

7  
2e



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN.

“MONITOR ELECTRONICO DE FALLAS  
PARA MAQUINAS ROTATORIAS”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
(ELECTRICO-ELECTRONICO)

P R E S E N T A :  
MA. GUADALUPE BARRIENTOS TORRES

ASESOR DE TESIS: ING. J. J. RAMON MEJIA ROLDAN  
COASESOR DE TESIS: M. en C. ANTONIO S. ROJAS SALINAS

MÉXICO

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

271285



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

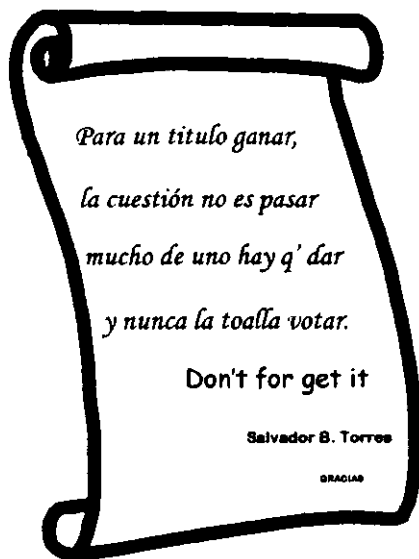
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

**DEDICADA PARA :**

*J.J.I.S.B.E.S*

*Pero especialmente a mi Madre quien con su amor, amistad y comprensión ha logrado realizar uno de sus más grandes anhelos, lograr que por lo menos uno de sus hijos obtuviera un título Universitario.*

GRACIAS.



**INDICE GENERAL**

TEMA	PÁGINA
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>I</b>
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>"TEORÍA DE LA VIBRACIÓN" .....</b>	<b>1</b>
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACIÓN.....	2
1.1.1 FRECUENCIA DE LA VIBRACIÓN .....	3
1.1.2 DESPLAZAMIENTO DE LA VIBRACIÓN .....	4
1.1.3 VELOCIDAD DE LA VIBRACIÓN .....	4
1.1.4 FASE DE LA VIBRACIÓN .....	6
1.1.5 MEDICIONES DE VIBRACIÓN EN ENERGÍA DE IMPULSOS.....	7
1.1.6 CARACTERÍSTICAS ADICIONALES .....	8
1.2 IMPORTANCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACIÓN.....	9
1.2.1 FRECUENCIA DE LA VIBRACIÓN .....	9
1.2.2 LA AMPLITUD DE LA VIBRACIÓN: DESPLAZAMIENTO, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN .....	11
1.2.2.1 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD .....	11
1.2.2.2 MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO .....	11
1.2.2.3 MEDICIÓN DE LA ACELERACIÓN .....	12
1.3 EVALUACIÓN DE LA SEVERIDAD DE LA VIBRACIÓN .....	12
1.3.1 GRÁFICAS GENERALES DE LA SEVERIDAD DE LA VIBRACIÓN.....	13

TEMA	PÁGINA
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>" CLASIFICACIÓN DE LA VIBRACIÓN" .....</b>	<b>14</b>
2.1 CAUSAS DE LA VIBRACIÓN .....	14
2.2 VIBRACIÓN DEBIDA A DESBALANCE .....	15
2.3 VIBRACIÓN DEBIDA A FALTA DE ALINEAMIENTO .....	16
2.4 VIBRACIÓN DEBIDA A EXCENTRICIDAD .....	17
2.5 RUIDO DE COJINETES .....	18
2.5.1 RUIDO DE COJINETES DE BOLAS .....	18
2.6 VIBRACIÓN DEBIDA A RODAMIENTOS DE CHUMACERA DEFECTUOSOS.....	20
2.6.1 TORBELLINO DE ACEITE .....	20
2.6.2 TORBELLINO DE HISTÉRESIS .....	21
2.7 VIBRACIÓN MAGNÉTICA .....	22
2.8 RUIDO POR FRICCIÓN .....	23
2.9 VIBRACIÓN DEBIDA A AFLOJAMIENTO MECÁNICO .....	23
2.10 VIBRACIÓN A PROBLEMAS DE ENGRANAJES .....	24
2.11 RUIDO DE ESCOBILLAS .....	24
2.12 VIBRACIÓN DEBIDA A FALLAS ELÉCTRICAS .....	25
2.13 VIBRACIÓN DEBIDA A FUERZAS AERODINÁMICAS E HIDRÁULICAS .....	26
2.13.1 RUIDO DE ASPAS DE VENTILADORES .....	26
2.13.2 EFECTO SIRENA .....	26
2.14 FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACIÓN .....	27

TEMA

PÁGINA

**CAPITULO 3****"MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN" .....30**

3.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN .....30

3.2 TRANSDUCTORES SISMICOS DE VELOCIDAD .....31

3.3 TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD FIRECT-PROD DE VÁSTAGO  
DIRECTO.....32

3.4 TRANSDUCTORES SISMICOS DE VELOCIDAD (PIEZOELÉCTRICOS) .....33

3.5 ACELERÓMETROS .....34

3.6 TRANSDUCTOR DE PROXIMIDAD (DE NO CONTACTO) .....35

3.7 MÉTODOS DE MONTAJE .....37

3.8 SELECCIÓN DE UN TRANSDUCTOR .....38

3.8.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE UNA MÁQUINA .....38

3.8.2 PARÁMETROS DE MEDICIÓN .....38

3.8.3 GAMA DE FRECUENCIAS .....39

3.8.4 SELECCIÓN DE UN TRANSDUCTOR ESPECÍFICO .....40

3.9 FINALIDAD DE LA MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN .....40

3.10 TIPOS DE MONITOREO.....43

**CAPITULO 4****"DISEÑO ELECTRÓNICO DEL EQUIPO".....45**

4.1 DIAGRAMA A BLOQUES .....45

4.2 ACELERÓMETROS PIEZOELÉCTRICO .....46

4.3 AMPLIFICADOR DE CARGA .....46

4.4 FILTROS .....46

TEMA	PÁGINA
4.4.1 FILTRO PASA-BANDA .....	48
4.4.2 FILTRO PASA-BANDA CONTROLADO DIGITALMENTE .....	52
4.5 OSCILADOR DE FRECUENCIA VARIABLE .....	56
4.6 CONVERTIDOR RMS A CORRIENTE DIRECTA-cd .....	59
4.6.1 CONVERTIDOR RMS .....	60
4.6.2 DISEÑO DEL CONVERTIDOR RMS-CD.....	64
4.6.2.1 RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA .....	66
4.6.2.2 INTEGRADOR SUMADOR .....	69
4.7 COMPARADORES DE VOLTAJE .....	73
4.7.1 SELECCIÓN DE LOS NIVELES DE REFERENCIA Y ALARMAS .....	75
4.8 SENSOR DE ROTACIÓN .....	80
4.8.1 CONVERTIDOR DE FRECUENCIA A VOLTAJE .....	82
4.8.2 LECTOR DIGITAL .....	84

**CAPITULO 5**

**"DIAGRAMAS ELÉCTRICOS Y CIRCUITOS IMPRESOS "**

5.1 DIAGRAMAS ELÉCTRICOS .....	93
5.2 CIRCUITOS IMPRESOS .....	96

**CAPITULO 6**

**"PRUEBAS DE OPERACIÓN EN LABORATORIO Y CAMPO"**

6.1 PRUEBA DE OPERACIÓN EN LABORATORIO .....	97
6.2 PRUEBA DE OPERACIÓN EN CAMPO .....	100

<b>TEMA</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>103</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>104</b>
<b>ANEXO 1</b>	
<b>ANEXO 2</b>	



# INTRODUCCION

## INTRODUCCIÓN

Desde los años 50's, la medición y el análisis de las vibraciones se ha convertido en una técnica sumamente útil para controlar el estado de las máquinas en general. Existen niveles de vibración que se consideran como normales o inherentes. Sin embargo, cuando la vibración de la máquina, aumenta por encima de los límites establecidos, la razón es la existencia de algún problema mecánico. Los niveles de vibración no aumentan ni se tornan excesivos sin que haya un motivo. Hay algo que la está causando un desbalance, engranajes o rodamientos desgastados, holgura de piezas, etc.

