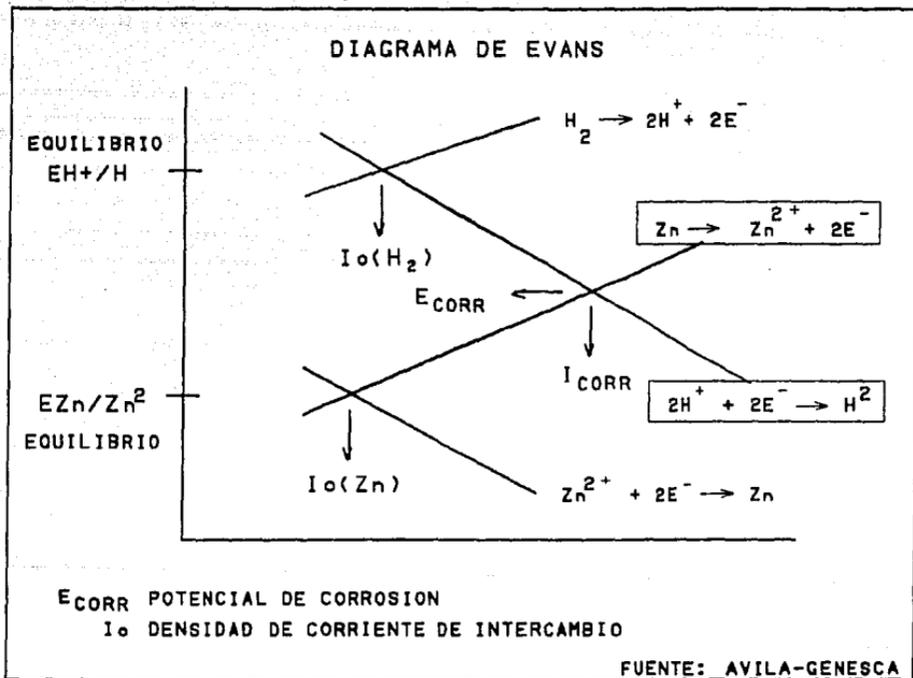


Figura (2-10)



II.5 CORROSION EN LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LAS BOMBAS CENTRIFUGAS

Como ya se menciono, al definir las clases basicas de corrosión, prácticamente todas las formas de corrosión pueden presentarse en la operacion de bombeo. A continuación se presenta una posible relación entre los tipos de corrosión y los elementos en los que pueden presentarse.

Podemos considerar como corrosión uniforme el daño que presentan las superficies internas de la caja de la bomba -parte de la carcasa-, principalmente las que se localizan en un plano normal al eje de rotación.

La corrosión por hendiduras puede presentarse en la zona de descarga donde se localiza la lengüeta, en la corona directriz y zona del diafragma -todas partes de la carcasa-, en la zona de unión entre álabes y placas laterales, en la zona de holgura entre el impulsor y anillos de desgaste, en la zona de ajuste entre el empaque o sello mecánico y el eje de rotación; siempre que la unidad este fuera de operación por periodos extensos, puesto que, como ya sabemos, dentro de las cavidades o hendiduras el líquido debe permanecer estancado. En las mismas condiciones puede presentarse el daño por picaduras pues a menudo la velocidad o su incremento decrece el ataque. Los mismos tipos de daño pueden presentarse en roscas, superficies bajo pernos y remaches y partes externas de la unidad que por fugas o efectos del medio ambiente externo puedan mantener estancado un líquido.

El ataque por corrosión intergranular se presentara en la zonas sometidas a procesos de soldadura, tal como partes de la carcasa que se hayan reparado o las partes extremas de los alabes que se hayan restaurado. Se presenta tambien cuando se emplean los aceros inoxidables austeniticos para la construcción de la carcasa y del impulsor.

Uno de los ataques que podrian presentarse con mas frecuencia es el debido a la formación de una celda galvánica empleando materiales cuya posición en la serie galvánica sea alejada, principalmente al realizar el cambio de material en impulsores, ejes y anillos de desgaste. Tambien puede presentarse la lixiviación selectiva, considerandola como un modo especial de corrosión galvánica, donde uno de los casos frecuentes es la lixiviación del hierro en la fundición gris, material de amplia aplicación en la construcción de unidades de bombeo.

Debido al trabajo que realiza el eje de la unidad, sometido a esfuerzos ciclicos y exposición continua al liquido de bombeo, puede presentarse en él una falla de fatiga por corrosión. Asi tambien en el impulsor que esta sometido al empuje radial producto de las presiones no uniformes y esfuerzos de torsión al iniciar la operación.

Podemos considerar que el tipo de corrosión característico en la unidad de bombeo es la corrosión erosión en las partes en contacto con el liquido en movimiento tales como impulsor, carcasa, eje, anillos de desgaste, etc., siendo más crítico cuando existen sólidos en suspensión.

Cuando las condiciones de operación den lugar a la cavitación el dano puede presentarse tanto en la zonas de baja presión como en las de alta presión, en estas últimas cuando la velocidad de flujo es particularmente alta, localizándose en las partes extremas de los álabes, zona de succión y descarga y las paredes internas de la caja de la bomba situadas en un plano normal al eje de rotación. Puede considerarse el inicio del dano, un proceso de erosión por líquido [(27) op.cit. pag. 161] que al originar picaduras da lugar a la formación de celdas galvánicas, donde la zona dañada actúa como ánodo respecto al resto de la superficie que constituye el cátodo.

III ESTUDIO DE LA PROBLEMATICA
DE CORROSION EN LA
INDUSTRIA

III.1 ANTECEDENTES

En Mexico no se dispone de información confiable que permita obtener una evaluación de los costos que origina el daño por corrosión, pero se han hecho estimaciones a través de estudios realizados en otros países tomando como base el producto interno bruto, resultando una pérdida anual de 3.1 billones de pesos -(25) y (36)-, que considerando las mismas estimaciones, puede reducirse hasta en un 25% mediante el empleo "... de la actual tecnología sobre selección de materiales y diseño apropiado, y de las técnicas anticorrosivas de protección más idóneas para cada caso concreto." [(10) op.cit.pag.103].

El interés y la importancia del tema han llevado a la realización de una encuesta desarrollada por el Departamento de Metalurgia de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyo fin fue proporcionar un panorama de los problemas que la industria mexicana enfrenta en este campo, recopilar información técnica y evaluar las necesidades de formación de las empresas consultadas. (10).

Considerando la necesidad de llevar a cabo un proyecto de investigación que proporcionará información verídica y actual, que no sólo considerara el aspecto teórico, se desarrolló una investigación de campo en la industria que incluyera alguna de las aplicaciones señaladas con anterioridad -punto I.5-.

Para el desarrollo de dicha investigación se consideró la elaboración y aplicación de un cuestionario, así como la estimación de un nivel de confiabilidad para la información resultante.

III.2 INVESTIGACION DE CAMPO.

El propósito de lograr un estudio real de la problemática de corrosión en la industria del área metropolitana de México, fue obtener información sobre la atención que se da a la corrosión, el tipo de daño que se presenta así como los elementos que afecta y las medidas correctivas que se han empleado en bombas centrifugas.

Se consideró el área metropolitana por ser uno de los puntos de mayor desarrollo económico y tecnológico en la república mexicana, además de contar sólo con los recursos para realizar dicha investigación en esta zona.

Considerando las aplicaciones ya descritas -punto I.5-, incluidas en actividades dentro de la industria manufacturera, se obtuvieron datos censales realizados por el Instituto de Geografía y Estadística -(33) y (34)-, donde dicho sector esta compuesto por 11,376 empresas localizadas en el Estado de México -de acuerdo al censo económico de 1986 [op.cit.pag. 25]-.

Los datos obtenidos por clases de actividad dentro de la industria manufacturera sólo abarcan el Distrito Federal, donde el 6.21% incluye las actividades de nuestro interés, por lo que, considerando valores proporcionales para el Estado de México, dicho porcentaje da lugar a un universo compuesto de 706 empresas, pero sin incluir servicios prestados por el sector público, por lo que consideraremos un 10% adicional. Entonces nuestro universo esta compuesto por 777 empresas.

III.3 ELABORACION DEL CUESTIONARIO.

Para el desarrollo de la investigación de campo se ha elaborado un cuestionario -ver anexo [A]-, que abarca doce aspectos marcados en los siguientes puntos:

- | | |
|---------------------------------|------------------|
| 1. Datos generales | 7. Problemas |
| 2. Tipo de bomba empleada | 8. Corrosión |
| 3. Construcción | 9. Mantenimiento |
| 4. Características de operación | 10. Instalación |
| 5. Material | 11. Unidades |
| 6. Fluido bombeado | 12. Comentarios |

III.3.1 Datos generales.

Las preguntas de este punto incluyen el nombre de la persona que responderá el cuestionario, el puesto que ocupa y su antigüedad en él, así como la razón social de la compañía y su ubicación. Se podrá evaluar la confiabilidad de la información proporcionada considerando el nivel académico y antigüedad en el puesto del entrevistado.

III.3.2 Tipo de bomba empleada.

Se conocerá la designación general de la unidad de bombeo que aplican en la industria, y podrá compararse con la discusión presentada en el punto I.1.2 referente a los criterios de clasificación.

III.3.3 Construcción.

Se obtiene información general sobre la construcción de la unidad de bombeo, tal como; la cubierta, el número y tipo de impulsores, la posición de la unidad y tipo de succión.

Y así poder establecer alguna tendencia, si es que existe, sobre el tipo de bombas que presentan problemas más críticos.

III.3.4 Características de operación.

La información que se requiere comprende el tipo de fluido bombeado, su temperatura, los datos característicos de la unidad como la capacidad, la presión, la velocidad, así como la potencia de la unidad motriz y valores de la carga neta positiva de succión -disponible y requerida-, también la longitud y diámetro de la tubería de succión, además del tipo y periodo de tiempo del servicio de bombeo. Para así evaluar las condiciones de operación, situando el servicio dentro límites de operación normales o críticos de acuerdo con los parámetros señalados.

III.3.5 Material.

Nos proporcionará información sobre el tipo de material empleado en las partes constitutivas de la bomba que están en contacto con el fluido, tal como; el impulsor, la cubierta, el eje, los anillos de desgaste, la tubería de succión y algún otro elemento que a juicio del entrevistado sea importante considerar. Con esto podremos evaluar la aplicación de los materiales de acuerdo con el fluido bombeado, así como la posibilidad de que exista una celda galvánica.

III.3.6 Fluido bombeado.

Se obtendrán características del fluido que comprenden su origen, el empleo de un tratamiento -tipo, frecuencia de aplicación y características que modifica-, propiedades químicas y sólidos en suspensión.

Entre las propiedades químicas se consideran; la dureza total, el índice del contenido de iones hidrógeno pH y la conductividad. Respecto a los sólidos en suspensión se investiga el tipo y cantidad permisible en el servicio de bombeo.

Esta información nos proporcionará bases de comparación considerando, además de los parámetros señalados, el material de construcción y los tipos de fallas presentes en los elementos constitutivos de las bombas centrífugas investigadas.

III.3.7 Problemas.

Nos mostrará el tipo de fallas más frecuentes especificandolas de manera general y estableciendo el orden de 'importancia'. Se consideran fallas mecánicas, hidráulicas, de corrosión, eléctricas y otras que a juicio del entrevistado sean importantes.

Dentro de las fallas mecánicas se pueden comprender los daños en rodamientos, empaques o sellos mecánicos, fugas por el estopero, fallas en el acoplamiento, desalineamiento, etc.

En las fallas hidráulicas podemos comprender la caída de presión, la disminución del gasto, la cavitación, etc.

Dentro de las fallas por corrosión podemos considerar el desgaste prematuro de anillos y manguitos, daños al impulsor, cubierta, eje y demás partes en contacto con el líquido, siempre que algún mecanismo de corrosión este presente.

En las fallas eléctricas se comprenden los daños en el devanado de la unidad motriz cuando se trata es un motor eléctrico, en un acoplamiento eléctrico, en el suministro de energía, etc.

En las fallas de otro tipo pueden señalarse el ensolvamiento de la unidad, obstrucción de tuberías, etc.

III.3.8 Corrosión.

En este punto se obtendrá información sobre el tipo de ataque y en cuales elementos de la bomba se presenta, investigando el impulsor, la cubierta, el eje, los anillos de desgaste, la tubería de succión y algún elemento que a juicio del entrevistado sea afectado también por el proceso de corrosión.

Se investiga cuales son las medidas correctivas que se han aplicado y los resultados obtenidos en cada una de ellas, donde se sugiere el empleo de inhibidores, la protección anódica y catódica, el uso de recubrimientos, el cambio de materiales y otros que pueda señalar el entrevistado.

III.3.9 Mantenimiento, instalación y número de unidades.

Se investiga el tipo y frecuencia del mantenimiento que se aplica a la unidad de bombeo, requiriendo información sobre la eficacia y control del mismo.

Se conoce si la instalación esta de acuerdo con lo propuesto por el diseño o fabricante, evaluando la información del punto, ya citado, de problemas que se presentan en la unidad de bombeo.

En cuanto a las unidades disponibles se obtiene el número de ellas en operación para el servicio consultado, así como el control de rotación de equipo.

En la mayoría de los puntos señalados se agrega un espacio para cualquier comentario u observación que el entrevistado desee realizar sobre el aspecto tratado.

III.4 PRUEBA Y APLICACION DEL CUESTIONARIO.

Con el proposito de verificar el planteamiento adecuado de las preguntas elaboradas para el cuestionario, inicialmente se consultó a diversos profesores de la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón y después se realizó un 'ensayo' de la entrevista considerando dos empresas que manejan productos quimicos ,residuos de petróleo crudo y un producto para protección agricola, localizandose en la ciudad de México, eligiendolas por las facilidades de acceso y localización próxima. Con dicho ensayo, además se podrá registrar el tiempo aproximado para su aplicación así como la forma de efectuar las preguntas del citado cuestionario.

Para evitar desviaciones en la información obtenida la aplicación del cuestionario será llevada a cabo por una sola persona, evitando diferencias de apreciación o aplicacion de criterios disimiles.

Para evitar dificultades en la comunicacion y tramites burocráticos que via telefónica se suscitan, se decidio acudir personalmente en cada empresa sin previa cita y solicitar la entrevista, mostrando una carta de presentación proporcionada por la Universidad Nacional Autónoma de México - Enep Aragón.

En la mayoría de las empresas consultadas no hubo dificultad en obtener la información requerida por el cuestionario y sólo en algunos casos se concertó una cita en fecha posterior para realizar dicha entrevista.

III.4.1 Nivel de confianza de la información.

De acuerdo a las técnicas de muestreo un tamaño adecuado de muestra debe ser mayor o igual 30, pero debido a la falta de recursos para desarrollar la investigación el tamaño de la muestra en el presente proyecto de investigación es de 19 empresas considerando ya las consultadas para la prueba del cuestionario. Por lo que, obtendremos un intervalo de variación de los resultados, considerando la posición de la problemática de corrosión que designó el entrevistado -punto 7 del cuestionario-.

Estableciendo una confiabilidad del 80% y empleando una distribución "t" -aplicada para tamaños de muestra pequeños-, se pueden considerar los resultados presentados dentro de un intervalo de $\pm 17\%$, el desarrollo matemático puede seguirse en el anexo [B].

III.5 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION.

Al obtener los resultados del cuestionario aplicado se considerara la información proporcionada por las empresas consultadas para el ensayo y prueba de él, no desechando los datos ya obtenidos.

Para mostrar dichos resultados se han elaborado gráficas y cuadros comparativos, que de manera general señalan las tendencias en cada uno de los aspectos tratados. Las aplicaciones consultadas se han dividido en los cuatro grupos siguientes; alimentación o suministro a calderas, aguas negras, pasta para papel y cartón y productos químicos. Los primeros tres grupos comprenden aplicaciones directas que ya se han señalado, en el cuarto grupo se ha conjuntado el manejo de agua clorada, salmuera, líquido colorante y los servicios para residuo de petróleo crudo y el producto para protección agrícola.

En los siguientes puntos se explican brevemente dichas gráficas y cuadros señalados.

III.5.1 Gráficas de respuestas directas.