Las vibraciones mecánicas, tienen amplitud y frecuencia específica, lo que permite identificar el problema con certeza simplemente midiendo y analizando dichas características.

El análisis de formas de onda, espectros, órbitas y medidas de fase, son solo algunas de las técnicas de monitoreo, utilizadas por los analistas de máquinas para detectar averías en los sistemas rotatorios. Sin embargo, el análisis frecuencial de señales ofrece mayor información que otros métodos no pueden ofrecer, este método es una herramienta primordial para el funcionamiento del "Monitor electrónico de fallas para máquinas rotatorias", donde la señal de vibración generada por una máquina rotatoria es detectada por un sensor de vibraciones, la señal generada es transformada a señal de voltaje, ésta es filtrada a la frecuencia característica de una falla, la señal filtrada es convertida a un nivel **rms** (root mean square), un nivel **rms** es tomado como nivel de referencia cuando la máquina esta trabajando en condiciones normales de operación y es comparado con otros niveles **rms** preestablecidos, el monitor muestra con indicadores luminosos el progreso de la falla e indicando, de forma luminosa y auditiva los niveles de fallas superiores a las permitidas ó consideradas como niveles de alerta.

# CAPITULO 1

"TEORIA DE LA VIBRACION"

## CAPITULO 1

## “TEORIA DE LA VIBRACION”

La vibración es el termino que describe la oscilación de un sistema mecánico. La oscilación es la variación de la magnitud con respecto al tiempo. La vibración presente en un sistema mecánico se define midiendo las características de frecuencia y amplitud. La frecuencia es definida en términos de ciclos por unidad de tiempo y la magnitud en términos de amplitud pico.

El modo más sencillo para demostrar la vibración es seguir el movimiento de un peso suspendido en el extremo de un resorte, tal como se ilustra en la figura 1.1. Esto es típico de todas las máquinas puesto que también ellas tienen propiedades similares a peso y resorte.

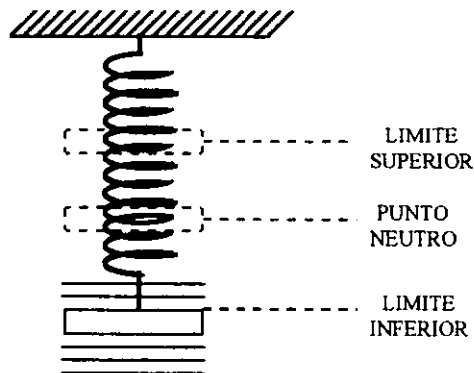


Figura 1.1.-Movimiento de un peso en vibración.

Hasta que no se aplique una fuerza al peso para producir su movimiento no habrá vibración. Al aplicar una fuerza ascendente, el peso se moverá hacia arriba, comprimiendo el resorte, al soltarlo, el peso caerá por debajo de su punto neutro hasta el límite inferior del recorrido en

cuyo punto el resorte detendrá al peso. Este emprenderá inmediatamente el recorrido hacia arriba pasando por el punto neutro hasta llegar al límite superior del movimiento y de vuelta otra vez por el punto neutro. Este movimiento seguirá exactamente de la misma manera mientras quede aplicada la fuerza. Por lo tanto, la vibración es simplemente el movimiento de una máquina o pieza desde su posición de reposo.

Independientemente del tipo y la causa, la vibración es indudablemente una fuerza que cambia de dirección o intensidad y las características consiguientes serán determinadas en base al modo en que se generan las fuerzas. Es por ello que cada causa de vibración tiene sus propias características individuales.

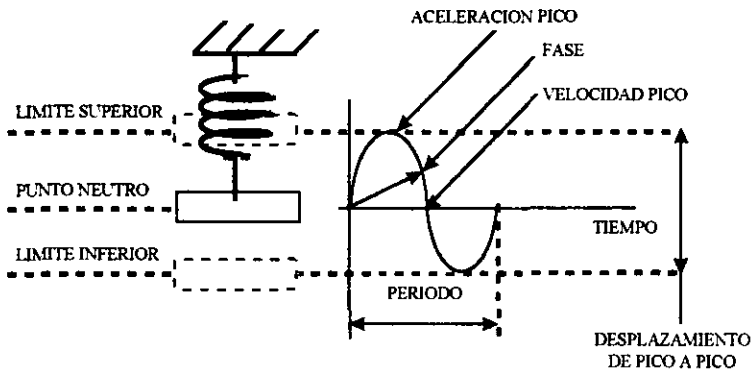
## 1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACIÓN.

La condición de una máquina y sus problemas mecánicos se definen midiendo las características de su vibración. Entre las características más importantes se encuentran las siguientes:

- Frecuencia
- Desplazamiento
- Velocidad
- Aceleración
- Fase
- Energía de impulsos o Spike Energy

Las características de la vibración causada por desplazamiento, velocidad y aceleración son medidas para poder determinar la severidad de la vibración. Estas características son a menudo definidas como *amplitud de la vibración*.

Con referencia al peso suspendido de un resorte, podemos estudiar las características de la vibración trazando un gráfico del movimiento del peso en función del tiempo, figura 1.2.



**Figura 1.2.-** Gráfico del movimiento del peso en función del tiempo.

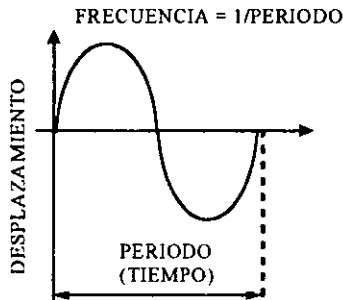
El movimiento del peso desde su punto neutro hasta el límite superior del recorrido, de vuelta a través del punto neutro hasta el límite inferior del recorrido, y su regreso al punto neutro, representa un ciclo de movimiento (figura 1.2) y cuenta con todas las características necesarias para medir la vibración. El movimiento continuo del peso sencillamente repetirá dichas características.

### 1.1.1 FRECUENCIA DE LA VIBRACIÓN.

La cantidad de tiempo requerida para llevar acabo un ciclo completo de un espectro de vibración se llama **periodo de vibración**, figura 1.3. Si una máquina realiza un ciclo completo de vibración en una sexagésima de segundo (1/60), se dice que el periodo de vibración es igual a un sexagésimo de segundo(1/60).

La frecuencia de la vibración es la medida de la cantidad de ciclos completos que acontecen en un periodo de tiempo específico. La relación entre la frecuencia y el periodo de un patrón de vibración es expresada mediante la siguiente formula:

$$\text{frecuencia} = 1/\text{periodo} \quad \text{cpm (ciclos por minuto)}$$



**Figura 1.3.-** Período de un patrón de vibración.

El poder especificar la frecuencia de la vibración en términos de cpm facilita la relación entre dicha característica y otro dato importante de los equipos rotativos las rpm, es decir la cantidad de revoluciones por minuto.

Otro modo de especificar la frecuencia, es en términos de cantidad de ciclos por segundo, o sea en hertz (Hz). Puesto que un Hz es igual a 60 cpm.

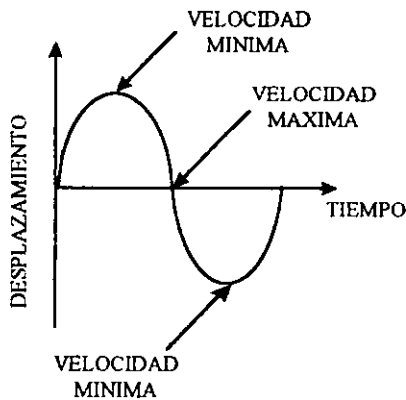
### 1.1.2 DESPLAZAMIENTO DE LA VIBRACIÓN (PICO A PICO).

La distancia total recorrida por la pieza vibrante de uno a otro límite externo del recorrido se conoce como **desplazamiento de pico a pico**. El desplazamiento de la vibración de pico a pico se expresa generalmente en milésimas de pulgadas o mils ( 0.001 pulg). Según las unidades de medida del sistema métrico, también se expresa en micrones, donde 1 micrón es igual a una milésima de milímetro (0, 001 mm).

### 1.1.3 VELOCIDAD DE LA VIBRACIÓN (VALOR DE PICO).

El peso vibrante, de la figura 1.4, se mueve a cierta velocidad. La velocidad del peso cambia constantemente. Al llegar al límite superior del movimiento la velocidad es cero dado que el

peso se detiene antes de proceder en la dirección opuesta, alcanzando el valor máximo al pasar el peso por su punto neutro. La velocidad del movimiento es indudablemente una característica de la vibración, pero, considerando que cambia constantemente durante el ciclo, para la medición se selecciona la velocidad de pico más elevada. Cuando se utilizan las unidades de medida del sistema inglés, la velocidad de la vibración se expresa como *valor de pico en pulgadas por segundo*, mientras si se emplean unidades del sistema métrico se expresará como *valor de pico en milímetros por segundo*.



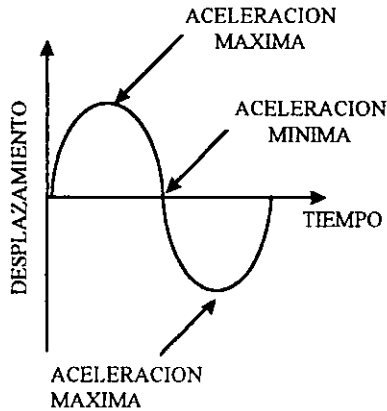
**Figura 1.4.-** Velocidad de un objeto vibrante.

Al explicar la velocidad de la vibración se mencionó que la velocidad de la pieza alcanza un valor cero al llegar a los límites extremos del recorrido. Desde luego, cada vez que la pieza se detiene al final del recorrido tiene que acelerar para adquirir velocidad mientras se dirige hacia el otro extremo. Desde el punto de vista técnico, **la aceleración** es el coeficiente de cambio de velocidad.

Con referencia al gráfico de movimiento representado en la Figura 1.5, la aceleración de la pieza alcanza su valor máximo en el límite extremo del recorrido donde la velocidad es cero. A medida que aumente la velocidad, disminuye la aceleración. En el punto neutro, la



velocidad alcanza su valor máximo mientras que la aceleración es cero. Cuando la pieza pasa por el punto neutro comienza a “desacelerar “ a medida que se acerca al otro extremo del recorrido, la aceleración alcanza su valor máximo.



**Figura 1.5.-Aceleración de un objeto vibrante.**

La aceleración de la vibración normalmente se expresa como valor de pico en g siendo g la aceleración generada por la fuerza de gravedad en la superficie terrestre. Por convenio internacional ha sido escogido el valor de  $980,665 \text{ cm/seg.}^2$  ( $386,087 \text{ pulg./seg.}^2$ , o bien,  $32,1739 \text{ pies/seg.}^2$ ) como aceleración standard debida a la gravedad.

#### **1.1.4 FASE DE LA VIBRACIÓN.**

**La fase de la vibración se define como, la posición de una pieza vibrante en un momento dado con referencia a un punto fijo u otra pieza vibrante.**

En el sentido práctico, las mediciones de fase a menudo ofrecen un modo conveniente para comparar un movimiento vibratorio con otro, o para determinar el tipo de vibración de una pieza en relación a otra. En la figura 1.6, se tienen dos pesos que vibran con la misma

frecuencia y desplazamiento; sin embargo, el peso "A" se encuentra en el límite superior del recorrido en el mismo momento en que el peso "B" se encuentra en el límite inferior. Podemos emplear la fase para expresar la comparación. Graficando un ciclo completo de movimiento de estos dos pesos y comenzando en el mismo instante dado, podemos notar que las picos del desplazamiento de pico están separadas  $180^\circ$ .

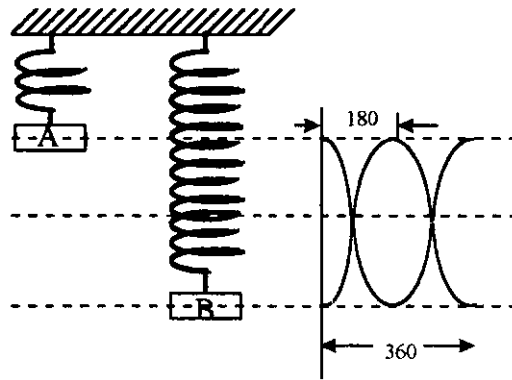


Figura 1.6.-Relación entre fases.

### 1.1.5 MEDICIONES DE VIBRACIÓN EN ENERGÍA DE IMPULSOS O SPIKE ENERGY.

Se trata de una cantidad más bien abstracta que no puede relacionarse inmediatamente con un cuadro de pesos en vibración.

Los parámetros de medición de Spike Energy incluyen impulsos de energía de vibración de muy breve duración, alta frecuencia y picos similares, que acontecen en una máquina como resultado de:

1. Defectos en la superficie de los elementos rodantes de rodamientos o engranajes.
2. Rozamiento, impacto y contacto entre metal y metal en máquinas rotativas.
3. Fugas de vapor o pérdidas de aire de alta presión.

#### 4. Cavitación causada por turbulencia del flujo en fluidos.

La energía de impulsos se expresa en *unidades g-SE.*

#### 1.1.6 CARACTERÍSTICAS ADICIONALES.

Existen varias características adicionales que facilitan la comprensión de la vibración de los equipos.

- *Vibración inducida:* es aquella causada por una fuerza vibratoria, como en el caso de desbalance, que obliga la máquina o estructura a vibrar a la misma frecuencia de la fuerza vibratoria.
- *Vibración espontánea:* es la vibración que se genera cuando se deja que una máquina o estructura vibre sin la presencia de fuerzas externas.
- *Frecuencia de inducción:* es la frecuencia de una vibración inducida.
- *Frecuencia natural:* Es la frecuencia a la cual vibrará una máquina o estructura cuando este sometida a una Vibración Espontánea. Se trata de la frecuencia a la cual la máquina prefiere vibrar. La mayoría de las máquinas y estructuras tienen muchas frecuencias naturales a las cuales vibrarán.
- *Frecuencia de resonancia:* es la frecuencia a la cual se produce la coincidencia entre una Frecuencia Natural y una Frecuencia de Inducción. Por lo general, la vibración aumenta a medida que la Frecuencia de Inducción se acerca a la Frecuencia Natural, alcanzando su punto máximo cuando ambas coinciden.
- *Velocidad crítica:* se trata de un caso especial de frecuencia de resonancia que se produce cuando la velocidad de rotación (rpm), es decir la frecuencia de inducción, de una

máquina coincide con una frecuencia natural de la misma. En la mayoría de los casos se trata de una frecuencia natural del eje que causa su vencimiento con grandes amplitudes de vibración consiguientes.

## **1.2. IMPORTANCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACIÓN.**

La importancia de las características de la vibración reside en el hecho de que las mismas se utilizan para detectar y describir el movimiento vibratorio indeseable de una máquina. Cada una de las características puede ser considerada como síntoma a utilizarse para diagnosticar el funcionamiento ineficiente de la máquina o un problema inminente.

### **1.2.1 FRECUENCIA DE LA VIBRACIÓN.**

Cuando se analiza la vibración de una máquina para localizar un problema en particular, es esencial saber la frecuencia de la vibración. Esto permitirá identificar el problema y la pieza responsable.

Las fuerzas que provocan la vibración son generadas por el movimiento rotativo de las piezas de la máquina. Debido a que dichas fuerzas cambian de dirección y amplitud de acuerdo a la velocidad de rotación de las piezas, se deduce que muchos problemas de vibración tengan frecuencias estrechamente relacionadas con la velocidad de rotación. Por lo tanto, será posible identificar con precisión la pieza defectuosa tomando nota de la frecuencia de su vibración y relacionando dicha frecuencia con la velocidad de rotación de las varias piezas de la máquina.