Se tratan los resultados del cuestionario que corresponden a preguntas directas, es decir, prácticamente se gráfica la respuesta proporcionada por el entrevistado. A continuación se citan dichas gráficas -número de la figura entre paréntesis-.

1. Respuesta al cuestionario.

En ella se presenta la relación entre las empresas que aceptaron responder al cuestionario y las que se negaron a hacerlo dando razones de falta de tiempo y ausencia de problemas relacionados a la investigación desarrollada, (3-1).

2. Grado académico de la persona entrevistada.

Se presenta la relación entre el nivel académico de la persona que respondió el cuestionario, considerando tres grados: ingeniero, técnico y otros, en estos últimos se incluye personal obrero y pasantes del área de ingeniería, (3-2).

3. Construcción de la cubierta de la unidad de bombeo.

Se muestra la tendencia en el empleo de los diferentes tipos de cubiertas en todas las aplicaciones consultadas, considerando tres tipos de construcción; axial, radial y otras. entre las últimas se incluyen construcciones del tipo sólido y tipo barril, (3-3).

4. Número de etapas de la unidad de bombeo.

Se muestra la tendencia en el empleo de unidades unipaso y de múltiples pasos, sin considerar el servicio o la aplicación de la unidad investigada, (3-4).

5. Construcción del impulsor de la unidad de bombeo.

Se presenta la tendencia en el empleo de impulsores de construcción cerrada, semiabierta y abierta, sin considerar la aplicación de la unidad, (3-5).

6. Tipo de unidad empleada en el servicio de bombeo.

Se observa la relación entre el empleo de unidades horizontales y verticales, sin considerar la aplicación de la unidad investigada, (3-6).

7. Tipo de succión de la unidad de bombeo.

Se observa la relación entre la aplicación de cubiertas de succión simple y succión doble, sin considerar la aplicación de la unidad de bombeo, (3-7).

8. Tipo de servicio proporcionado por la unidad de bombeo.

Se muestra la relación entre el servicio que presta la unidad de bombeo siendo continuo o intermitente, sin reparar en la aplicación investigada, (3-8).

9. Promedio del empleo por mes de la unidad de bombeo.

En el cuestionario se solicita el empleo por horas/día y días/semana, considerando que un mes consta de cuatro semanas, el tiempo cubierto por la unidad de bombeo en un servicio continuo durante el mes es de 672 horas. Considerando por separado las unidades de servicio continuo e intermitente se obtuvo un promedio del empleo por mes, (3-9).

10. Temperatura del fluido de operación.

Se muestra la tendencia, entre las aplicaciones consultadas, de la temperatura del fluido bombeado, considerando como temperatura ambiente un valor entre los 20 y 30°C, una temperatura menor de 100°C -pero mayor que la ambiente- y una temperatura mayor a los 100°C, (3-10).

11. Velocidad de operación en bombas centrifugas.

Se muestra la tendencia en el empleo de unidades de baja velocidad - menor o igual a 1800 r.p.m.- y alta velocidad -mayor o igual a 3400 r.p.m.-, (3-11).

12. Frecuencia de las fallas en bombas centrifugas.

Se considera el orden de importancia que designó el entrevistado asignándole a cada posición un valor en 'puntos' que se muestra en la figura en el eje de las ordenadas, en el eje de las abscisas se señala el tipo de fallas; mecánicas, hidráulicas, corrosión, eléctricas y otras, (3-12) y (3-13).

13. Medidas anticorrosivas empleadas en la unidad de bombeo.

Se muestra la relación que guardan las diversas medidas de protección empleadas en las empresas consultadas sin considerar la aplicación, (3-14).

14. Formas de ataque en los elementos constitutivos de las bombas centrifugas.

Se muestra la frecuencia del daño por corrosión en los principales elementos constitutivos, atendiendo a la aplicación de la unidad de bombeo, mostrándose también la relación del daño entre dichos elementos.

Se considera la presencia de corrosión uniforme, picaduras, hendiduras, erosión y esfuerzo, en los siguientes elementos constitutivos; impulsor, cubierta, eje, anillos de desgaste, tubería y otros elementos -tornillos, válvulas, manguitos y tuerca del eje- señalados por el entrevistado, (3-15) a (3-19).

15. Mantenimiento a la unidad de bombeo.

Se presenta una gráfica comparativa considerando el tipo de mantenimiento aplicado a la unidad de bombeo; necesario, preventivo y correctivo, además de la aplicación investigada, (3-20).

16. Instalación de la unidad de bombeo.

Se muestra la relación que guarda la instalación de la unidad, siendo esta; de acuerdo con el diseño o fabricante, cuando ha sido modificada para implementar alguna optimización o siendo desconocido el dato por la persona que respondió al cuestionario, (3-21).

17. Unidades de bombeo disponibles en las empresas consultadas.

Presenta la relación entre las empresas que poseen al menos una unidad de respuesto para el servicio y aquellas que sólo cuentan con la unidad en operación, (3-22).

III.5.2 Gráficas de respuestas compuestas.

En este punto se presentan gráficas que involucran más de una pregunta del cuestionario aplicado, presentando como parámetro principal el tipo de fallas en la unidad de bombeo.

1. Fallas en bombas centrífugas considerando la velocidad de operación.

Se muestran tres gráficas, donde las primeras dos presentan la relación que guardan los tipos de fallas presentes considerando sólo un valor de la velocidad de operación, es decir, alta y baja. La tercera gráfica muestra la relación porcentual entre las fallas tanto en alta como baja velocidad. En las tres gráficas se consideraron fallas mecánicas, hidráulicas, corrosión, eléctricas y otras, que ya se han citado con anterioridad, (3-23) a (3-25).

2. Fallas en bombas centrífugas considerando la presencia de sólidos en suspensión.

De igual forma que para la velocidad de operación se presentan dos gráficas comparativas, presentando la proporción entre las fallas y la presencia de sólidos en suspensión. Se omite una comparación entre las aplicaciones con y sin sólidos por tener una mayor cantidad de empresas que manejan fluidos con sólidos en suspensión, (3-26) y (3-27).

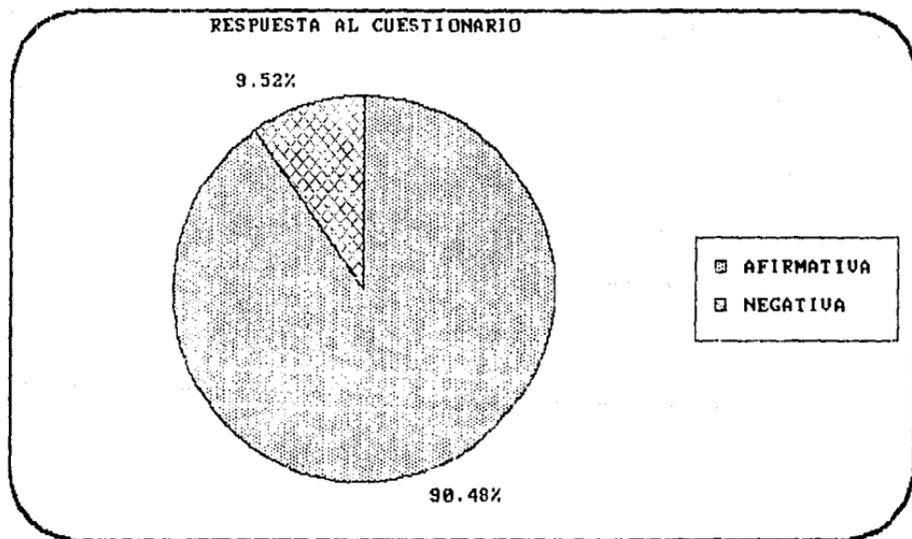
3. Fallas en bombas centrifugas considerando la temperatura del fluido bombeado.

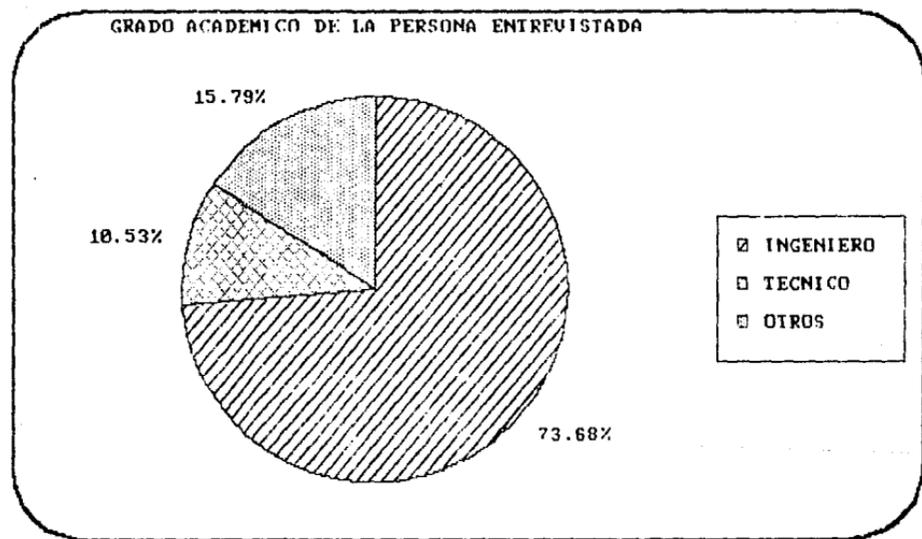
Se presentan tres gráficas, que muestran la proporción entre las fallas considerando la temperatura del fluido manejado, siendo esta; ambiente, menor a 100°C y mayor a 100°C. De igual forma que en el punto anterior, se omite una gráfica comparativa de los tres rangos de temperatura respecto a las fallas por contar con más aplicaciones a temperaturas menores a los 100°C, (3-28) a (3-30).

III.5.3 Cuadros comparativos de respuestas compuestas.

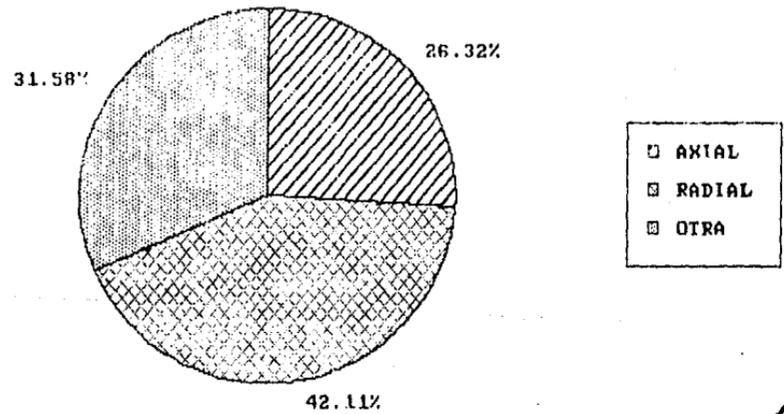
Se muestran principalmente los tipos de corrosión presentes en los elementos constitutivos de la unidad de bombeo -ya citados con anterioridad- y los parámetros considerados en las gráficas compuestas, además del material de construcción, señalando en todos ellos la aplicación de la unidad de bombeo. En seguida se citan los cuadros obtenidos del cuestionario aplicado:

1. Tipos de corrosión considerando el material de construcción del elemento constitutivo, (3-31) y (3-32).
2. Tipos de corrosión en los elementos constitutivos considerando la velocidad de operación de la unidad de bombeo, (3-33).
3. Tipos de corrosión en los elementos constitutivos considerando la presencia de sólidos en suspensión, (3-34).
4. Tipos de corrosión en los elementos constitutivos considerando la temperatura del fluido bombeado, (3-35).





CONSTRUCCION DE LA CUBIERTA DE LA UNIDAD DE BOMBEO



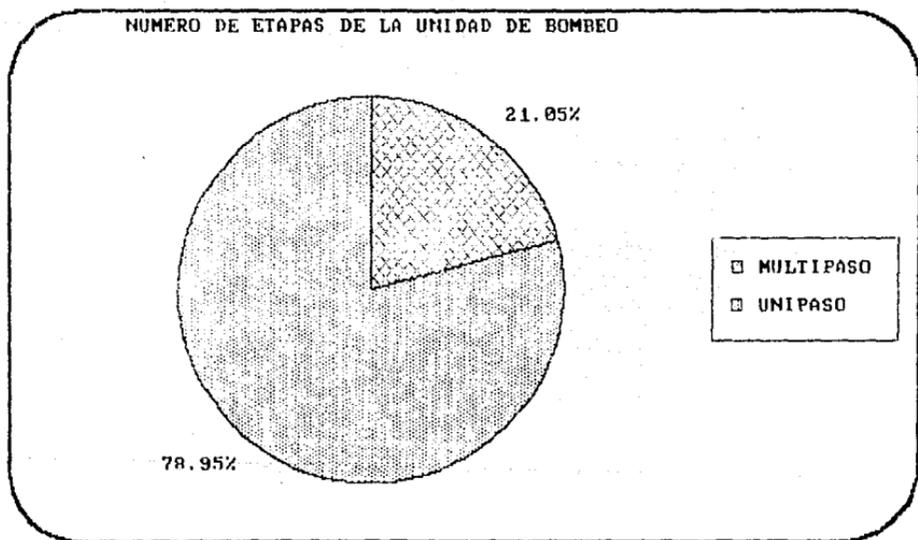
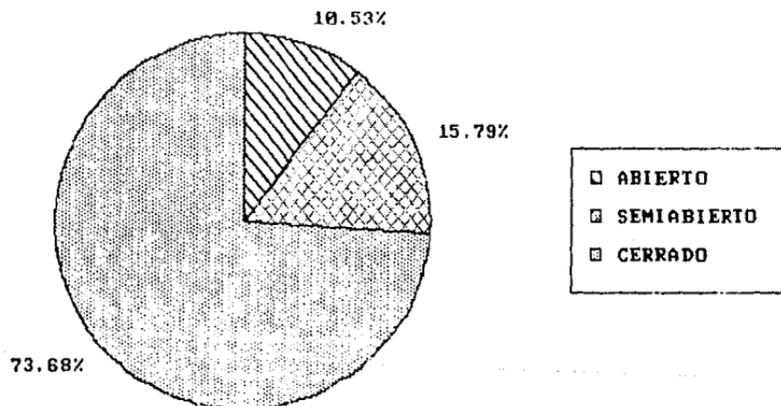


Figura (3-4)