Es importante recordar que diferentes problemas crean diferentes frecuencias de vibración. La figura 1.7 muestra que la vibración de la mayoría de las máquinas contiene muchas frecuencias diferentes.

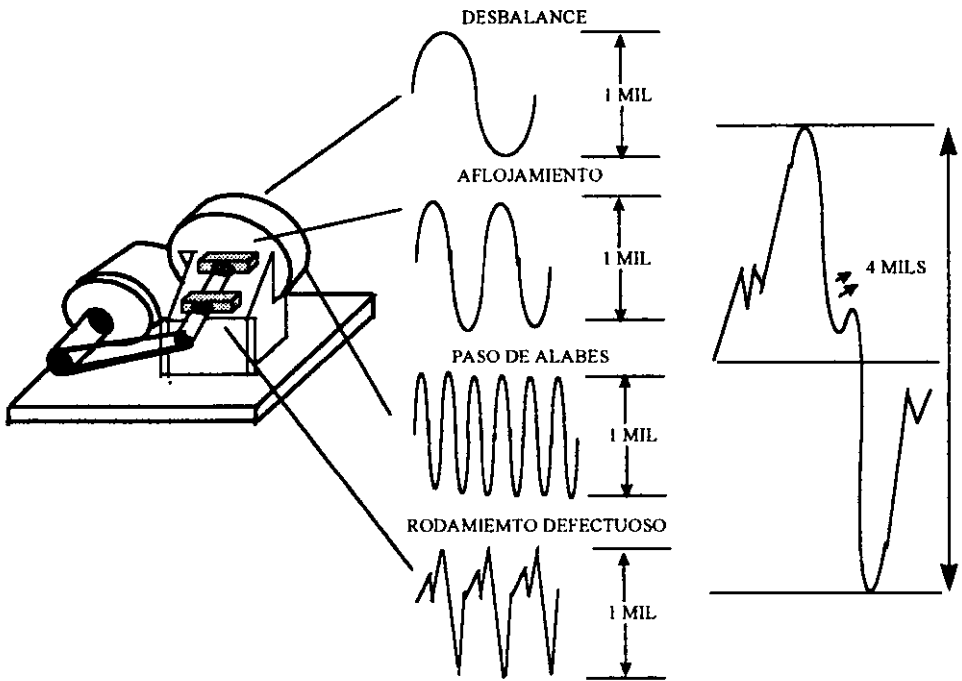


Figura 1.7.- Combinación de frecuencia de vibración.

Las señales de vibración a menudo incluyen frecuencias **armónicas**. La frecuencia armónica es un múltiplo exacto de la frecuencia fundamental o primaria. Normalmente la frecuencia fundamental se produce a 1 x rpm. Por ejemplo, es posible obtener niveles de vibración significantes a armónicas de 2 x rpm, 3 x rpm, e incluso más altas. En este caso la frecuencia a 1 x rpm se llama **primera armónica**, sin embargo, las frecuencias de las señales de vibración complejas no se limitan necesariamente a la frecuencia fundamental y sus armónicas.

Aun cuando todas las frecuencias de una señal de vibración compleja son importantes para poder analizar los problemas de las máquinas, dos de ellas son importantes: **la frecuencia fundamental y la frecuencia dominante**, donde la frecuencia fundamental es aquella igual

a la velocidad de rotación del elemento rotativo - 1 x rpm. La frecuencia dominante es aquella que tiene mayor amplitud.

Es importante notar que la frecuencia fundamental y la frecuencia dominante no son siempre las mismas. Donde la frecuencia dominante difiere de 1 x rpm (frecuencia fundamental), la frecuencia dominante es generalmente más indicativa de la presencia de problemas.

### **1.2.2 AMPLITUD DE LA VIBRACIÓN : (DESPLAZAMIENTO, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN)**

La amplitud de la vibración puede ser medida en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración.

De acuerdo con el funcionamiento de una máquina, la amplitud de la vibración es el primer indicador de la condición de la misma. Cuanto mayor es la amplitud tanto más grave será la vibración.

#### **1.2.2.1 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD.**

La velocidad de vibración está en relación directa con la severidad de la vibración. En terminos generales, las vibraciones que acontecen en la gama de frecuencias comprendidas entre 600 y 60,000 cpm se miden mejor utilizando la velocidad de la vibración.

#### **1.2.2.2 MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO.**

En condiciones de esfuerzos dinámicos, el desplazamiento puede ser mejor indicador de la severidad de la situación.

Generalmente, es en las bajas frecuencias en que el desplazamiento puede ser el mejor indicador de la severidad de la vibración ; típicamente, en la gama de frecuencias por debajo de los 600 cpm.

### **1.2.2.3 MEDICIÓN DE LA ACELERACION.**

La aceleración está estrechamente relacionada con la fuerza, y fuerzas relativamente significantes pueden presentarse a altas frecuencias, aunque el desplazamiento y la velocidad sean mínimas.

A las frecuencias mayores de 60,000 cpm, la aceleración puede ser el mejor indicador de la severidad de la vibración.

## **1.3 EVALUACIÓN DE LA SEVERIDAD DE LA VIBRACIÓN.**

Puesto que la amplitud de la vibración es una medida de la gravedad del problema para una máquina, la pregunta siguiente debería ser ¿qué cantidad de vibración se considera excesiva? Para responder a esta pregunta es importante no olvidar que el objetivo es usar el control de la vibración para detectar los problemas en su etapa inicial y poder programar el procedimiento de corrección adecuado.

No hay cifras significativas para la selección de un límite de vibración que, si se sobrepasa, tendría como resultado una rotura inmediata de la máquina. Los eventos que rodean el desarrollo de una máquina son demasiados complejos para poder establecer límites confiables. Por otra parte, hay que tener una indicación general de la condición de las máquinas, que pueden ser evaluadas en términos de la amplitud de la vibración.

### **1.3.1 GRÁFICOS GENERALES DE LA SEVERIDAD DE LA VIBRACIÓN.**

El gráfico de severidad de la vibración que aparece en la figura 1.8 es un ejemplo de lo que puede ser utilizado como guía general para determinar la condición de una máquina. En este gráfico, el eje horizontal está calibrado en términos de frecuencia de la vibración, y el eje vertical en términos de desplazamiento. La zona entre las líneas diagonales representa varios

niveles de severidad de la vibración, desde EXTREMADAMENTE SUAVE hasta MUY RUDO.

Por ejemplo, si se mide una amplitud de desplazamiento de 0,30 mills de pulgada, pico a pico, a una frecuencia de 3,600 cpm, en el punto de cruce de estos dos valores en el gráfico se verá que la máquina está funcionando en la gama de niveles buenos.

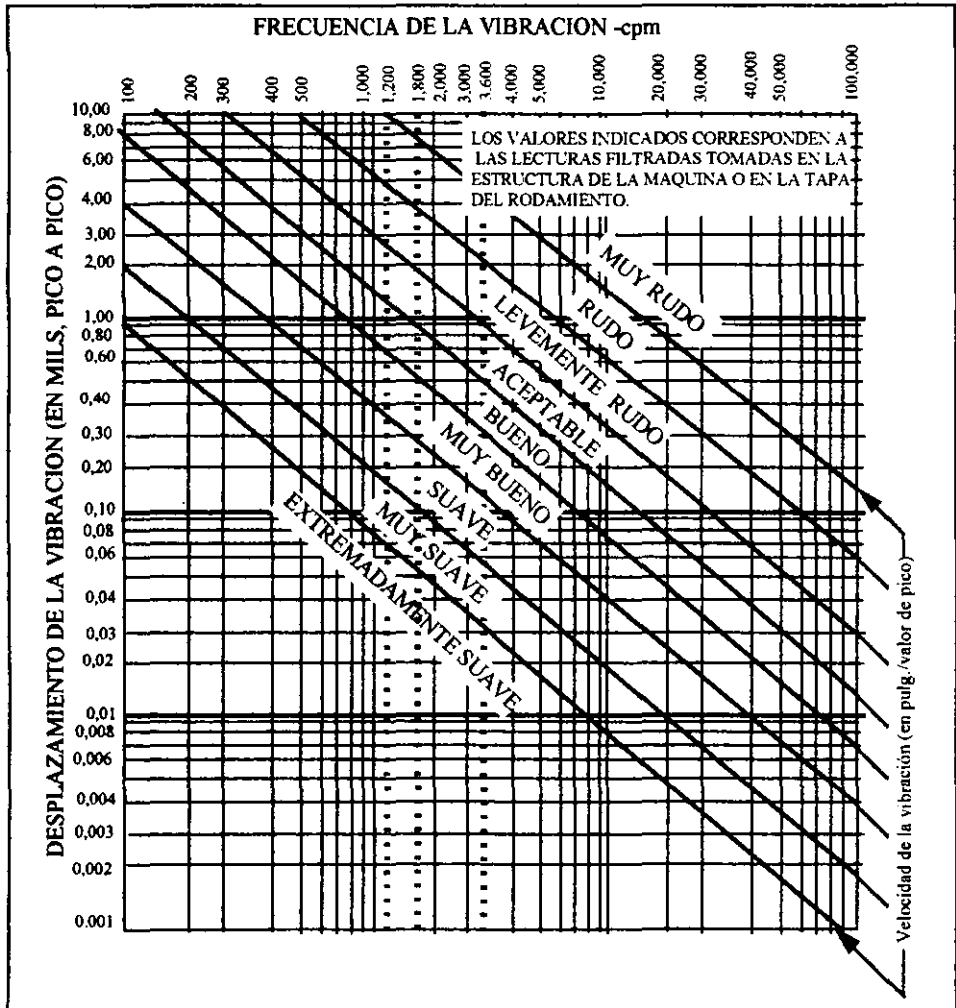


Figura 1.8.-Gráfico de severidad de la vibración



# **CAPITULO 2**

**"CLASIFICACION DE LA  
VIBRACION"**

## CAPITULO 2

### “CLASIFICACION DE LA VIBRACION”

**L**a vibración se puede dividir en: vibración magnética, vibración por fricción del aire y vibración mecánica, según sea su fuente. La vibración magnética tiene componentes de tono agudo de una sola frecuencia en la gama de alta frecuencia.

La vibración por fricción del aire esta en casi todo el ancho de banda, pero también pueden aparecer componentes de una sola frecuencia relacionados con los volúmenes resonantes dentro de la armazón del motor, el flujo de aire de ventilación a través o sobre el motor, el número de aspas del ventilador o un efecto de sirena que ocasionan las barras del rotor cuando interrumpen en forma periódica el flujo de aire.

Hay muchas vibraciones mecánicas provenientes de los cojinetes o chumaceras y se pueden detectar. Por ejemplo, si las piezas de los cojinetes están deformadas o si hay holguras excesivas que permiten el movimiento axial del eje.

El desbalanceo o las fuerzas magnéticas pueden excitar frecuencias naturales de la estructura del motor que irradian el ruido del aire circundante.

#### 2.1 CAUSAS DE LA VIBRACIÓN.

La causa de la vibración reside principalmente en los problemas mecánicos de una máquina. A continuación se presenta una lista de los problemas más comunes que producen vibración:

- Desbalance de las piezas rotativas
- Falta de alineación de acoplamientos y rodamientos

- Ejes vencidos
- Engranajes desgastados, excéntricos o dañados
- Bandas o cadenas de transmisión en mala condición
- Rodamientos del tipo de antifricción- deteriorados
- Desviaciones del par de torsión
- Fuerzas electromagnéticas
- Fuerzas aerodinámicas
- Fuerzas hidráulicas
- Aflojamiento
- Rozamiento
- Resonancia

## **2.2 VIBRACIÓN DEBIDA A DESBALANCE.**

El desbalance de la maquinaria es una de las causas más comunes de la vibración. En muchos casos, los datos arrojados por un estado de desbalance indican:

1. La frecuencia de vibración se manifiesta a 1x las rpm de la pieza desbalanceada.
2. La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance.
3. La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición, horizontal o vertical (en la máquinas con ejes horizontales).
4. El análisis de fase indica lecturas de fase estables.

Otro punto que hay que considerar es que el desbalance de un rotor saliente a menudo tiene como resultado una gran amplitud de la vibración en sentido axial, al mismo tiempo que en sentido radial. También hay diferentes tipos de máquinas que tienen inherentemente alta vibración axial. Las turbinas de vapor, gas y algunos tipos de compresores rotativos pueden tener elevada vibración axial originada por las reacciones al empuje. De manera que no se debe eliminar el desbalance como una causa probable de vibración solamente en base al

hecho que la mayoría de las situaciones en las cuales hay desbalance tienen mucha más vibración en sentido radial.

### 2.3 VIBRACIÓN DEBIDA A LA FALTA DE ALINEAMIENTO.

Los problemas ocasionados por falta de alineamiento son casi tan comunes como aquellos debidos a desbalance. A pesar de los rodamientos “autoalineables” y de los acoplamientos flexibles, es difícil alinear dos ejes y sus rodamientos de manera que no se originen fuerzas que puedan crear vibración. La figura 2.1, ilustra los tres tipos básicos de falta de alineamiento en el acoplamiento: angular, en paralelo y una combinación de ambos.

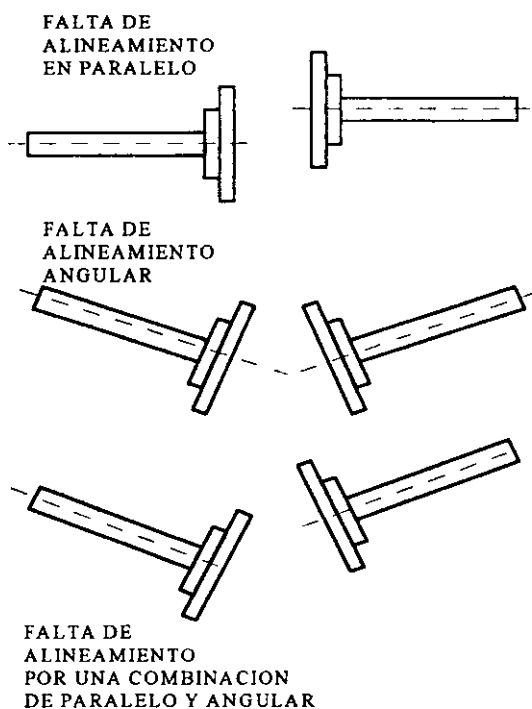


Figura 2.1.-Tipos básicos de falta de alineamiento.

En la mayoría de los casos, los datos derivados de una condición de falta de alineamiento indican lo siguiente:

1. La frecuencia de vibración es de 1x rpm; 2x y 3x en los casos de una grave falta de alineamiento.
2. La amplitud de la vibración es proporcional a la falta de alineamiento.
3. La amplitud de la vibración puede ser alta también en sentido axial, además de radial.
4. El análisis de fase muestra lecturas de fases inestables.

La falta de alineamiento, aun con acoplamientos flexibles, produce fuerzas tanto radiales como axiales que, a su vez, producen vibraciones radiales y axiales. Cuanto mayor sea la vibración, peor será el problema. Por lo tanto, uno de los indicios más importantes de problemas debidos a la falta de alineamiento y a ejes torcidos es la presencia de una elevada vibración en ambos sentidos, radial y axial.

## 2.4 VIBRACIÓN DEBIDA A EXCENTRICIDAD.

La excentricidad es otra de las causas comunes de vibración en la maquinaria rotativa. Excentricidad significa que la línea central del eje no es la misma línea central del rotor el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica. La figura 2.2 ilustra algunos dos de los tipos más comunes de excentricidad.

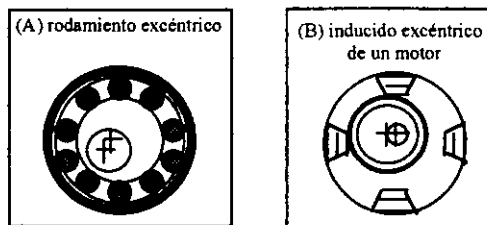


Figura 2.2.-Ejemplos más comunes de excentricidad.