CONSTRUCCION DEL IMPULSOR DE LA UNIDAD DE BOMBEO



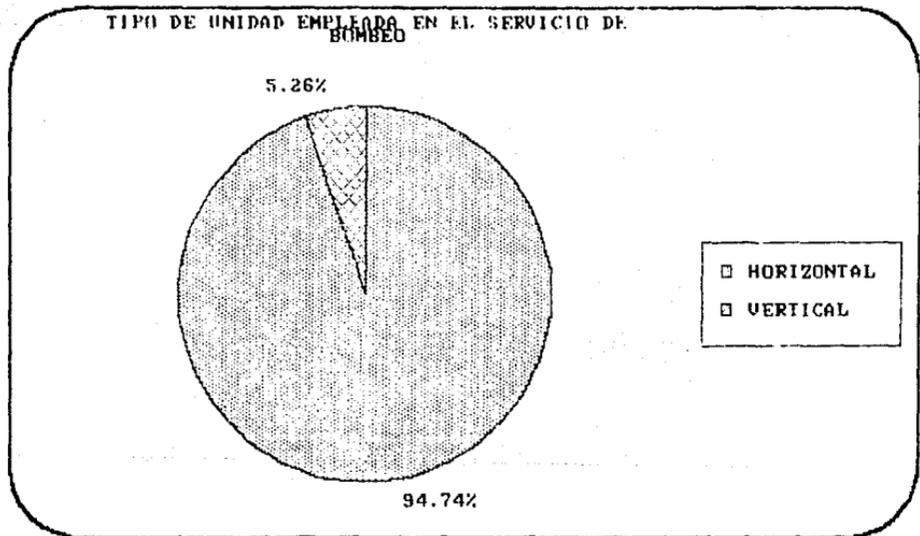
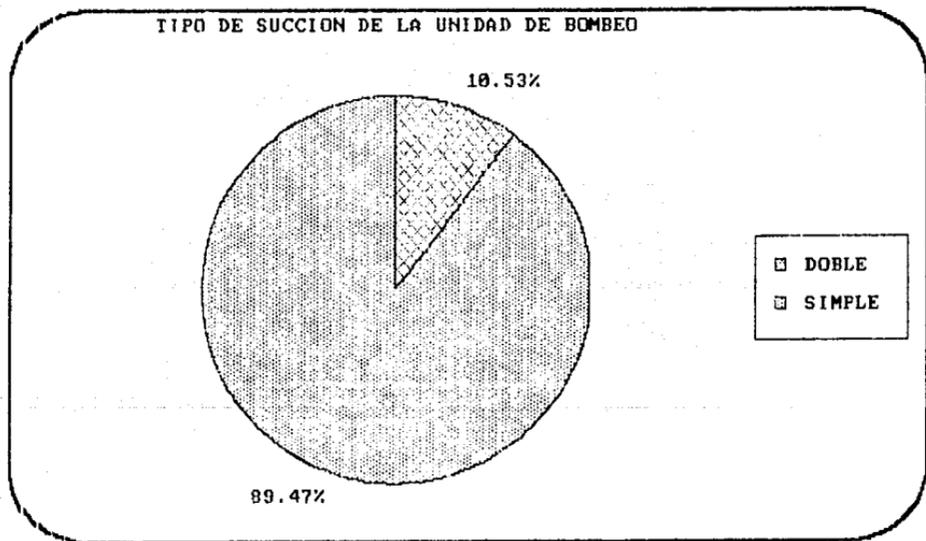
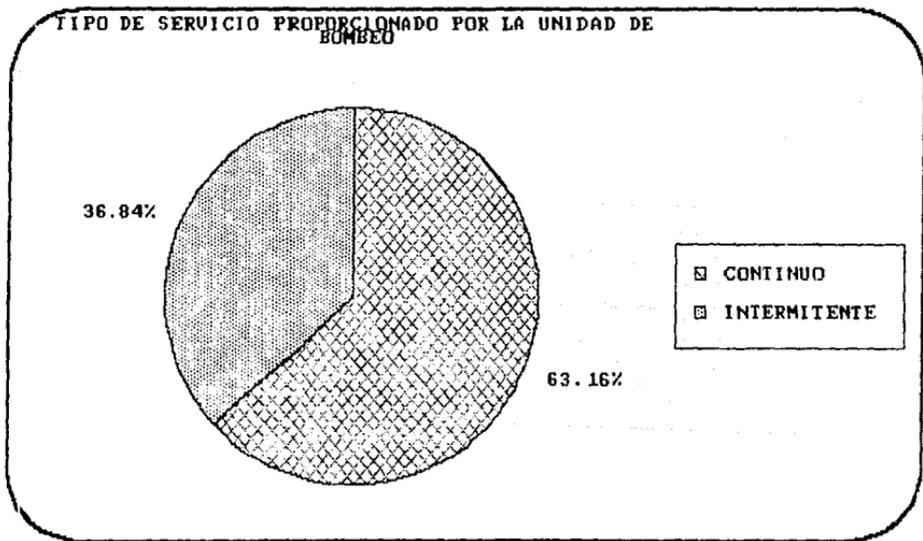
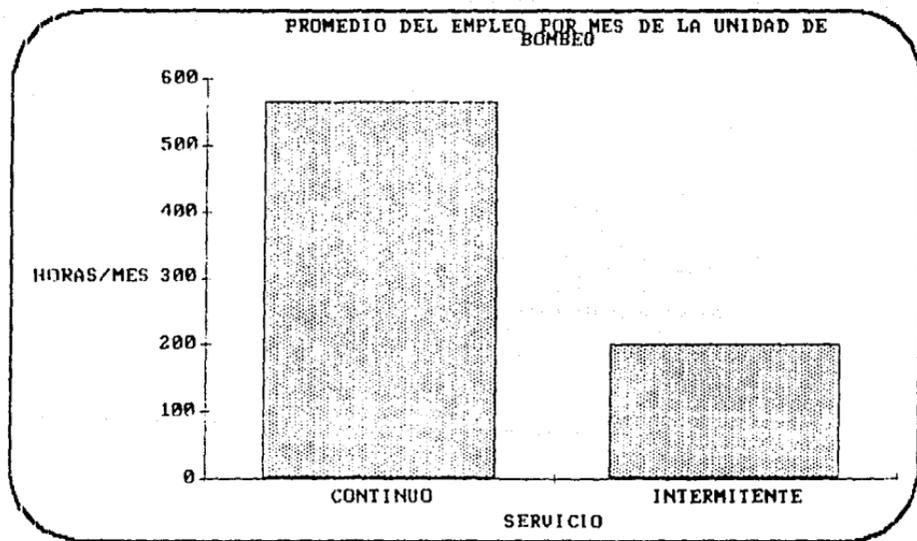
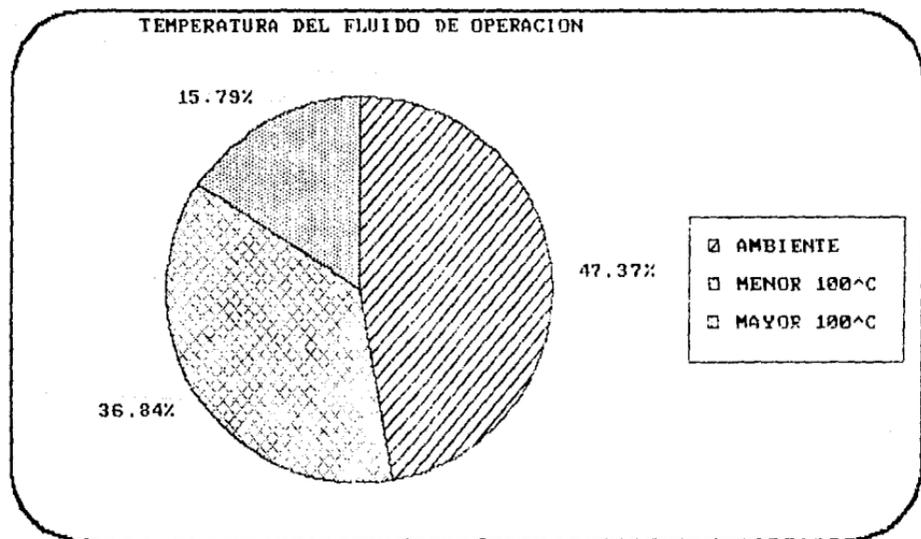


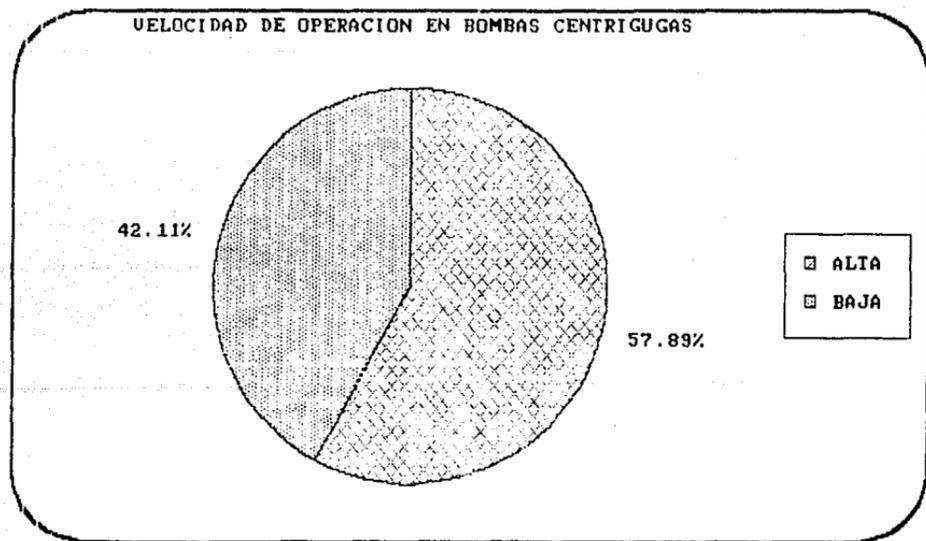
Figura (3-6)

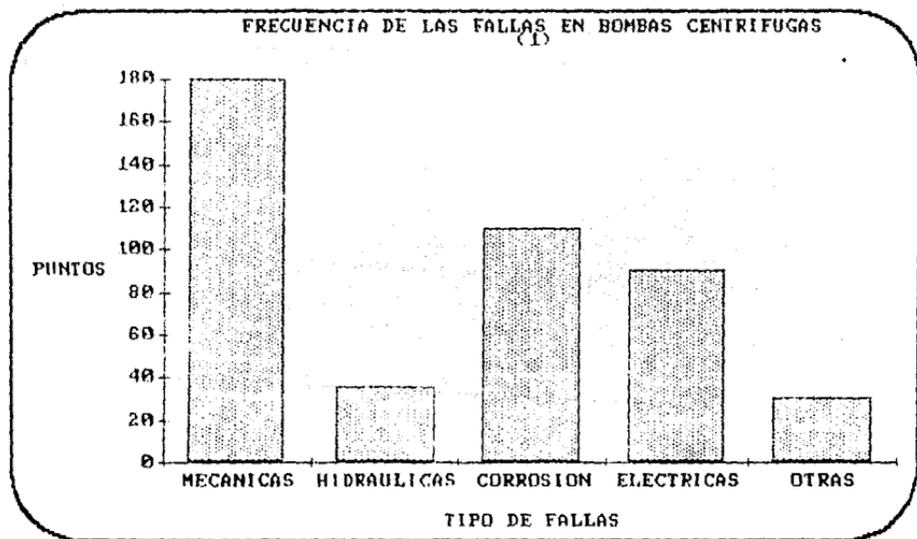












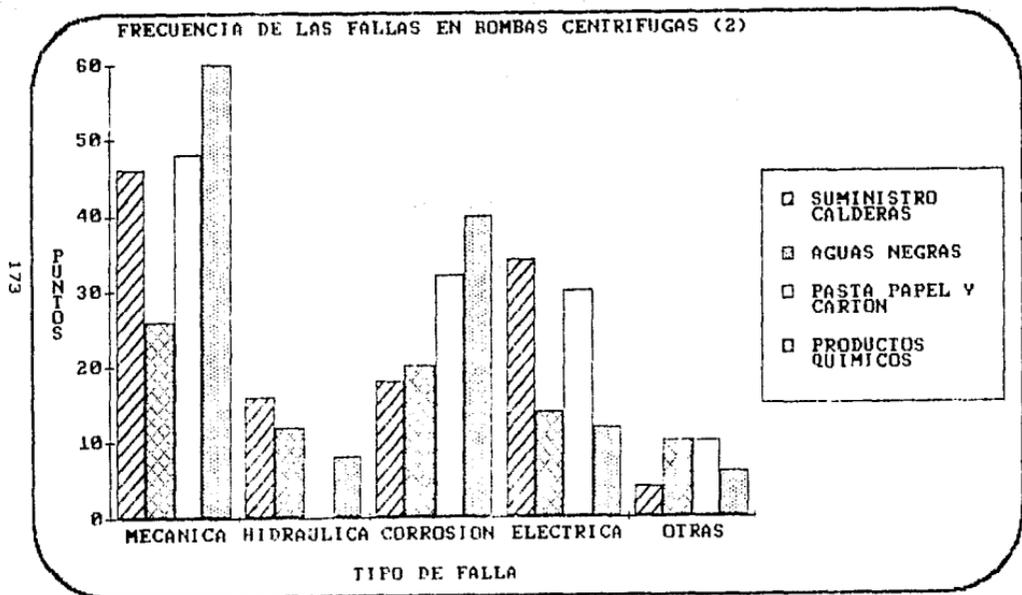


Figura (3-13)

173

MEDIDAS ANTICORROSIVAS EMPLEADAS EN LA UNIDAD DE BOMBEO

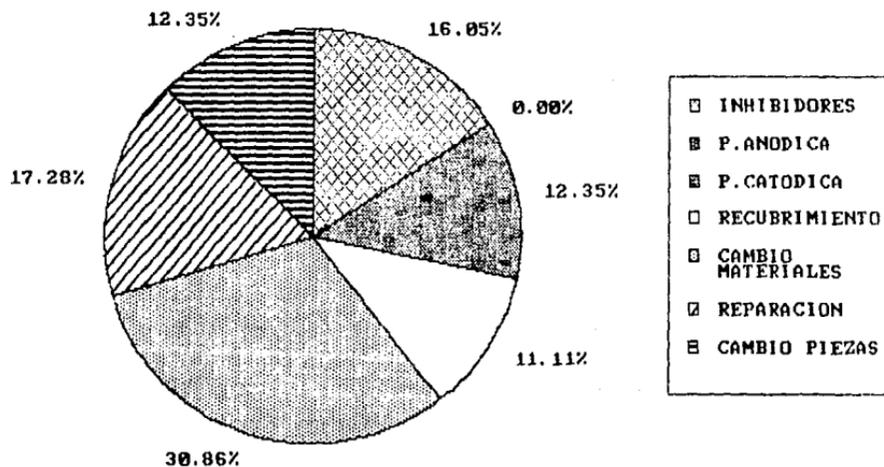


Figura (3-14)

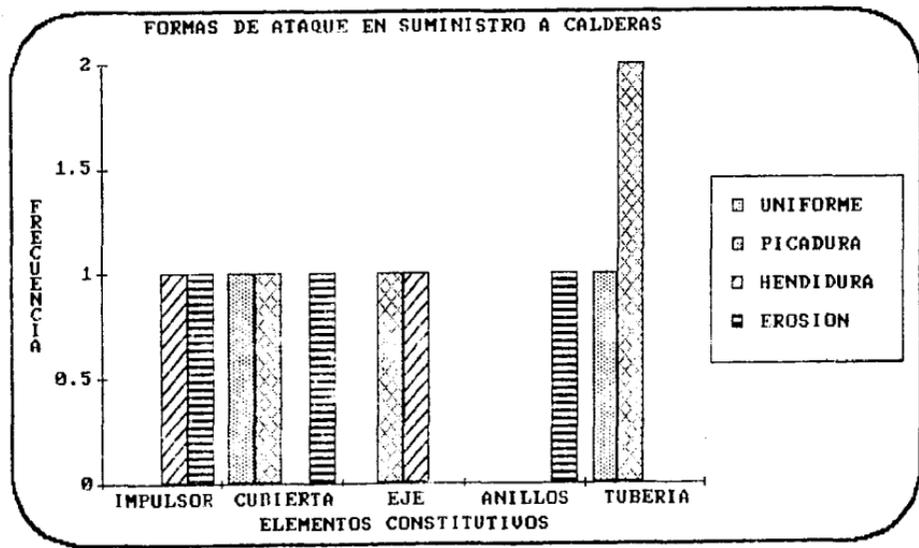


Figura (3-15)