La excentricidad es en realidad una fuente común de desbalances, y se debe a un mayor peso de un lado del centro de rotación que del otro. Los síntomas de excentricidad son generalmente idénticos a los de desbalance.

Por ejemplo, el diámetro interno de la pista interior del rodamiento antifricción figura 2.2-A no es concéntrico con la línea central geométrica de la pista interior. El resultado es un desbalance aparente de la pieza montada sobre dicho rodamiento.

En el caso de un inducido de motor eléctrico que esté excéntrico, Figura 2.2-B, el inducido en sí podría estar balanceado en cuanto a la distribución del peso del rotor. A pesar de eso, la excentricidad varía las interacciones magnéticas entre el inducido y los polos del motor, creando por lo tanto una vibración a  $1 \times$  las rpm entre el inducido y el estator.

### **2.5 RUIDO DE COJINETES.**

Los cojinetes y chumaceras que se utilizan en los motores de inducción son fuente de ruido y vibraciones debido al contacto deslizante o rotatorio de los componentes. Se suelen utilizar chumaceras y cojinetes de bolas; en las primeras hay contacto deslizante entre los componentes y en los segundos hay una combinación de contacto deslizante y rotatorio.

#### **2.5.1 RUIDO DE COJINETES DE BOLAS.**

El ruido excesivo de estos cojinetes pueden ser por bolas dispares, mal acabado en las superficies, traqueteo del retén de las bolas y por excentricidad, que ocasionan un ruido de golpeteo o excitación por resonancia de las cajas de cojinetes, placas desviadoras de aire y otras piezas que actúan como radiadores de ruido.

El ruido producido por alguna de esas fuentes se puede distinguir con facilidad. Por ejemplo, el ruido de los puntos brillantes por desgaste es un tono grave; el patinaje a bajas

temperaturas y con lubricación ocasiona destrucción de la superficie y ruido de alta frecuencia. Un ruido en la gama de frecuencia de 100 a 300 Hz se puede producir por la rotación de bolas o rodillos, y es característico de estos cojinetes.

La amplitud de la vibración dependerá de la gravedad de la falla del rodamiento. Además, los impactos momentáneos pueden excitar frecuencias de vibración naturales. Todas las máquinas tienen frecuencias naturales de vibración, asociadas con sus componentes estructurales, y dichas frecuencias pueden ser excitadas por impactos mecánicos, que es lo que sucede cuando los elementos rodantes de un rodamiento golpean los defectos existentes en la pista de deslizamiento. Esa vibración de frecuencia natural ocurre típicamente cuando llega a su cresta, en la gama de entre 10,000 y 100,000 cpm.

Las frecuencias discretas del ruido de los cojinetes de bolas se producen por irregularidades en sus componentes, y se pueden determinar con la configuración del cojinete y la velocidad del eje, si se conocen:

La frecuencia rotatoria  $n$  fundamental se aprecia con los mínimos desbalanceos o excentricidad de las pistas. Cualquier irregularidad de un elemento rotatorio o jaula ocasiona ruido con una frecuencia de los elementos rotatorios  $f_r$ .

La frecuencia de deslizamiento o rotación libre de un elemento es  $f_s$ .

Un punto áspero o una depresión de un elemento ocasiona una componente de frecuencia  $f_e$ , porque ese punto hace contacto alternado con las pistas interna y externa.

Otra frecuencia ocurre si hay irregularidad sobre la pista interna  $f_i$ .

La frecuencia debida a una irregularidad en la pista fija es  $f_o$ .

En el caso de que haya muchos puntos, las armónicas de  $f_i$  o de  $f_o$  serán más pronunciadas.

En la tabla 2.1 se observan las fórmulas para calcular la magnitud de la frecuencia de vibración correspondiente.

## **2.6 VIBRACIÓN DEBIDA A RODAMIENTOS DE CHUMACERA DEFECTUOSOS.**

Los motores de inducción se pueden equipar con chumaceras cuando se necesita baja intensidad de ruido o cuando predomina el ruido de cojinetes.

Las chumaceras no producen ruido molesto en el motor, salvo que estén desgastadas o inestables. Pero cuando existe una holgura excesiva (causada por desgastes debido a una acción de barrido o por erosión química), aflojamientos mecánicos (metal blanco suelto en el alojamiento), o problemas de lubricación, generalmente se producen elevados niveles de vibración.

A menudo se puede detectar un rodamiento de chumacera desgastado por “barrido” efectuando una comparación de las amplitudes de vibración horizontal y vertical. Las máquinas que están montadas sobre una estructura o cimentación rígidas revelarán, en condiciones normales, una amplitud de vibración ligeramente más alta en el sentido horizontal. Un rodamiento de chumacera desgastado dejará también el paso, a menudo, a una amplitud de vibración anormalmente elevada en el sentido vertical.

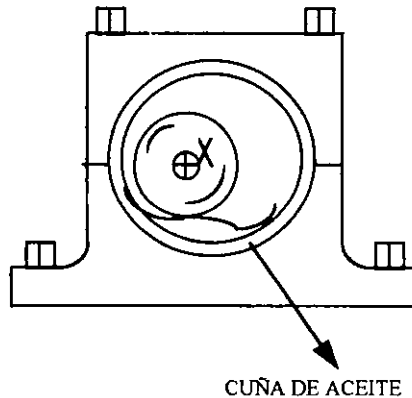
El golpeteo axial puede ser otra fuente de ruido de impacto. El golpeteo ocurre cuando el reborde del eje tiene oscilación axial y uno de sus extremos es la cara de la chumacera.

### **2.6.1 TORBELLINO DE ACEITE.**

Este tipo de vibración ocurre solamente en máquinas quipadas con rodamientos de chumacera lubricados a presión, y que funcionan a velocidades relativamente altas normalmente por encima de la segunda velocidad crítica del rotor.



La figura 2.3, ilustra la mecánica del torbellino de aceite. En condiciones de funcionamiento normal, el eje de la máquina se levanta un poquito contra el costado del rodamiento. El eje, que funciona en una posición excéntrica con respecto al centro del rodamiento, arrastra el aceite formando una “cuña”, creando de esta manera una película de aceite a presión como soporte de la carga.



**Figura 2.3.-**Torbellino de aceite.

La vibración debida a torbellinos de aceite a menudo es muy pronunciada, pero se conoce fácilmente por su frecuencia fuera de lo común. Dicha frecuencia es apenas de la mitad de velocidad de rotación (rpm) del eje, generalmente en el orden del 46 a 48% de las rpm del eje.

### **2.6.2 TORBELLINO DE HISTÉRESIS.**

Este tipo de vibración es muy similar a la vibración ocasionada por el torbellino de aceite, pero ocurre a frecuencias diferentes, cuando el rotor gira en la primera y la segunda velocidad crítica.

Un rotor que funcione por encima de la velocidad crítica tiende a flexionarse, o arquearse, en sentido opuesto del punto pesado de desbalance, la amortiguación interna debida a histéresis, o sea, la amortiguación de fricción, normalmente limita la deflexión a niveles aceptables. Sin embargo, cuando acontece un torbellino por histéresis, las fuerzas amortiguadoras se encuentran en realidad en fase con la deflexión, y por lo tanto, acrecentan la deflexión del rotor.

Cuando dicho rotor está funcionando por encima de la primera velocidad crítica pero por debajo de la segunda, el torbellino por histéresis ocurre a una frecuencia exactamente igual a la primera velocidad crítica del rotor.

Sin embargo, la vibración ocasionada por un torbellino de histéresis tendrá las mismas características que las ocasionadas por un torbellino de aceite cuando la máquina funcione a velocidades superiores a la segunda velocidad crítica del eje. Es decir, que una severa vibración se producirá a una frecuencia levemente menor que  $0.5x$  las rpm del rotor.

### 2.7 VIBRACIÓN MAGNÉTICA.

La vibración magnética en los motores de inducción tienen dos fuentes predominantes:

- 1) las ondas radiales de fuerza creadas por la densidad de flujo del entrehierro.
- 2) la expansión magnetostrictiva del hierro o acero del núcleo.

La frecuencia característica de este tipo de vibración *es el doble de la frecuencia de la línea*. La primera parte del ruido magnético la producen las fuerzas periódicas que hay principalmente en el entrehierro, entre el estator y el rotor. Estas fuerzas que son proporcionales al cuadrado de la densidad del flujo, producen componentes radiales que aparecen en las armónicas de la frecuencia de línea, y con frecuencias relacionadas con el deslizamiento y la frecuencia de la línea.

En los motores de inducción la fuente del ruido, además del zumbido peculiar, proviene del campo de fuerza de las armónicas básicas en las ranuras, la formula para calcular la frecuencia de vibración se observa en la tabla 2.1.

## **2.8 RUIDO POR FRICCIÓN.**

El ruido por fricción se produce por falta de lubricación entre dos superficies deslizantes, y lo causa una vibración del tipo de golpe fuerte que se debe a un contacto intermitente y rápido entre las superficies. El ruido en el punto de contacto es de alta frecuencia, como un silbido de aire; cuando la vibración por choque se transmite a un punto resonante en la estructura contigua, el ruido audible se podría llamar chillido. La frecuencia a la cual ocurre el ruido no se puede explicar con una ecuación, pero va en relación con el acabado de la superficie de las zonas que hacen contacto.

Una inadecuada lubricación, incluyendo falta de lubricación y el uso de lubricantes incorrectos, puede ocasionar problemas de vibración en un rodamiento de chumacera. En semejantes casos la lubricación inadecuada causa excesiva fricción entre el rodamiento estacionario y el eje rotante, y dicha fricción induce vibración en el rodamiento y en las demás piezas relacionadas. Este tipo de vibración se llama "dry whip, o sea latigazo seco.

La frecuencia de la vibración debida a latigazo seco generalmente es muy alta, y produce el sonido chillón característico de los rodamientos que están funcionando en seco. No es muy probable que dicha frecuencia sea algún múltiplo integral de las rpm del eje.

## **2.9 VIBRACIÓN DEBIDA A AFLOJAMIENTO MECÁNICO.**

El aflojamiento mecánico y la acción de golpeo resultante producen vibración a una frecuencia que a menudo es  $2x$ , y también múltiplos más elevados, de las rpm. La vibración

puede ser el resultado de pernos de montaje sueltos, de holgura excesiva en los rodamientos, o de fisuras en la estructura o en el pedestal de soporte, figura 2.4.

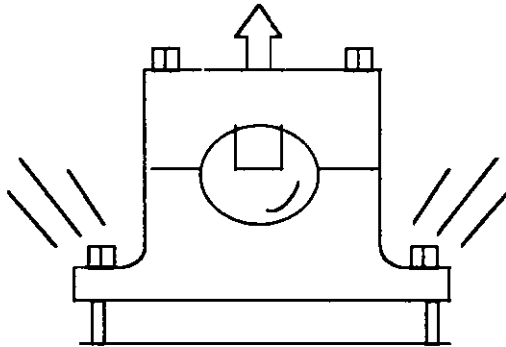


Figura 2.4.-Aflojamiento mecánico exterior.

## 2.10 VIBRACIÓN DEBIDA A PROBLEMAS DE ENGRANAJES.

La vibración que resulta de problemas de engranajes es de fácil identificación porque normalmente ocurre a una frecuencia igual a la frecuencia de engranaje, que es, la cantidad de dientes multiplicada por las rpm del engranaje que falla.

La amplitud y frecuencia de vibración debida a los engranajes pueden también parecer errática ocurre normalmente cuando un conjunto de engranajes está funcionando en condiciones de carga muy liviana.

## 2.11 RUIDO DE ESCOBILLAS.

Este ruido lo ocasiona el contacto deslizante de las escobillas contra un anillo colector o el conmutador. El ruido que producen las escobillas sobre un conmutador segmentado es mucho mayor que el de las escobillas que se deslizan contra un anillo colector. Las escobillas

producen un chillido de alta frecuencia por el deslizamiento, un ruido de descarga eléctrica o chisporroteo y cuando se emplean en conmutadores, se produce una frecuencia de delgas del conmutador, en la tabla 2.1 se muestra la formula para calcular la frecuencia de delgas  $f_d$ .

## 2.12 VIBRACIÓN DEBIDA A FALLAS ELÉCTRICAS.

La vibración de la maquinaria eléctrica, como motogeneradores y alternadores, puede ser de origen eléctrico. La vibración ocasionada por problemas eléctricos es normalmente el resultado de fuerzas magnéticas desiguales sobre el rotor o sobre el estator.

En líneas generales, la frecuencia de vibración resultante de los problemas de indole eléctrica será 1x las rpm, y por lo tanto se parecerá al desbalance. Una manera de verificar la presencia eventual de vibración eléctrica es observar el cambio de la amplitud de la vibración total en el instante en el cual se desconecta la corriente de esa unidad. Si la vibración desaparece en el mismo instante en que se desconecta la corriente, el problema con toda probabilidad será eléctrico. Por otra parte, si la amplitud de la vibración decrece sólo gradualmente después de haber cortado la corriente, el problema será probablemente de naturaleza mecánica.

Los problemas eléctricos en el caso de los motores de inducción pueden hacer que un medidor de vibración indique lecturas de amplitud oscilantes o pulsantes. Este tipo de vibración está relacionada con una característica intrínseca de los motores de inducción llamada frecuencia de deslizamiento. La frecuencia de deslizamiento es tan sólo la diferencia entre las rpm del rotor y la frecuencia eléctrica, o sincrónica, del campo magnético rotativo. La frecuencia sincrónica es siempre igual a la frecuencia de la corriente eléctrica de la línea de alimentación, o un submúltiplo de la frecuencia de línea que está alimentando el motor.

## 2.13 VIBRACIÓN DEBIDA A FUERZAS AERODINÁMICAS E HIDRÁULICAS.

Las máquinas que manejan fluidos, tales como aire, agua, gases y aceite, a menudo producirán vibraciones y ruido -cavitación, recirculación o turbulencia de flujo- generadas por la reacción de los álabes o aspas del impulsor al golpear los fluidos. Este tipo de vibración es bastante común en bombas y ventiladores, y se les identifica con facilidad por el hecho de que *la frecuencia de vibración es igual a la cantidad de álabes o aspas del impulsor multiplicadas por las rpm de la máquina.*

### 2.13.1 RUIDO DE ASPAS DE VENTILADORES.

Este ruido se debe a un impulso de aire cada vez que un aspa pasa frente a una parte estacionaria saliente o un punto de resonancia de onda estacionaria. La formula para calcular la frecuencia de aspas  $f_a$  se muestra en la tabla 2.1.

En los motores totalmente cerrados con ventiladores externos se produce frecuencias discretas con las aspas del ventilador, superpuestas en la intensidad del ruido de banda ancha.

### 2.13.2 EFECTO SIRENA.

En los motores abiertos con ductos radiales para aire en el rotor y el estator se pueden producir componentes de tono puro y ruido llevado por el aire, que son muy molestas. Las frecuencias suelen ser mayor de 1000 Hz y se llama efecto de sirena. El ruido en sí se produce con la interrupción repentina del flujo de aire en los ductos radiales en el rotor. La formula para calcular la frecuencia efecto sirena  $f_s$  se muestra en la tabla 2.1.