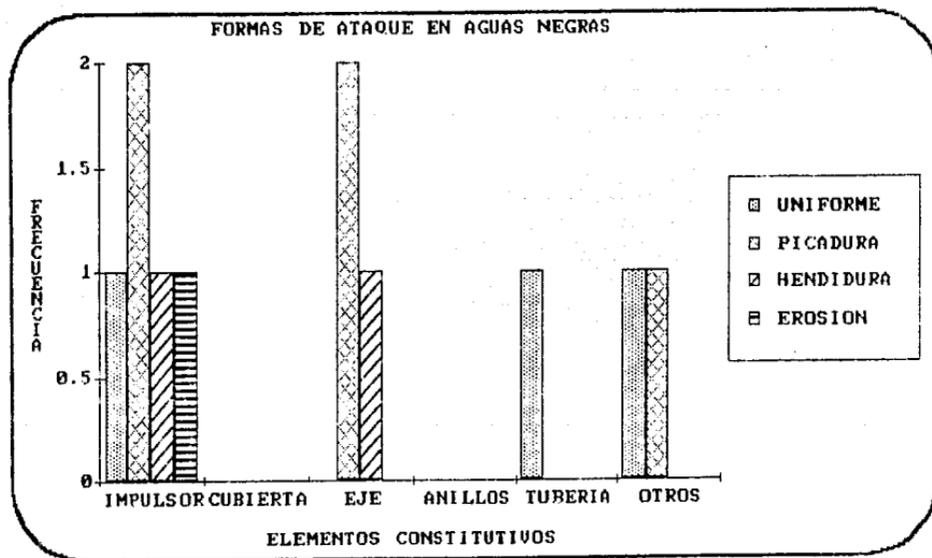
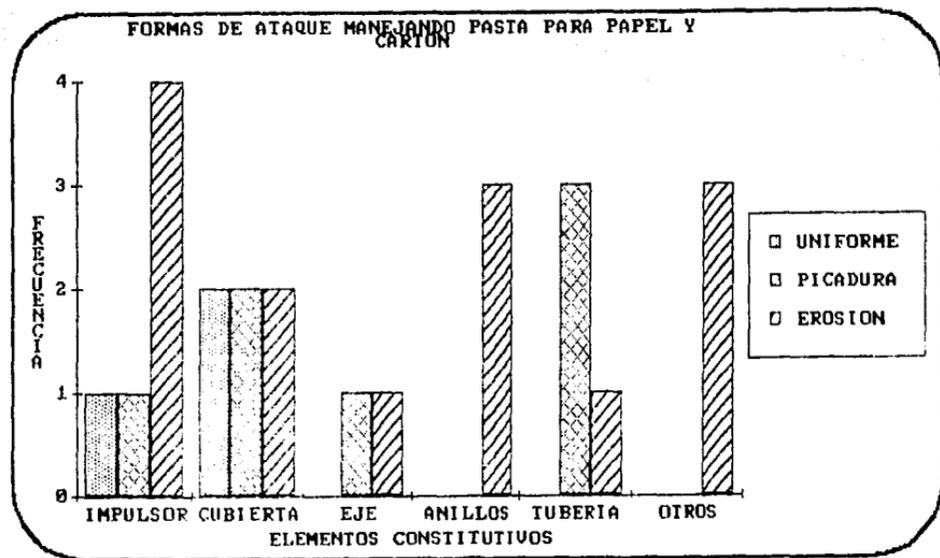


Figura (3-16)



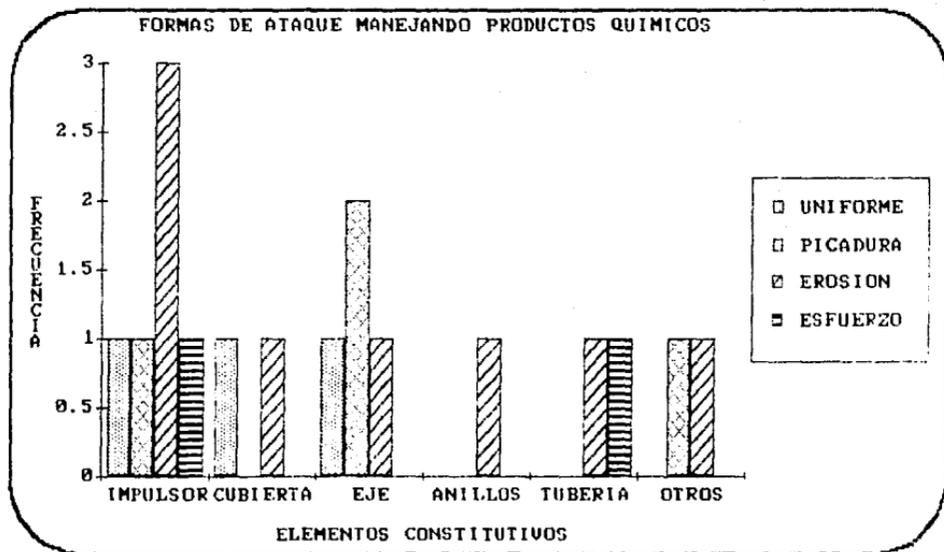
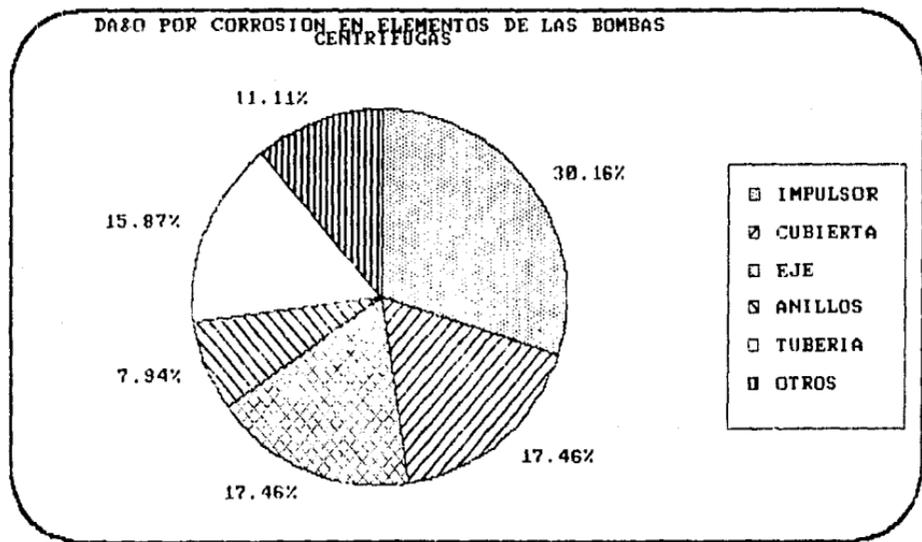
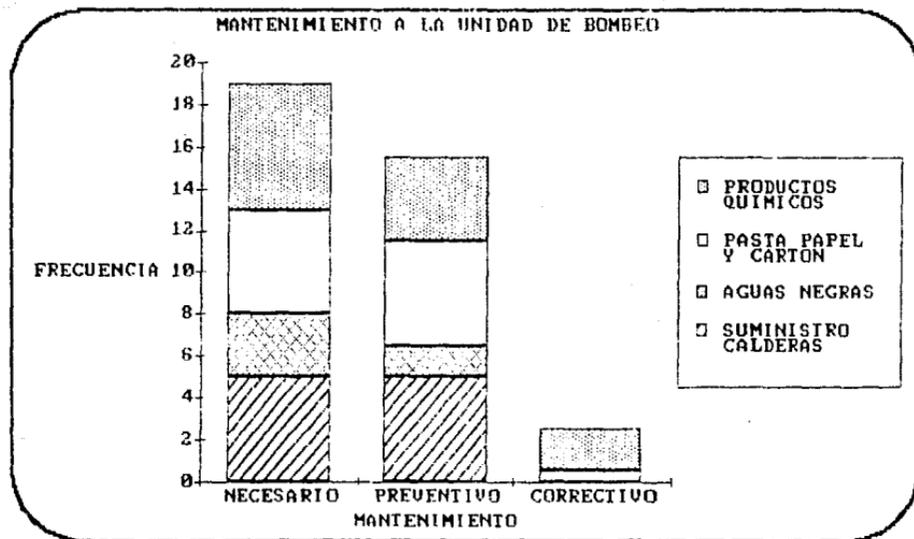


Figura (3-18)





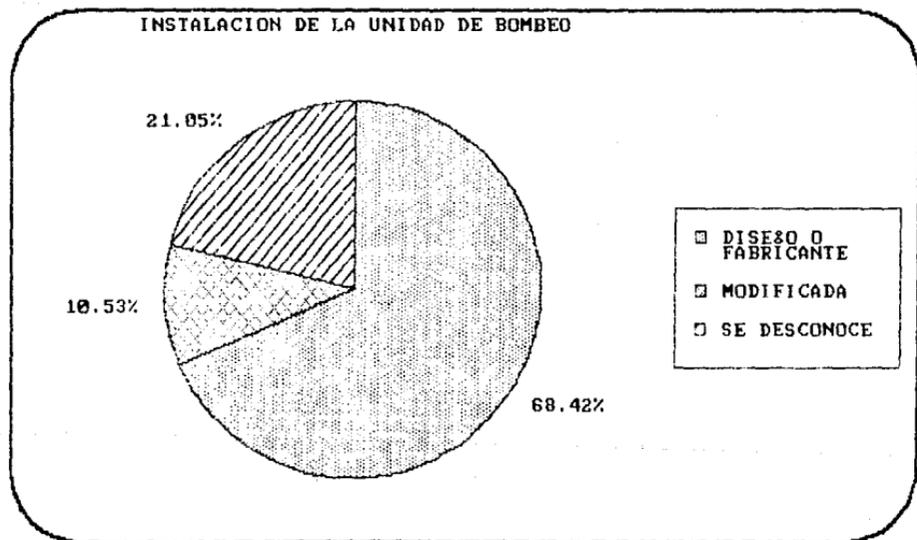


Figura (3-21)

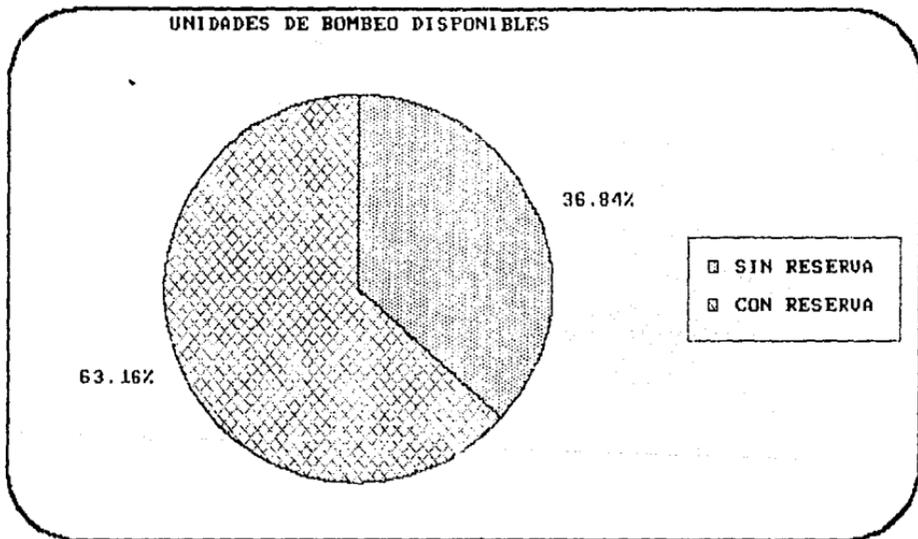
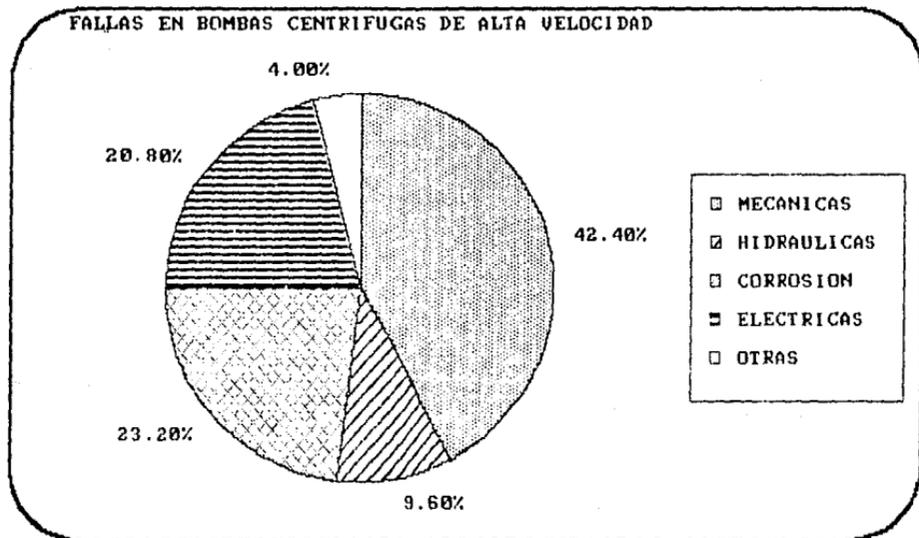
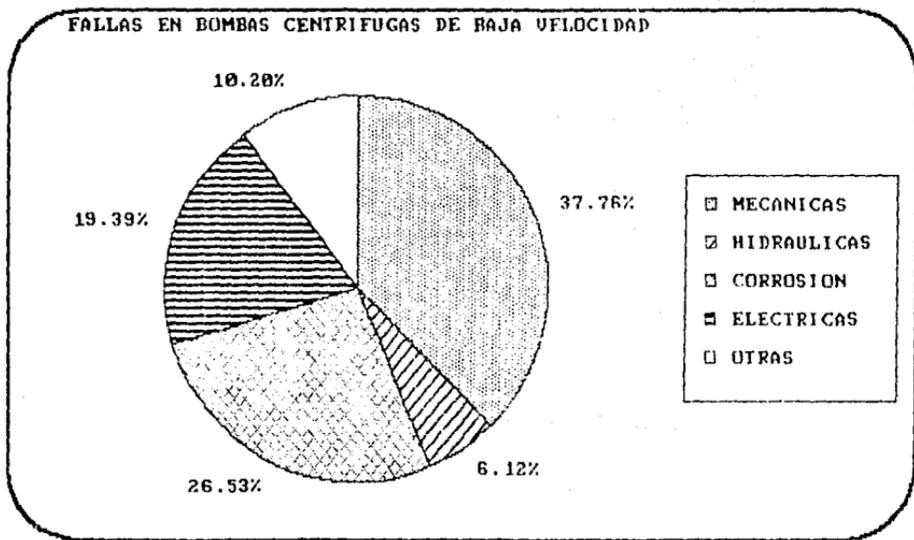


Figura (3-22)





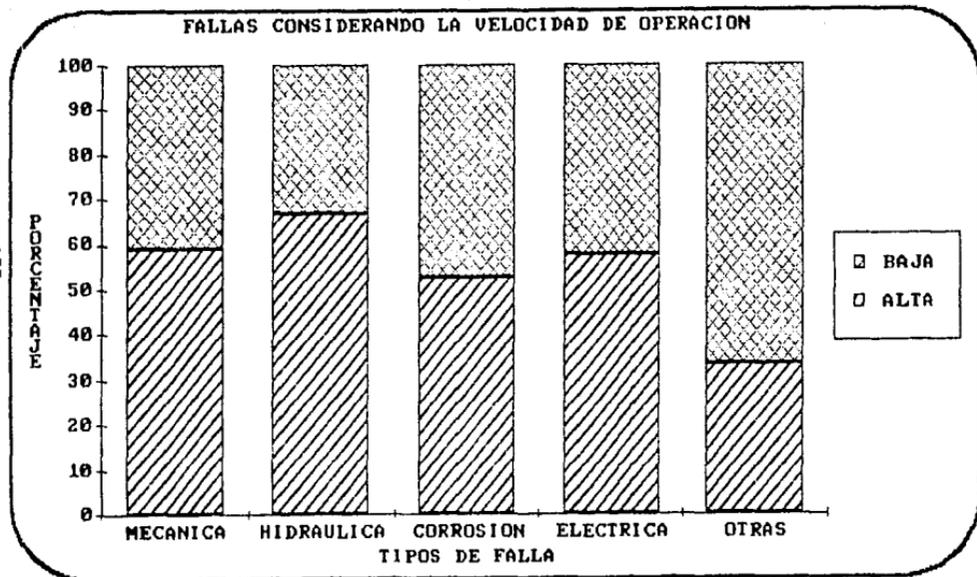


Figura (3-25)

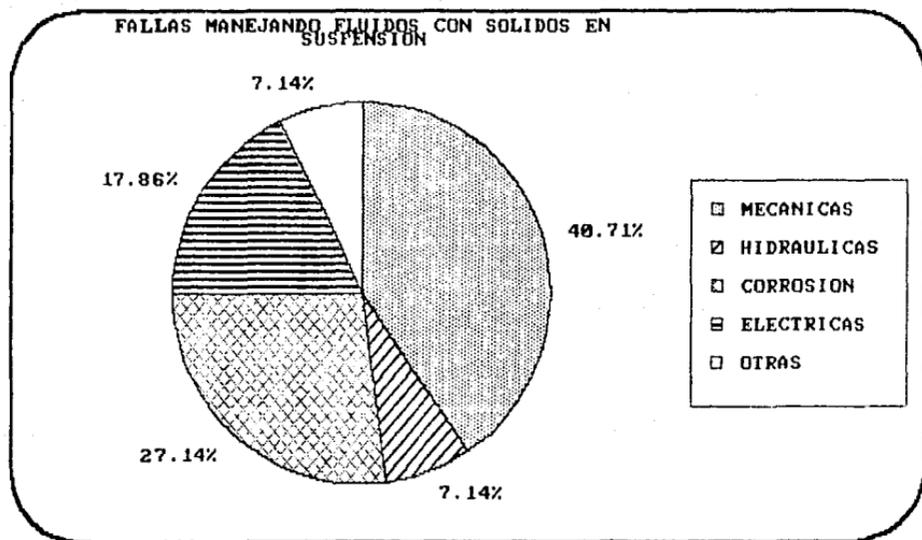


Figura (3-26)

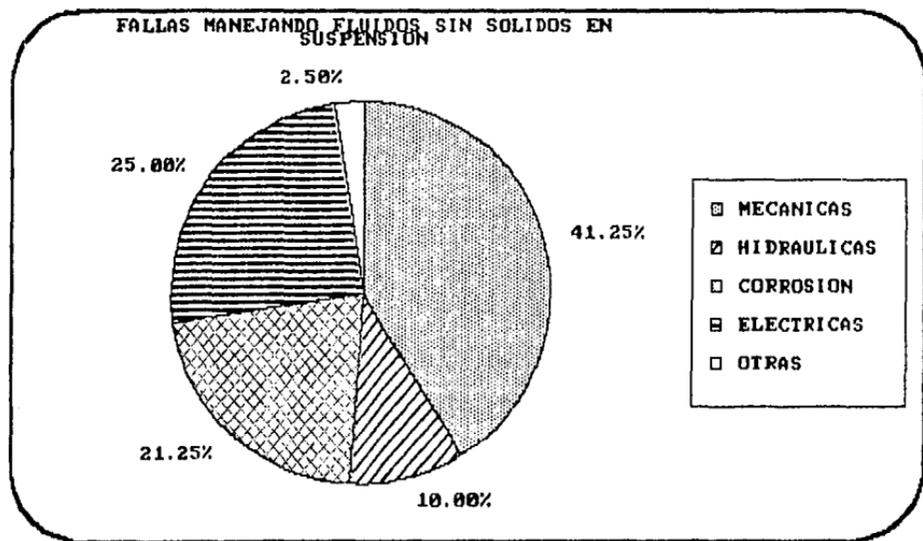


Figura (3-27)

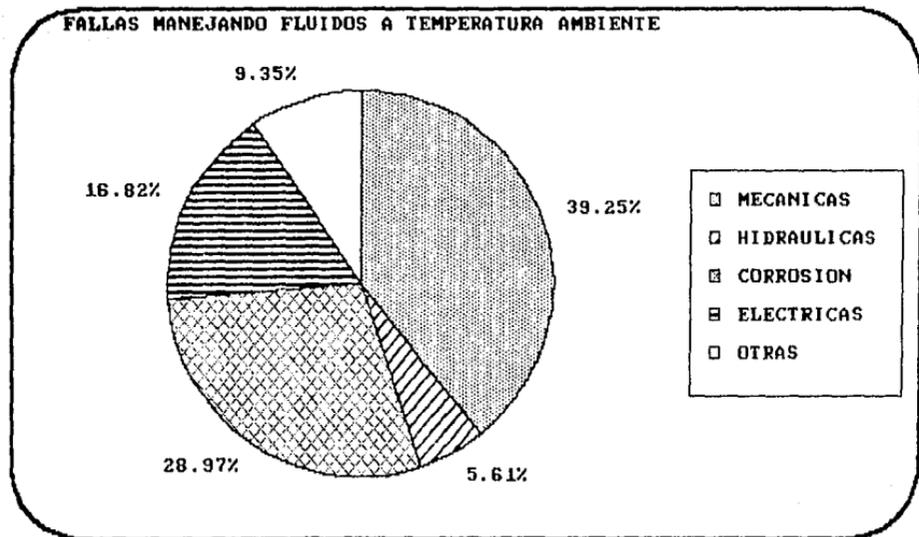


Figura (3-28)

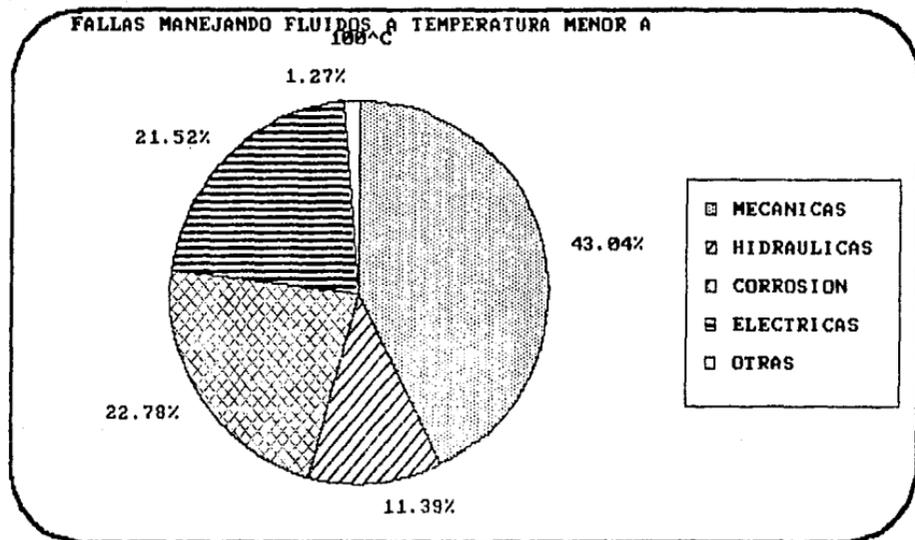


Figura (3-29)

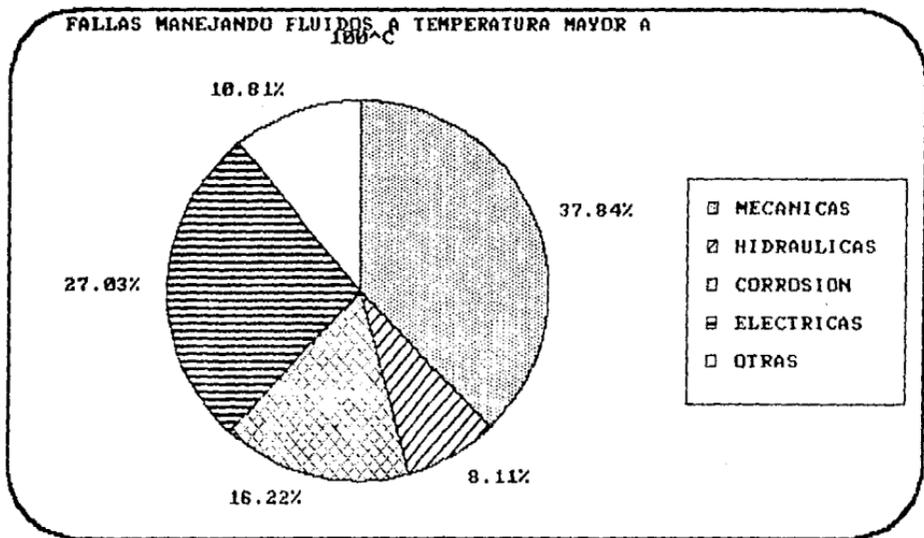


Figura (3-30)

Figura (3-31)

TIPOS DE CORROSION CONSIDERANDO EL MATERIAL				
MATERIAL	AAC	AN	PPC	PQ
IMPULSOR				
FUNDICION GRIS		U-P-H-E	U-P-E	E-EE (b)
ACERO INOXIDABLE			E	P-E (c)
ACERO AL CROMO	E			U-E (a)
BRONCE			U-P-E	
HYPALON				
POLIPRILENO				
CUBIERTA				
FUNDICION GRIS	U-P		U-P-E	U (c)
ACERO INOXIDABLE				
ACERO AL CROMO	E			
ACERO (4-6Cr, 0.5Mo)				E (a)
POLIPROPILENO				
EJE				
ACERO AL CARBON 4010		P-H		
ACERO ROLADO EN FRIO	P-H	P	P-E	E (c)
ACERO INOXIDABLE				U (e) P (b,d)
ACERO AL CROMO				
ACERO CROMO-MOLIBDENO				

U-Uniforme E-Erosion (a) Residuo petroleo (d) Colorantes
P-Picaduras EE-Ezfuerzo (b) Agua - Cloro (e) Producto agricola
H-Hendiduras (c) Salmuera

AAC - Agua de alimentacion a calderas
AN - Aguas negras
PPC - Pasta para papel y carton
PQ - Productos quimicos

Figura (3-32)

TIPOS DE CORROSION CONSIDERANDO EL MATERIAL				
MATERIAL	AAC	AN	PFC	PQ
ANILLOS DE DESGASTE				
FUNDICION GRIS				
ACERO AL CROMO	E			E (a)
BRONCE			E	
TUBERIA DE SUCCION				
HIERRO DULCE (NEGRO)	P			
HIERRO GALVANIZADO	U-P			
ACERO AL CARBON		U		
ACERO INOXIDABLE			P-E	EE (d)
ACERO CROMO-MOLIBDENO				E (a)
POLIPROPILENO				
P V C				
TORNILLOS				
ACERO AL CARBON		U-P		
VALVULAS				
FUNDICION GRIS			E	
MANGAS				
FUNDICION GRIS			E	
BRONCE			E	
TUERCA DEL EJE				
ACERO INOXIDABLE				P (d)

U-Uniforme E-Erosion (a) Residuos petroleo (d) Colorantes
P-Picaduras EE-Ezfuerzo (b) Agua - Cloro (e) Producto agricola
H-Hendiduras (c) Salmuera

AAC - Agua de alimentacion a calderas
AN - Aguas negras
PFC - Pasta para papel y carton
PQ - Productos quimicos

Figura (3-33)

TIPOS DE CORROSION CONSIDERANDO LA VELOCIDAD DE OPERACION				
ELEMENTO	AAC	AN	PPC	PQ
ALTA VELOCIDAD \geq 3400 R.P.M.				
IMPULSOR	Hendidura Erosion	Picadura Hendidura Erosion		Uniforme(a) Picadura(c) Erosion(a,c) Esfuerzo (a,b,c)
CUBIERTA	Uniforme Picadura Erosion			Uniforme(c) Erosion(a)
EJE	Picadura Hendidura			Uniforme(e) Picadura(d) Erosion(c)
ANILLOS DESGASTE	Erosion			Erosion(a)
TUBERIA	Uniforme Picadura			Erosion(a) Esfuerzo(d)
MANGAS				Erosion(c)
TUERCA EN EJE				Picadura(d)
VELOCIDAD \leq 1800 R.P.M.				
IMPULSOR		Uniforme Picadura	Uniforme Picadura Erosion	
CUBIERTA			Uniforme Picadura Erosion	
EJE		Picadura Hendidura	Picadura Erosion	Picadura (b)
ANILLOS DESGASTE			Erosion	
TUBERIA		Uniforme	Picadura Erosion	
MANGAS			Erosion	
TORNILLOS		Uniforme Picadura		
VALVULAS			Erosion	

- (a) Residuo petroleo
- (b) Agua - Cloro
- (c) Salmuera
- (d) Colorantes
- (e) Producto agricola

- AAC - Agua de alimentacion a calderas
- AN - Aguas negras
- PPC - Pasta para papel y carton
- PQ - Productos quimicos

Figura (3-34)

TIPOS DE CORROSION CONSIDERANDO SOLIDOS EN SUSPENSION				
ELEMENTO	AAC	AN	PPC	PG
CON SOLIDOS EN SUSPENSION				
IMPULSOR		Uniforme Picadura Hendidura Erosion	Uniforme Picadura Erosion	Uniforme Picadura Erosion (a, c)
CUBIERTA			Uniforme Picadura Erosion	Uniforme Erosion (a, c)
EJE		Picadura Erosion	Picadura Erosion	Uniforme Picadura Erosion (c, d, e)
ANILLOS DE DESGASTE			Erosion	Erosion (a)
TUBERIA		Uniforme	Picadura Erosion	Erosion Esfuerzo (a, d)
TORNILLOS		Uniforme Picadura		
VALVULAS			Erosion	
MANGAS			Erosion	Erosion (c)
TUERCA EN EJE				Picadura(d)
SIN SOLIDOS EN SUSPENSION				
IMPULSOR	Hendidura Erosion			Erosion Esfuerzo (b)
CUBIERTA	Uniforme Picadura Erosion			
EJE	Picadura Hendidura			Picadura (b)
ANILLOS DE DESGASTE	Erosion			
TUBERIA	Uniforme Picadura			

- (a) Residuo petroleo
 (b) Agua - Cloro
 (c) Salmuera
 (d) Colorantes
 (e) Producto agricola

- AAC - Agua de alimentacion a calderas
 AN - Aguas negras
 PPC - Pasta para papel y carton
 PG - Productos quimicos

Figura (3-35)

TIPOS DE CORROSION CONSIDERANDO LA TEMPERATURA DEL FLUIDO				
ELEMENTO	AAC	AN	PPC	PQ
TEMPERATURA AMBIENTE				
IMPULSOR		Uniforme Picadura Hendidura Erosion	Erosion	Erosion Esfuerzo (b)
CUBIERTA			Uniforme Picadura Erosion	
EJE		Picadura Hendidura		Uniforme(e) Picadura(b)
ANILLOS DESGASTE			Erosion	
TUBERIA		Uniforme	Picadura Erosion	
TORNILLOS		Uniforme Picadura		
VALVULAS			Erosion	
MANGAS			Erosion	
AMBIENTE < TEMPERATURA < 100°C				
IMPULSOR	Hendidura		Uniforme Picadura Erosion	Picadura Erosion (c)
CUBIERTA	Uniforme Picadura		Uniforme Picadura Erosion	Uniforme (c)
EJE	Picadura Hendidura		Picadura Erosion	Picadura(d) Erosion(c)
ANILLOS DESGASTE			Erosion	
TUBERIA	Uniforme Picadura		Picadura	Esfuerzo (d)
MANGAS				Erosion(c)
TUERCA DE EJE				Picadura(d)
TEMPERATURA > 100°C				
IMPULSOR	Erosion			Uniforme Erosion (a)
CUBIERTA	Erosion			Erosion(a)
ANILLOS DESGASTE	Erosion			Erosion(a)
TUBERIA				Erosion(a)

- (a) Residuo petroleo
 (b) Agua - Cloro
 (c) Salmuera
 (d) Colorantes
 (e) Producto agricola

- AAC - Agua de alimentacion a calderas
 AN - Aguas negras
 PPC - Pasta para papel y carton
 PQ - Productos quimicos

IV ANALISIS DE LA
INFORMACION

IV.1 ANTECEDENTES

En este punto se discutirán los resultados obtenidos en el cuestionario aplicado, empleando las gráficas y cuadros comparativos mostrados en el capítulo anterior. Señalando las posibles causas para el comportamiento descrito por ellas, empleando los conocimientos generales de bombas centrífugas y corrosión electroquímica expuestos en los dos primeros capítulos del presente proyecto de investigación. Además podremos evaluar la veracidad de los criterios de comportamiento de los elementos constitutivos -expuestos en el punto II.5-.

IV.2 DISCUSION DE LAS RESPUESTAS DIRECTAS

En este punto se agruparán las gráficas de acuerdo a los aspectos señalados en la elaboración del cuestionario.

1. Datos generales.

La mayoría de las empresas consultadas aceptaron responder al cuestionario -90.48%, proporcionando los recursos para obtener un conocimiento general de la planta y lograr una investigación de campo adecuada. La mayor parte del personal entrevistado -73.68%, tuvo nivel académico de ingeniero, perteneciendo la mayoría a la sección de mantenimiento, por lo que en cierta forma se logró que la información proporcionada por ellos este fundamentada, aunque en algunos casos carecían de un conocimiento completo del servicio de bombeo investigado.

El personal técnico entrevistado generalmente tuvo una larga experiencia en el puesto desempeñado, pero en algunas ocasiones no daba importancia a los indicios de fallas o daños, o ignoraba alguno de los parámetros de operación.

Dentro tercer grupo se considera al personal obrero, que trató, dentro de sus posibilidades de proporcionar toda la información requerida. Consideramos además en este grupo, estudiantes del área de ingeniería, que en algún momento dado quizá por su falta de experiencia no evaluaron adecuadamente los problemas en la operación de bombeo.

2. Construcción de la unidad de bombeo.

En este punto consideraremos la construcción de la cubierta, impulsor, tipo de succión, así como el número de etapas y tipo de unidad empleada, -figuras (3-3) a (3-7)-.

Para la construcción de la cubierta -figura (3-3)-, se observa prácticamente un equilibrio entre los tipos constructivos. En cuanto al tipo constructivo del impulsor -figura (3-5), se observa un empleo mucho mayor de los de construcción cerrada, los porcentajes indicados para impulsores abiertos -10.53% y semiabiertos -15.79%- corresponden a unidades que manejan fluidos con sólidos en suspensión o proporcionan gastos elevados, -pasta para papel y cartón y agua clorada-.

El empleo de unidades de bombeo de succión simple muestra un marcado empleo -89.47%- , por lo que podemos suponer que el uso de unidades de doble succión es para aplicaciones específicas.

De igual forma sucede con el número de etapas y tipo de unidades, en donde se observan tendencias marcadas en el empleo de un tipo constructivo, es decir, el empleo de unidades unipaso -78.95% y horizontales -94.74%-; encontrando aplicación las unidades múltiples y verticales en servicios bien definidos -alimentación a calderas y agua negra cruda respectivamente-.

3. Características de operación.

En este punto se analizarán los parámetros de temperatura, velocidad y tipo de servicio proporcionado por la unidad, -figuras (3-8) a (3-11)-.

La figura (3-10) nos muestra una frecuencia mayor en el manejo de fluidos a temperaturas menores a los 100°C -84.21%, debido a las aplicaciones investigadas, puesto que las que emplean un fluido a temperatura mayor a los 100°C son algunas de alimentación a calderas y manejo de residuos de petróleo crudo, es decir, aplicaciones específicas.

En cuanto a la velocidad de operación -figura (3-11)-, prácticamente existe un equilibrio entre el empleo de unidades de alta y baja velocidad, empleándose estas últimas en servicios que manejan gran cantidad de sólidos en suspensión, es decir, en el bombeo de aguas negras -cruda y para riego-, pasta para papel y cartón así como en líquidos colorantes en la industria textil.

En el tipo de servicio proporcionado por la unidad de bombeo -figura (3-8)-, no se observa gran diferencia, aún cuando es un poco mayor el grupo que presta un servicio continuo -63.16%, posiblemente debido a la gran demanda que en la actualidad se tiene de los servicios y productos elaborados de las empresas investigadas. Además se observa claramente -página 169- que el servicio intermitente abarca sólo una tercera parte del tiempo empleado para el servicio continuo, y que este prácticamente cubre todo el tiempo disponible en el intervalo considerado -un mes = 672 hr-.

4. Frecuencia de las fallas en bombas centrifugas.

Se muestra la relación entre la frecuencia de las fallas y el tipo de éstas conjuntando todas las aplicaciones y considerando los cuatro grupos antes señalados -punto III.5-.

Como se observa en la figura (3-12), las fallas mecánicas exceden por mucho cualquier otro tipo de fallas señaladas, considerando aún cada aplicación por separado -página 173-.

Las fallas mecánicas que fueron señaladas con mayor frecuencia pueden resumirse en las siguientes: fallas en rodamientos, empaques y sellos mecánicos; desalineamiento y vibraciones; esfuerzos en el eje, acoplamiento y tubería; desajustes en anillos de desgaste y prensaestopas.

En cuanto a las fallas por corrosión y eléctricas se 'disputan' el segundo lugar considerando todas las aplicaciones investigadas, pero especificando ésta, sólo en las empresas señaladas por suministro a calderas y 'productos químicos' hay una diferencia apreciable entre el lugar que ocupan dichas fallas, superando las eléctricas a las de corrosión en la primera aplicación y viceversa en el manejo de productos químicos. En las aplicaciones de aguas negras y manejo de pasta para papel y cartón, las fallas por corrosión y eléctricas prácticamente ocupan el mismo lugar.

Las fallas por corrosión más frecuentes estaban presentes en impulsor, eje, cubierta, tubería y tornillos. Las fallas eléctricas señaladas comprenden daño al devanado de la unidad motriz, incremento de la corriente suministrada -elevación de temperatura- y problemas de baja tensión en la alimentación.

Las fallas hidráulicas y de otro tipo estén colocadas en cuarto y quinto lugar respectivamente, a pesar de que la diferencia es mínima. Pero considerando la aplicación de la unidad de bombeo, en el suministro a calderas y manejo de pasta para papel y cartón la diferencia es apreciable.

Las fallas hidráulicas comprenden pérdida de presión, insuficiencia en la energía neta positiva de succión -NPSH- y problemas de cavitación.

En las fallas de otro tipo fueron señaladas las incrustaciones y obstrucción en tubería, desgaste, contaminación del fluido y ensolvamiento de la unidad de bombeo.

La alta incidencia de las fallas mecánicas puede ser posible a los programas inadecuados de mantenimiento y elección deficiente de elementos, tales como; empaques y sellos mecánicos, rodamientos, dispositivos de acoplamiento, etc.

Puede suponerse que debido a las características corrosivas de los fluidos señalados como productos químicos -residuos de petróleo crudo, producto para protección agrícola, agua clorada, salmuera y líquidos colorantes- las fallas por corrosión son más frecuentes. En los servicios para aguas negras y pasta para papel y cartón los fluidos contienen gran cantidad de sólidos en suspensión que originan un daño por corrosión, pero que no tienen gran actividad química para superar las fallas eléctricas que están al mismo nivel de frecuencia. En la alimentación a calderas debido a las condiciones de operación requeridas las fallas por corrosión son menos frecuentes que las fallas eléctricas.

En cuanto a las fallas eléctricas es posible que sean debidas a la carencia de dispositivos de protección y/o reguladores.

Las fallas hidráulicas fueron señaladas como consecuencia de las fallas mecánicas y otras, tales como; incrustaciones en la tubería, ensolvamiento por material extraño, succión de aire, etc., presentándose también, cuando alguna de las características del fluido no fue controlada -temperatura, sólidos en suspensión, etc.-.

5. Formas de ataque corrosivo en bombas centrifugas.

Se muestran los tipos de corrosión considerando la aplicación investigada, por lo que se discutirán de acuerdo a ella, estableciendo un orden de importancia en función de la frecuencia de aparición del daño en la aplicación citada.

En el suministro a calderas -figura (3-15)- puede establecerse la siguiente distribución: daño por picaduras, erosión y al mismo nivel el daño uniforme y por hendiduras.

El daño por picaduras es posible que se haya presentando en periodos largos de paro de la unidad de bombeo, dañando elementos con inhomogeneidades en la superficie, como la cubierta y elementos de la tubería; o en elementos de configuración geométrica adecuada, tal como el eje de rotación, en el que también se presenta el daño por hendiduras. Que al igual que el daño por picaduras, requiere de características de estancamiento del líquido manejado, por lo que posiblemente aquél se presenta en el impulsor bajo las mismas condiciones de paro.

El daño por erosión es debido al efecto del medio ambiente dinámico sobre los elementos en contacto con él, tal como, el impulsor, la cubierta y los anillos de desgaste, presentándose en estos últimos cuando surgió el fenómeno de cavitación.

La presencia del daño uniforme puede considerarse como parte de las primeras etapas del proceso de corrosión, surgiendo después las otras formas de ataque señaladas.

Cabe aclarar que el proceso de corrosión para esta aplicación surgió en condiciones de operación deficientes o cuando el tratamiento aplicado al fluido no fue eficaz.

Para el manejo de aguas negras -cruda y para riego- el orden de importancia de las formas de ataque puede considerarse como sigue; daño por picaduras, uniforme, hendiduras y erosión -figura (3-16)-. La mayor frecuencia del daño por picaduras puede surgir por los depósitos o incrustaciones que origina la materia sólida en suspensión o microorganismos presentes en el fluido considerado, además de los periodos de paro que podrían originar también el daño por hendiduras en zonas geométricas adecuadas del impulsor y eje de rotación.

La corrosión uniforme en algún momento puede considerarse como inicio del ataque por erosión, debido a los sólidos en suspensión del fluido manejado, en el impulsor y elementos de la tubería. La menor frecuencia del daño por erosión puede ser debido al tipo constructivo del impulsor empleado -inatas cable con vías de conducción amplias- y la baja velocidad de operación -1200 r.p.m.-.

Los elementos constitutivos señalados por 'otros' en la gráfica comprenden principalmente tornillos de fijación, que están en contacto continuo con el fluido manejado -agua cruda-, por lo que presentan el ataque uniforme y por picaduras, éste último tal vez en el caso de inhomogeneidades en la superficie.

En el manejo de pasta para papel y cartón es notoria la mayor incidencia del daño por erosión, prácticamente presente en todos los elementos constitutivos en contacto con el fluido, siguiéndole el daño por picaduras y uniforme, figura (3-17).

El daño por erosión se presenta con mayor frecuencia que en el manejo de aguas negras, por lo que podemos suponer que el ataque sea debido a los sólidos en suspensión de la pasta manejada, además de la velocidad de operación empleada -1700 r.p.m.-. Y de igual forma que en las aplicaciones anteriores, considerar que el ataque uniforme señalado en la gráfica, corresponde a las etapas iniciales del daño por erosión. Otros de los elementos constitutivos dañados por erosión son la manga del eje de rotación y válvulas de regulación.

El daño por picaduras en impulsor, cubierta, eje y elementos de la tubería es posiblemente debido a la formación de depósitos o incrustaciones del fluido manejado, en periodos de paro.

Como se observa en la figura (3-18), la presencia del daño es mayor manejando los fluidos agrupados bajo el término 'productos químicos', posiblemente debido a la presencia de sustancias corrosivas -cloro, productos químicos colorantes, etc.- y sólidos en suspensión.

Sin especificar alguna aplicación particular el daño es más crítico en impulsores, siguiéndole en orden de importancia y al mismo nivel las cubiertas, ejes y elementos de tubería. Colocando enseguida válvulas, tornillos, mangas y tuercas en el eje de rotación, teniendo en la última posición a los anillos de desgaste, como se observa en la figura (3-19).

La incidencia del daño sobre el impulsor es debida posiblemente al movimiento rotativo, contacto continuo y estrecho con el fluido manejado, además de la influencia de; presiones no uniformes desarrolladas en la operación, velocidad relativa entre él y el fluido, y la acción de los sólidos en suspensión.

La posición de las cubiertas, tubería y ejes, puede atribuirse en los primeros dos elementos a su condición estática y configuración geométrica; en los ejes puede atribuirse a los elementos protectores que se emplean, además de no existir un contacto tan cercano con el fluido como en el impulsor. Pero también debe considerarse la acción de los sólidos en suspensión sobre la cubierta y tubería, considerando esta última junto con el eje de rotación sometidos a esfuerzo durante la operación.

El daño a los elementos agrupados por 'otros' fue indicado en el manejo de agua negra cruda, pasta para papel y cartón, salmuera y agua clorada, por lo que se observa una característica común, el manejo de sólidos en suspensión o la acción de sustancias corrosivas. El daño prematuro a los anillos posiblemente se produjo por su colocación o selección inadecuada.

6. Medidas anticorrosivas empleadas en la unidad de bombeo.

Como se observa en la figura (3-14), el recurso que se emplea con más frecuencia es el cambio de materiales, siguiéndole el empleo de inhibidores y reparación de los elementos dañados, después están colocados la reposición de piezas, los recubrimientos y la protección catódica, y como observamos el empleo nulo de la protección anódica.

La frecuencia del cambio de materiales puede ser debida a que este recurso es considerado infalible, además de ser el de más amplia difusión, aún cuando en ocasiones es de costo elevado.

Para el empleo de inhibidores y reparación es necesario disponer de los recursos para su aplicación. En el caso de emplear la reparación de los elementos dañados el servicio proporcionado debe ser flexible para permitir dicha reparación en la unidad cuando no existe unidad de reserva.

La reposición de piezas podría indicarnos la falta de medidas correctivas para evitar o disminuir el problema y la 'resignación' ante la presencia del daño.

El empleo de recubrimientos y protección catódica son empleados al mismo nivel que la reposición, pero es posible que el bajo nivel de aplicación sea debido a la carencia de información técnica para emplear éstas y otras medidas anticorrosivas. El empleo nulo de la protección anódica puede ser debido, de igual forma que los recubrimientos y protección catódica, a la falta de información, pero también a sus complejos requerimientos (21).

7. Mantenimiento de la unidad de bombeo.

Considerando el mantenimiento necesario como aquel que se proporciona a la unidad de bombeo cuando ya ha ocurrido la falla, observamos en la figura (3-20) que excede en gran medida la frecuencia de aplicación del mantenimiento correctivo y en menor grado al mantenimiento preventivo, lo que nos hace suponer alguna deficiencia en la aplicación del mantenimiento preventivo o la necesidad de aplicar medidas correctivas a la unidad, instalación o sistema de servicio.

8. Instalación de la unidad de bombeo.

De la figura (3-21) podemos observar que en la mayor parte de las empresas investigadas -68.42%-, la instalación está de acuerdo con lo propuesto por el diseño o fabricante.

Por lo que puede suponerse que las condiciones de operación de la unidad, están dentro los rangos normales de servicio. Pero observamos un porcentaje considerable -21.05%- que desconoce la 'situación' de la instalación, debido posiblemente a la carencia de un historial de control y mantenimiento de la unidad, alto índice de cambio de personal o antigüedad del equipo empleado.

9. Unidades de bombeo disponibles en las empresas consultadas.

Prácticamente todas las empresas consultadas cuentan si no con unidades de reserva, con refacciones y repuestos que disminuyen de alguna forma el tiempo requerido por la reparación o mantenimiento de la unidad de bombeo, estas se incluyen en el grupo de empresas que no cuentan con la unidad de reserva en la figura (3-22).

IV.3 DISCUSION DE LAS RESPUESTAS COMPUESTAS

En este Punto se discutirá la influencia que ejercen la velocidad de operación, la presencia de sólidos en suspensión y temperatura de operación sobre el tipo de fallas presentes en la unidad, así como el tipo de corrosión a que dan lugar.

1. Fallas considerando la velocidad de operación.

La única diferencia que se puede establecer es el lugar que ocupan las fallas hidráulicas y de otro tipo; en las unidades de baja velocidad son más frecuentes las fallas de otro tipo -10.20%-, debidas principalmente al manejo de sólidos en suspensión, por ejemplo; obstrucción en tuberías, ensolvamiento de la unidad, etc.

Comparando unidades de una y otra velocidad se puede observar -figura (3-25)-, que no hay influencia apreciable sobre las fallas por corrosión y eléctricas. Pero existe un ligero incremento en las fallas mecánicas e hidráulicas para unidades de alta velocidad -59% y 67% respectivamente-, debido posiblemente a las condiciones de operación -carga y presión-, y servicio a las que se someten los elementos de la unidad. Respecto a las fallas de otro tipo el incremento es en las unidades de baja velocidad -67%-, por los motivos que ya se han señalado.

En cuanto a las formas de ataque presentes no existe una tendencia marcada entre las unidades de una y otra velocidad, aunque puede considerarse una frecuencia mayor del ataque por picaduras y dano uniforme en unidades de baja velocidad y una tendencia ligeramente mayor al dano por hendiduras y esfuerzo en unidades de alta velocidad -figura (3-33)-.

El daño por picaduras y hendiduras debe estar relacionado con depósitos o incrustaciones y periodos extensos de paro respectivamente. El daño uniforme en unidades de baja velocidad posiblemente se deba a la presencia de sólidos en suspensión como ya se señalado antes y el daño por esfuerzo en unidades de alta velocidad con la presencia de presiones no uniformes sobre el impulsor durante la operación de bombeo.

2. Fallas considerando la presencia de sólidos en suspensión.

La posición que guardan las fallas entre aplicaciones con y sin sólidos en suspensión, difiere en las fallas por corrosión -27.14% y 21.25% respectivamente-, eléctricas -17.86% y 25.00%-, y de otro tipo -7.14% y 2.50%-, donde la posible causa de tal diferencia es sólo la presencia de sólidos en suspensión, figuras (3-26) y (3-27).

Evalutando la presencia del daño por corrosión se observa una tendencia al daño por erosión y ligeramente daño uniforme en fluidos con sólidos en suspensión; y al daño por hendiduras en fluidos sin sólidos en suspensión debido tal vez a periodos extensos de paro -figura (3-34)-.

3. Fallas considerando la temperatura del fluido bombeado.

Como se observa en las figuras (3-28) a (3-30), únicamente las fallas mecánicas conservan su posición relativa, las fallas por corrosión y eléctricas guardan la misma posición a temperaturas menores a los 100°C -incluyendo la ambiente-, pero a temperaturas mayores a los 100°C son las fallas hidráulicas -27.03%- y por corrosión - 16.22%- las que siguen en orden de importancia.

La posición que guardan las fallas eléctricas en unidades que manejan fluidos a temperaturas mayores a los 100°C es la de menor importancia, debido posiblemente a los efectos de cavitación y aceleración de las posibles reacciones químicas entre materiales y medio ambiente, dando lugar a la presencia de fallas hidráulicas y por corrosión que ya se han señalado.

A temperaturas menores a 100°C pero mayores a la ambiente siguen en orden de importancia las fallas hidráulicas -11.39%, debidas también a problemas de cavitación y succión de aire, pero que como ya se ha indicado son menos frecuentes que las fallas por corrosión -22.78%- y eléctricas -21.52%-. Las fallas de otro tipo en unidades a temperatura ambiente son las que le siguen a las de corrosión -28.97%- y eléctricas -16.82%-, ocupando la última posición las fallas hidráulicas.

Evaluando la presencia del daño por corrosión se observa un tendencia marcada del daño por erosión a temperaturas mayores a los 100°C, pero como se observa -figura (3-35)- esto es sólo debido al manejo de residuos de petróleo crudo y problemas de cavitación en la aplicación de alimentación a calderas.

Se observa también un ligera tendencia al daño por picaduras y erosión a temperaturas menores a los 100°C, considerando el daño por picaduras debido a los depósitos o incrustaciones y periodos extensos de paro; y el daño por erosión al manejo de sólidos en suspensión principalmente en fluidos a temperatura ambiente.

IV.4 EVALUACION DE LA APLICACION DEL MATERIAL DE CONSTRUCCION

Se analizara la relacion galvanica que guardan los materiales señalados por las empresas consultadas -gráficas (3-31 y 3-32)-.

Considerando los datos disponibles del material de construcción y fluido manejado, además de las guías de selección de materiales de la bibliografía consultada (31) y (32), puede señalarse que la mayoría de las empresas consultadas emplean materiales que guardan una relación adecuada entre las áreas anódicas y catódicas, es decir, los materiales de comportamiento activo o anódico conforman elementos de mayores dimensiones y construcción sólida, y solo señalar el empleo de bronce y aceros al carbono para impulsores y ejes respectivamente, donde su aplicación puede evaluarse con mayor cuidado en el manejo de agua para alimentación a calderas, agua negra para riego y pasta para papel y cartón, que son los servicios en donde fue señalado su uso.

IV.5 OTROS DATOS DEL CUESTIONARIO

Algunos parámetros de operación, así como algunas características del fluido manejado que se solicitan en el cuestionario, no fueron gráficas por falta de confiabilidad, debido al desconocimiento del dato por parte de la persona entrevistada en algunas empresas.

El punto referente a la denominación del tipo de bomba empleada en la aplicación no fue considerado en las gráficas, debido a que en todas las empresas se designa por el tipo constructivo, considerando el número de etapas y tipo de unidad.

Algunos de los datos del tratamiento aplicado y características del fluido fueron considerados al evaluar la frecuencia y tipo de fallas presentes en la unidad de bombeo.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el desarrollo del trabajo de investigación se obtuvieron los conocimientos para exponer los conceptos, necesidades y criterios de evaluación siguientes:

Los criterios que exponen los autores consultados pueden citarse en los siguientes:

1. Principio de transmisión de energía
2. Tipo de elemento transmisor de energía
3. Características de movimiento del fluido
4. Número específico de revoluciones
5. Características estructurales y generales
6. Materiales de construcción
7. Aplicación específica

En el presente estudio la clasificación de las bombas considera como grupos principales: dinámicas, rotativas y de desplazamiento positivo, tratando dentro del primer grupo el tipo de flujo radial o bomba centrífuga.

En el diseño o selección de un equipo de bombeo se requiere investigar las propiedades del fluido, las condiciones de servicio y la facilidad de instalación, operación y reparación; además de los requerimientos propios de la unidad, tal como, operación silenciosa, calidad, simplicidad, bajo costo, etc.. Así también la unidad debe cumplir con las especificaciones de inspección y prueba de las Normas Oficiales Mexicanas.

La selección de materiales de construcción sigue un patrón general que se ha obtenido principalmente de la experiencia de fabricantes y usuarios, así como de pruebas experimentales, teniendo estas últimas algunas limitaciones prácticas debido a la gran cantidad de variables que intervienen en la operación de bombeo. Los materiales empleados comprenden materiales ferrosos, no ferrosos y polímeros, presentando características propias que deben evaluarse al llevar a cabo la elección.

La bomba centrífuga satisface una amplia gama de necesidades en toda la industria, no en vano es considerada como "...un dispositivo extremadamente simple de uso casi universal..." [16], cuya tecnología tendrá "...innovaciones adicionales en el arte de transformar la energía mecánica en energía de presión..." [39].

La comprensión del proceso de corrosión es de suma importancia para el ingeniero, que con el conocimiento de las medidas preventivas que pueden aplicarse, reducirá al mínimo el desperdicio y deterioro prematuro.

Virtualmente pueden presentarse todas las clases de corrosión electroquímica, pero considerando los elementos de la unidad que están en contacto con el fluido, el ataque puede ser uniforme, por hendiduras, picaduras, intergranular, galvánica, selectiva, por esfuerzo y por erosión.

La investigación de campo nos proporcionó información sobre la atención que se da en la industria a la corrosión, el tipo de daño que se presenta, así como los elementos que afecta y las medidas correctivas que se han empleado.

En forma general es mucho mayor el empleo de unidades unipaso horizontales de succión simple y de impulsor cerrado, por lo que puede suponerse que las unidades de otros tipos constructivos se emplean en servicios específicos, donde están bien definidas las condiciones de operación requeridas para elegir la unidad de bombeo. Algunos de los parámetros como temperatura, velocidad de operación y tiempo de servicio, prácticamente guardan equilibrio en los distintos rangos de operación.

Uno de los aspectos que más sobresalen en la investigación es la necesidad de llevar un historial de la unidad de bombeo, donde se lleve un control de mantenimiento e información sobre las características de funcionamiento y del fluido bombeado.

Es necesario también evaluar la efectividad del mantenimiento preventivo aplicado y así designar las medidas correctivas necesarias para la unidad, instalación o sistema.

De manera general la presencia de fallas en la unidad de bombeo puede ser debida a:

1. Programas inadecuados de mantenimiento
2. Elección deficiente de los elementos constitutivos
3. Aplicación deficiente de las medidas anticorrosivas o falta de ellas
4. Carencia de dispositivos de protección y/o reguladores
5. Control deficiente en el fluido de alimentación a la unidad

Los tipos de ataque que fueron indicados más frecuentemente son: Picaduras, Erosión, Uniforme, Hendiduras y Esfuerzo. A continuación se citan las posibles causas para la presencia de dicho ataque.

1. Períodos extensos de paro
2. Efectos del medio ambiente dinámico
3. Configuración geométrica adecuada
4. Inhomogeneidades en la superficie de los elementos
5. Velocidad de operación alta
6. Desarrollo de presiones no uniformes o esfuerzos durante la operación
7. Sólidos en suspensión
8. Depósitos o incrustaciones a que dan lugar los sólidos en suspensión
9. Cavitación
10. Presencia en el fluido de sustancias corrosivas

Las medidas correctivas empleadas incluyen el cambio de materiales, empleo de inhibidores, reparación de los elementos dañados, reposición de piezas, recubrimientos y protección catódica. Pero pueden considerarse con mayor detenimiento el empleo de recubrimientos, ya se metálicos o de materiales polímeros, el empleo de un tipo constructivo de impulsor adecuado para el manejo de sólidos en suspensión y la aplicación de una velocidad de operación menor.

Es necesario recalcar que "...desgraciadamente, se puede decir que el deterioro resultante de un proceso de corrosión se ha venido aceptando como un hecho inevitable cuando se manejan metales. A pesar de la importancia tecnológica y económica de la corrosión, la naturaleza interdisciplinaria del tema ha sido un obstáculo difícil de superar." [11]

Finalmente un aspecto importante para el desarrollo de futuros trabajos de investigación es la designación de una aplicación específica, así como un número mayor de servicios consultados considerando técnicas estadísticas para el muestreo y tal vez el cuestionario elaborado en el presente trabajo.

ANEXO A

PROBLEMAS EN BOMBAS CENTRIFUGAS PARA EL SERVICIO DE:

1. DATOS GENERALES

NOMBRE _____

PUESTO _____ ANTIGUEDAD _____

COMPANIA _____

Direccion _____

Telefono _____

2. TIPO DE BOMBA EMPLEADA _____

3. CONSTRUCCION

Cubierta: AXIAL RADIAL OTRA _____
(Especifique)

No. impulsores _____

Unidad: VERTICAL HORIZONTAL Impulsor: ABIERTO

Succion: SIMPLE DOBLE SEMIABIERTO

Observaciones: _____ CERRADO

4. CARACTERISTICAS DE OPERACION

Fluido: _____

Capacidad _____ Presion _____

Velocidad _____ Potencia unidad motriz _____

Temperatura del fluido: _____ Longitud y diametro de la tuberia de

succion: L _____ D _____

Servicio CONTINUO NPSH disponible _____

INTERMITENTE NPSH requerida _____

Periodo de tiempo del servicio [h/dia;dia/sec] _____

5. MATERIAL

Impulsor _____

Cubierta _____

Eje _____

Anillos de desgaste _____

Tuberia de succion _____

Otro material de algun elemento no sealado _____

6. FLUIDO BOMBREADO

Origen: _____

Tratamiento Tipo: _____

Aplicación del tratamiento:

CONTINUA INTERMITENTE Frecuencia: _____

Remoción de: Dureza Gases Silice Otros (especifique): _____

1. _____ 2. _____ 3. _____ 4. _____

Dureza total _____ pH _____

Conductividad _____ Sólidos permisibles _____

Tipo de sólidos en suspensión: _____

Observaciones: _____

7. PROBLEMAS

Tipo de fallas más frecuentes, observadas en este tipo de bombas:

MECANICAS _____ -NUMERAR en orden de IMPORTANCIA-
HIDRAULICAS _____
CORROSION _____
ELECTRICAS _____
OTRAS _____

Especifíquelas de manera general:

Mecanicas _____

Hidraulicas _____

Corrosion _____

Electricas _____

Otras _____

8. CORROSION

Referente al problema de CORROSION señale las medidas correctivas que ha empleado y los resultados obtenidos:

	Excelentes	Buenos	Regulares	Deficientes
<input type="checkbox"/> INHIBIDORES	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> PROTECCION ANODICA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> PROTECCION CATODICA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> RECUBRIMIENTOS	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> CAMBIO DE MATERIALES	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> OTROS (especifique):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tipos de corrosión y elementos en los que esta presenta:

	I	II	III	IV	V	VI
UNIFORME	<input type="checkbox"/>					
PICADURAS	<input type="checkbox"/>					
(a)	<input type="checkbox"/>					
(b)	<input type="checkbox"/>					

Otros (especifique):

- I. IMPULSOR
- II. CUBIERTA
- III. EJE
- IV. ANILLOS DE DESGASTE
- V. TUBERIA DE SUCCION
- VI. OTRA

[a] _____

[b] _____

(Especifique)

Observaciones: _____

9. MANTENIMIENTO

Tipo y frecuencia: _____

Observaciones: _____

10. INSTALACION

La instalacion real esta de acuerdo a lo propuesto por el diseaño o fabricante:

SI

NO

Si no corresponde, verificar de nuevo el tipo de problemas que se presentan en la operacion de bombeo (cavitacion, perdidas de presion, flujo, etc.)

Observaciones: _____

11. UNIDADES

Numero de bombas: _____ Disponibles _____ En operacion

Frecuencia de operacion de la bomba de reserva: _____

12. COMENTARIOS

ANEXO B

INTERVALO DE CONFIABILIDAD DE UNA DISTRIBUCION MUESTRAL T DE STUDENT

Muestra de la posición relativa de la importancia del daño por corrosión.

SERVICIO

AAC	AN	PPC	PQ
1	3	3	2
4	2	3	2
4	2	3	2
0		2	0
0		3	2
			2

AAC - Agua de alimentación a calderas
 AN - Aguas negras
 PPC - Pasta para papel y cartón
 PQ - Productos químicos

$$\mu = \bar{X} \pm T \left[\frac{S}{N^{1/2}} \right]$$

μ - Intervalo de confiabilidad poblacional
 \bar{X} - Media muestral
 T - Parámetro de la distribución T
 S - Desviación estándar de la muestra
 N - Número de elementos de la muestra

DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS

Xi	Fi
0	3
1	1
2	8
3	5
4	2

Xi - Posición relativa de la problemática de corrosión
 Fi - Frecuencia de aparición

$$\bar{X} = 1/N \sum_{i=1}^N F_i X_i$$

$$\bar{X} = \frac{3(0) + 1(1) + 8(2) + 5(3) + 2(4)}{3 + 1 + 8 + 5 + 2}$$

$$\bar{X} = 2.105$$

Varianza muestral

$$S^2 = 1/N \sum_{i=1}^N F_i (X_i - \bar{X})^2$$

$$S^2 = 1/19 \{ 3(-2.105)^2 + 1(-1.105)^2 + 8(-0.105)^2 + 5(0.895)^2 + 2(1.895)^2 \}$$

$$S^2 = 1.3573$$

$$S = 1.1650$$

Sí el nivel de confianza $\gamma = 80\%$, entonces el nivel de significancia es $\alpha = 0.20$, por lo que:

$$T \text{ A CONDICION DE } \begin{matrix} \alpha/2 = 0.1 \\ \text{GL} = N-1 = 18 \end{matrix} \quad T_{1-\alpha/2} = 1.330$$

$$\mu = 2.105 \pm 1.330 (1.165 / 19^{1/2})$$

$$\mu = 2.105 \pm 0.335$$

$$\mu = 2.105 \pm 16.86\%$$

ANEXO C

RELACION DE FIGURAS:

- 1-1 Ensamble bomba centrífuga.
- 1-2 Relación aproximada entre la velocidad específica, forma del impulsor y eficiencia.
- 1-3 Curvas características y velocidad específica.
- 1-4 Velocidad específica y elevación de aspiración.
- 1-5 Velocidad específica y carga.
- 1-6 Motores de corriente alterna.
- 1-7 Unidades motrices para bombas centrífugas.
- 1-8 Términos de presión.
- 1-9 Velocidades en el impulsor.
- 1-10 Términos de carga y elevación.
- 1-11 Sistemas en función de la línea de succión.
- 1-12 Curvas características.
- 1-13 Curvas características tipo.
- 1-14 Carga neta positiva de succión.
- 1-15 Curva del sistema.
- 1-16 Tabla comercial de bombas centrífugas.
- 2-1 Corrosión electroquímica.
- 2-2 Formas de corrosión.
- 2-3 Serie electromotriz.
- 2-4 Serie galvánica.
- 2-5 Productos del petróleo crudo.
- 2-6 Efecto de la velocidad y temperatura sobre el proceso de corrosión.

- 2-7 Relación gráfica del proceso de corrosión.
- 2-8 Relación entre la energía de reacción y el progreso de la misma.
- 2-9 Proceso de corrosión en función de la concentración de los reactivos y productos de la reacción.
- 2-10 Relación de Tafel.
- 2-11 Diagrama de Evans.
- 3-1 Respuesta al cuestionario.
- 3-2 Grado académico de la persona entrevistada.
- 3-3 Construcción de la cubierta de la unidad de bombeo.
- 3-4 Número de etapas de la unidad de bombeo.
- 3-5 Construcción del impulsor de la unidad de bombeo.
- 3-6 Tipo de unidad empleada en el servicio de bombeo.
- 3-7 Tipo de succión de la unidad de bombeo.
- 3-8 Tipo de servicio proporcionado por la unidad de bombeo.
- 3-9 Promedio del empleo por mes de la unidad de bombeo.
- 3-10 Temperatura del fluido de operación.
- 3-11 Velocidad de operación en bombas centrífugas.
- 3-12 Frecuencia de las fallas en bombas centrífugas (1).
- 3-13 Frecuencia de las fallas en bombas centrífugas (2).
- 3-14 Medidas anticorrosivas empleadas en la unidad de bombeo
- 3-15 Formas de ataque en suministro a calderas.
- 3-16 Formas de ataque en aguas negras.
- 3-17 Formas de ataque manejando pasta para papel y cartón.
- 3-18 Formas de ataque manejando productos químicos.
- 3-19 Daño por corrosión en elementos de las bombas centrífugas.

- 3-20 Mantenimiento a la unidad de bombeo.
- 3-21 Instalación de la unidad de bombeo.
- 3-22 Unidades de bombeo disponibles.
- 3-23 Fallas en bombas centrífugas de alta velocidad.
- 3-24 Fallas en bombas centrífugas de baja velocidad.
- 3-25 Fallas considerando la velocidad de operación.
- 3-26 Fallas manejando fluidos con sólidos en suspensión.
- 3-27 Fallas manejando fluidos sin sólidos en suspensión.
- 3-28 Fallas manejando fluidos a temperatura ambiente.
- 3-29 Fallas manejando fluidos a temperatura menor a 100 C.
- 3-30 Fallas manejando fluidos a temperatura mayor a 100 C.
- 3-31 Tipos de corrosión considerando el material (1).
- 3-32 Tipos de corrosión considerando el material (2).
- 3-33 Tipos de corrosión considerando la velocidad de operación.
- 3-34 Tipos de corrosión considerando sólidos en suspensión.
- 3-35 Tipos de corrosión considerando la temperatura del fluido.

ANEXO D

GLOSARIO DE TÉRMINOS

@	Densidad
@l	Densidad del líquido
@v	Densidad del agua
ϕV	Gradiente de velocidad
μ	Viscosidad dinámica
ν	Viscosidad cinemática
τ	Esfuerzo cortante
C	Rígidez a la flexión
C _{1v}	Proyección de la velocidad absoluta sobre la periférica a la entrada del impulsor
C _{2v}	Proyección de la velocidad absoluta sobre la periférica a la salida del impulsor
CPNS	Carga neta positiva de succión
E	Eficiencia de la unidad de bombeo
g	Aceleración de la gravedad
GS	Gravedad específica
H	Carga hidráulica
H _f	Carga debida a la fricción o pérdidas por fricción
H _s	Carga estática en la línea de succión
H _t	Carga hidráulica teórica
H _u	Carga hidráulica útil
M	Par de torsión
n	Velocidad de operación
N	Potencia
N _a	Potencia de accionamiento
N _i	Potencia interna

Ns	Velocidad específica
Nu	Potencia útil
NPSH	Carga neta positiva de succión
NPSH _d	Carga neta positiva de succión disponible
NPSH _r	Carga neta positiva de succión requerida
p _m	Pérdidas mecánicas
pH	Índice del contenido de iones hidrógeno
P	Presión
P ₁	Presión de entrada (P _E)
P ₂	Presión de salida (P _S)
P _a	Presión en el abastecimiento de succión
P _v	Presión de vapor
Q	Capacidad de la unidad de bombeo
T	Temperatura
U ₁	Velocidad periférica a la entrada del impulsor
U ₂	Velocidad periférica a la salida del impulsor
V ₁	Velocidad del fluido a la entrada de la unidad de bombeo
V ₂	Velocidad del fluido a la salida de la unidad de bombeo
w	Velocidad angular
W	Peso
W _n	Frecuencia natural
Y	Energía
Z ₁	Distancia entre el nivel de referencia y el de succión
Z ₂	Distancia entre el nivel de referencia y el de descarga

**REFERENCIAS
BIBLIOGRAFICAS**

1. Acosta A. J.
"CAVITATION AND FLUID MACHINERY" 383-390.
Cavitation C267/74
USA 1974.
2. Aguilar Rodríguez Martiniano
CRITERIOS DE DISEÑO DE PLANTAS TERMoeLECTRICAS.
LIMUSA
1° Edición, Mexico 1981.
380 pp.
3. Aiche
CENTRIFUGAL PUMPS. NEWTONIAN LIQUIDS,
Instituto Americano de Ingenieros Químicos.
2° Edición, USA 1983.
22 pp.
4. Amparán R.-Aragón A.-Terán A.
DIAGNOSTICO INDUSTRIAL. SECTOR INDUSTRIAL DE BOMBAS
CENTRIFUGAS EN MEXICO.
Tesis de Licenciatura.
UNAM 1984.
92 pp.
5. Amstead B.H. - Begeman M.L.
PROCESOS DE MANUFACTURA. VERSION SI.
Compañía editorial continental, S.A.
7° Edición, Mexico 1981.
820 pp.
6. Anibi
MEMORIA DEL CURSO DE SELECCION DE BOMBAS CENTRIFUGAS
PARA PROCESO.
Asociación nacional de industrias del bombeo e ingeniería.
1° Edición, Mexico.
293 pp.
7. Anibi
SELECCION Y OPERACION DE BOMBAS CENTRIFUGAS.
Curso II,
Asociación nacional de industrias del bombeo e ingeniería.
1° Edición, Mexico 1985.
401 pp.

8. Asme
CENTRIFUGAL PUMPS. PERFORMANCE TEST CODES.
Sociedad Americana de Ingenieros Mecanicos.
USA 1973
34 pp.
9. Avila Mendoza - Genesca Llongueras
MAS ALLA DE LA HERRUMBRE.
Fondo de cultura económica, S.A.
1ª Edición, Mexico 1986.
110 pp.
10. Avila Mendoza - Genesca Llongueras
"CORROSION Y PROTECCION EN LA INDUSTRIA QUIMICA
MEXICANA" 103-112
Ciencia y desarrollo. CONACYT
No. 64 Año XI, Mexico Sep-Oct 1985.
11. Avila Mendoza- Genesca Llongueras
"CORROSION METALICA. SIGNIFICADO ECONOMICO Y SOCIAL"
47-49
Información científica y tecnológica. CONACYT.
Vol.10 no.37, Mexico Febrero 1988.
12. Avner Sidney H.
INTRODUCCION A LA METALURGIA FISICA.
McGraw Hill
2ª Edición, Mexico 1979
695 pp.
13. Bautista Mendez I.
ESTUDIO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CORROSION,
PROTECCION CATODICA Y CUBIERTAS PROTECTORAS INORGANICAS
Y ORGANICAS.
Tesis de Licenciatura.
UNAM 1982.
190 pp.
14. Bonnin Jacques R.
"THERMODYNAMIC EFFECTS IN CAVITATION" 355-390
Cavitation C186/74
USA 1974.

15. Chanterreau J.
CORROSION BACTERIANA.
Limusa
1° Edición, Mexico 1985.
212 pp.
16. Coad William J.
"CENTRIFUGAL PUMPS: CONSTRUCTION AND APPLICATION"
124-129
Heating/Piping/Air conditioning.
USA, Septiembre 1981.
17. De Parres Jose L.
MAQUINAS HIDRAULICAS.
Tesis Regendiz.
4° Edición, Mexico 1966.
451 pp.
18. Escuela Gráfica Salesiana
EL PAPEL. HISTORIA, SU FABRICACION, SU USO.
Barcelona-Sarria
84 pp.
19. Ferrero H. José
MANUAL DE BOMBAS CENTRIFUGAS.
Alhambra, S.A.
1° Edición, Madrid 1969.
168 pp.
20. Flores Cortes - Bautista J.
CURSO INTERNACIONAL DE ANALISIS DE FALLAS.
Instituto Mexicano del Petróleo.
1° Edición, Mexico 1986.
250 pp.
21. Flores M. Luis
CURSO DE INGENIERIA DE PROYECTO EN SISTEMAS DE TUBERIA:
CORROSION EN SISTEMAS DE TUBERIA.
Instituto Mexicano del Petróleo.
1° Edición, Mexico 1981.
167 pp.
22. Florjancic - Weber
"METALLURGICAL CONSIDERATIONS IN THE DESIGN OF PUMPS
WITH HIGH FLOW VELOCITIES" 87-104
Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
USA, 1981.
17 pp.

23. Focke Rodolfo J.
BOMBAS ROTATIVAS.
Ediciones Libreria del Colegio.
1ª Edición, Argentina 1952.
460 pp.
24. Fontana Mars - Greene Norbert
CORROSION ENGINEERING.
McGraw Hill
2ª Edición, USA 1978.
465 pp.
25. Genescá Llongueras
"PIERDE LA INDUSTRIA 3.1 BILLONES DE PESOS ANUALES POR
LA CORROSION"
El Nacional, Sección Económica.
Mexico 5 Junio 1988
26. Giles B. Cooke
"CORROSION" 851-912
U.T.H.E.A.
1ª Edición, 1962.
27. Hammit Frederick-Heyman Frank
"LIQUID-EROSION FAILURES" 160-167
Metals Handbook Vol.10
Sociedad Americana para Metales
8ª Edición, USA 1975.
28. Harris Church Austin
BOMBAS Y MAQUINAS SOPLANTES CENTRIFUGAS.
Reverte S.A.
1ª Edición, Barcelona 1951.
458 pp.
29. Heinz P. Bloch - Jhonson D. A.
"DOWNTIME PROMPTS UPGRADING OF CENTRIFUGAL PUMPS" 35-41
Chemical engineering.
Vol.92 No.24, USA Nov.25 1985.
- 30 Hicks Tyler G.
BOMBAS SU SELECCION Y SU APLICACION.
Compañía editorial continental, S.A.
1ª Edición, México 1960.
530 pp.

31. His
CENTRIFUGAL, ROTARY & RECIPROCATING PUMPS.
Instituto de Hidráulica de Estados Unidos.
30ª Edición, USA 1975.
328
32. Imiq
GUIA DE SELECCION DE MATERIALES PARA BOMBAS CENTRIFUGAS.
Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, A.C.
24 pp.
33. Inegi
ENCUESTA INDUSTRIAL MENSUAL. Cifras preliminares Octubre
1987.
Instituto Nacional de Estadística Geografía e
Informática.
Mexico 1988.
44 pp.
34. Inegi
RESULTADOS OPORTUNOS NACIONALES. Censos económicos 86.
Instituto Nacional de Estadística Geografía e
Informática.
Mexico 1987.
60 pp.
35. Ingeniería Sanitaria, S.S.A.
MANUAL DE SANEAMIENTO. AGUA, VIVIENDA Y DESECHOS.
Limusa
5ª Reimpresión, México 1988.
380 pp.
36. Jiménez de Cisneros Luis Ma.
MANUAL DE BOMBAS.
Blume, S.A.
1ª Edición, España 1977.
588 pp.
37. Karassik - Krutzsch - Fraser
MANUAL DE BOMBAS.
McGraw Hill
1ª Edición, 1976.
1112 pp.

38. Karassik Igor - Carter Roy
BOMBAS CENTRIFUGAS. SELECCION, OPERACION Y
MANTENIMIENTO.
Compañía editorial continental, S.A.
1ª Edición, Mexico 1966.
560 pp.
39. Karassik Igor J.
"TOMORROW'S CENTRIFUGAL PUMP" 247-251
Hydrocarbon Processing.
USA Septiembre 1977
40. Knowlton A.E.
MANUAL "STANDARD" DEL INGENIERO ELECTRICISTA. TOMO I.
Labor, S.A.
8ª Edición, España 1953.
1436 pp.
41. Kusmin B.A.- Samojojtski A.I.
METALURGIA, METALOGRAFIA Y MATERIALES DE CONSTRUCCION.
Mir Moscu
1ª Edición 1984.
304 pp.
42. Laddga G. Francisco
EL AGUA DE ENFRIAMIENTO EN CENTRALES TERMoeLECTRICAS DE
VAPOR.
Simposium sobre tratamiento de agua, CFE.
Mexico 1968.
41 pp.
43. Lana Sarrate I.- Albrecht K.
HIDRAULICA, MOTORES HIDRAULICOS Y BOMBAS.
Labor, S.A.
3ª Edición, España 1951.
458 pp.
44. Linchevski - Sobolevski
METALURGIA DE METALES FERROSOS.
Mir Moscu.
Traducción español 1983.
391 pp.

45. Mataix Claudio
MECANICA DE FLUIDOS Y MAQUINAS HIDRAULICAS.
Harla, S.A.
2° Edicion, Mexico 1982.
660 pp.
46. Mfm
MANUAL PARA OPERACION, MATENIMIENTO E INSTALACION DE
BOMBAS TURBINA PARA POZO PROFUNDO.
Manufaturera Fairbanks Morse, S.A
38 pp.
47. NOM
FUNCIONAMIENTO PARA BOMBAS CENTRIFUGAS.
Normas oficiales mexicanas
O 14100 1971
13 pp.
48. NOM
METODOS DE PRUEBA HIDRODINAMICA E HIDROSTATICA PARA
BOMBAS CENTRIFUGAS.
Normas oficiales mexicanas
O 14000 1972
15 pp.
49. Nom
NOMENCLATURA BOMBAS FLUJO RADIAL Y MIXTO.
Normas oficiales mexicanas
O 08100 1968
12 pp.
50. Nom
TERMINOLOGIA DE BOMBAS PARA EL MANEJO DE FLUIDOS.
Normas oficiales mexicanas
O 13900 1971
13 pp.
51. Nordel Eskel
TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA Y OTROS USOS.
Compañia editorial continental, S.A.
2° Edición, Mexico 1963.
641 pp.

52. Pemex
EL PETROLEO.
Gerencia de información y relaciones, PEMEX.
Mexico 1984.
139 pp.
53. Pérez de Mendoza Alfredo
"LOS POLIMEROS EN MEXICO" 351-360
Mexico. Julio 1969.
54. Rendón Gallegos J.
SOBRE LA ESTIMACION DE COSTOS PARA LA APLICACION DE
BOMBAS CENTRIFUGAS MANUFACTURADAS EN PLASTICO PARA
MANEJO DE CORROSIVOS EN LA INDUSTRIA MEXICANA.
Tesis de Licenciatura.
UNAM 1981.
229 pp.
55. Reyes Aguirre Miguel
MAQUINAS HIDRAULICAS.
Representaciones y servicios de ingeniería, A.C.
1ª Edición, Mexico 1965.
235 pp.
56. Rivera Gil Saúl
"POR CORROSION COSTOSAS PERDIDAS EN MEXICO" 12-15
Gaceta UNAM, Ciudad Universitaria.
No.2-267. Mexico CU Enero 18/88.
57. Sanidad de Nueva York
MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS.
Limusa
8ª Reimpresión, México 1986.
304 pp.
58. Servicios coordinados de salud pública en el Estado de
Mexico.
REQUISITOS SANITARIOS PARA ALBERCAS.
Secretaría de salubridad y asistencia.
6 pp.

59. Stepanoff A. J.
CENTRIFUGAL AND AXIAL FLOW PUMPS.
Jhon Wiley & Sons Inc.
2° Edición, USA
462 pp.
60. Sulzer
PUMPS FOR CONVENTIONAL POWER STATIONS.
Sulzer pump division
25 pp.
61. Terán R. - Villa L.
CURSO DE SELECCION Y CALCULO DE BOMBAS CENTRIFUGAS.
Instituto Mexicano del Petroleo.
1° Edición, Mexico 1980.
174 pp.
62. Todt Fritz
CORROSION Y PROTECCION.
Aguilar
1° Edición, España 1959.
1034 pp.
63. Uhlig Herbert H.
THE CORROSION HANDBOOK.
Jhon Wiley & Sons Inc.
1188 pp.
64. Viejo Zubicaray Manuel
BOMBAS: TEORIA, DISEÑO Y APLICACIONES.
Limusa.
2° Edición, México
290 pp.
65. West Jhon M.
CORROSION Y OXIDACION. FUNDAMENTOS.
Limusa
1° Edición, México 1986.
285 pp.
66. Whitten K.W. - Gailey K.D.
QUIMICA GENERAL.
Interamericana
1° Edición, Mexico 1985.
893 pp.