2.14 FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACIÓN.

FUENTE DE VIBRACIÓN	COMPONENTE QUE OCASIONA LA VIBRACIÓN	FRECUENCIAS DONDE OCURRE LA VIBRACIÓN (Hz)
Magnético	Ranuras del rotor y del estator.	$f_r = Rn$ $f_r = Rn + 2f$ $f_r = Rn = 2f$
Fricción del aire	Fuerzas aerodinám. e Hidráulicas Efecto sirena	$f_a = Nn$ $f_b = frecuencia de las aspas del ventilador$ $N = número de aspas del ventilador$ $n = velocidad de rotación del motor$ $f_s = Rn.$ $f_s = frec. efecto sirena$ $R = número de ranuras en el rotor$ $f_{s_2} = 2Rn$ $f_{s_2} = 2 \times f_s$
Mecánica	Cojinetes de bolas  Ruido de escobillas	$f_t = n/2 (1-d/E \cos B)$ $f_s = \frac{En}{2d(1-d/E)^2 \cos^2 B}$ $f_e = 2 f_s$ $f_i = N(n - f_t)$ $f_o = N f_t$ $f_d = Bn$

Tabla 2.1. Formulas para calcular la frecuencia de vibración

La tabla 2.2 resume las frecuencias características de vibración acuerdo al tipo de falla de la máquina rotatoria.

FRECUENCIA, EN TÉRMINOS DE RPM	CAUSAS MÁS PROBABLES	OTRAS CAUSAS POSIBLES Y OBSERVACIONES
1 x rpm	Desbalance	1) Chumaceras 2) Falta de alineamiento o eje torcido 3) Bandas en mal estado si las rpm son de la banda 4) Resonancia 5) Fuerzas recíprocas 6) Problemas eléctricos
2 x rpm	Aflojamiento mecánico	1) Falta de alineamiento en presencia de altas vibraciones axiales 2) Fuerzas recíprocas 3) Resonancia 4) Bandas en mal estado si 2x rpm de las bandas*
3 x rpm	Falta de alineamiento	Aflojamiento mecánico
Menos de 1 x rpm	Torbellino de aceite (menos de 0.5 x rpm)	1) Bandas de accionamiento 2) Vibración circunvecina 3) Resonancia Subarmónica 4) Vibración pulsante

**Tabla 2.2.-** Frecuencias características de fallas en máquinas rotatorias.



FRECUENCIA, EN TÉRMINOS DE RPM	CAUSAS MÁS PROBABLES	OTRAS CAUSAS POSIBLES Y OBSERVACIONES
1 x rpm o 1 ó 2 x la frecuencia sincróna (alimentación eléctrica)	Problemas eléctricos	Los problemas eléctricos comunes comprenden barras rotas en el rotor, rotores fuera de centro, desbalance entre fases en los sistemas múltiples, entrehierro no uniforme.
2 x la frecuencia sincróna	Pulsaciones de torque	Raro como problema, a menos que la resonancia esté en excitación.
Varias veces la velocidad de rotación (frecuencia relacionada con las armónicas).	Engranajes en mal estado Fuerzas aerodinámicas Fuerzas hidráulicas Aflojamiento mecánico Fuerzas recíprocas	Dientes de engranaje x rpm de engranaje en mal estado Cantidad de aspas de ventiladores x rpm Cantidad de álabes en rotor impulsor x rpm Puede acontecer a 2, 3, 4 y a veces mayores frecuencias armónicas en presencia de un elevado grado de aflojamiento.
Muy alta ocasionalmente varias veces las rpm (no relacionada con las armónicas)	Rodamientos antifricción en mal estado	1) La vibración de los cojinetes puede ser inestable en amplitud y frecuencia. 2) Cavitación, recirculación y turbulencia en flujo causan vibración al azar de alta frecuencia. 3) Lubricación incorrecta en el muñón de la chumacera (vibración excitada por la fricción). 4) Rozamiento.

Tabla 2.2.- Frecuencias características de fallas en máquinas rotatorias (continuación).

# CAPITULO 3

"MEDICION DE LA VIBRACION"

## CAPITULO 3

## “MEDICION DE LA VIBRACION”

## 3.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN.

Los instrumentos electrónicos utilizados para la medición de la vibración de los motores son clasificados, generalmente, como medidores, monitores y analizadores. Los medidores generalmente son portátiles o manuales, son usados para determinar el nivel general de la vibración en diversos puntos de una máquina. Los monitores, como el que se ilustra en la figura 3.1, sirven de forma muy similar para la misma finalidad que los medidores, pero se instalan permanente o semi-permanente, para proporcionar un monitoreo constante de la vibración de la máquina.

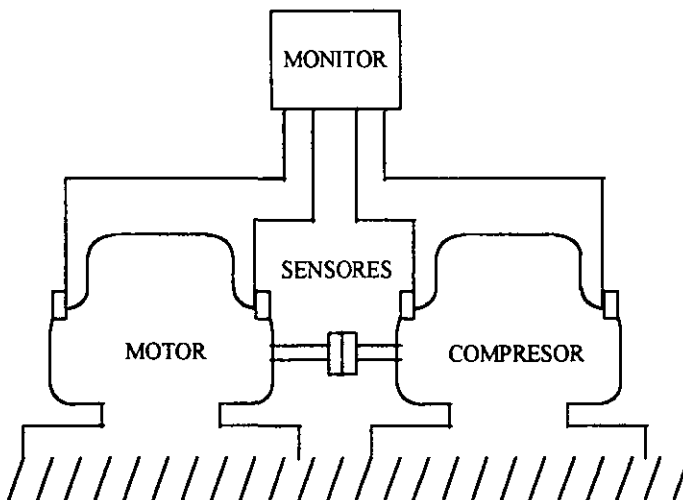


Figura 3.1.-Monitores de vibración.

Los analizadores de vibración pueden realizar las mismas funciones de los medidores y monitores, también pueden llevar a cabo operaciones más complejas. Por ejemplo, un analizador usa un filtro que puede ser sintonizado de manera de separar las frecuencias individuales de una forma de onda compleja, también pueden incluir una lámpara estroboscópica, que se usa en el análisis de fase y en balanceo dinámico.

Todos los medidores de vibración, monitores y analizadores usan un transductor de vibración, el cual a menudo es llamado transductor de vibración o sensor.

Independientemente del tipo de instrumento que se use para medir la vibración, la parte esencial del sistema de medición es el transductor. Un transductor es un dispositivo sensible que convierte una forma de energía en otra. El transductor de vibración convierte la vibración mecánica en una señal eléctrica.

Existen una gran variedad de transductores de vibración, de los cuales, examinaremos los tipos principales y determinaremos su funcionamiento y uso:

### **3.2 TRANSDUCTOR SISMICO DE VELOCIDAD.**

Los transductores de velocidad, responden directamente a la velocidad de la vibración. La mayoría de los instrumentos para la medición de la vibración están equipados para procesar las señales eléctricas generadas por un transductor de velocidad e indicar también el desplazamiento de la vibración. Teóricamente, es también posible convertir las señales de los transductores de velocidad en unidades de aceleración; sin embargo, en la práctica no es confiable.

La figura 3.2 ilustra un diagrama simplificado de un transductor sísmico de velocidad. El sistema consta de una bobina de alambre muy delgado, soportado por resortes suaves. Un imán permanente, asegurado fuertemente al estuche del transductor, provee un fuerte campo magnético alrededor de la bobina.

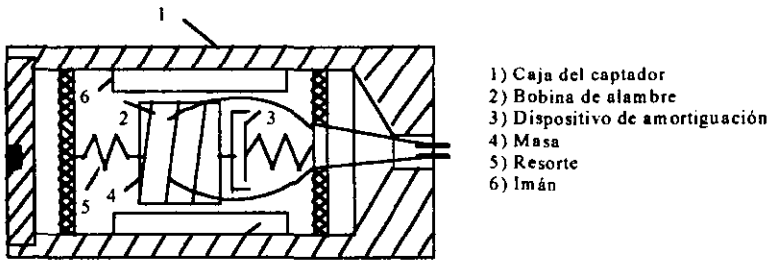


Figura 3.2.- Transductor sísmico de velocidad

### 3.3 TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD DIRECT-PROD DE VÁSTAGO DIRECTO.

Para medir la vibración de una pieza o estructura pequeña y liviana se utiliza un transductor "direct-prod, de vástago directo.

El funcionamiento de un transductor de vástago directo es idéntico al de un transductor sísmico de velocidad. Sin embargo, con el transductor de vástago directo, un vástago delgado sobresale a través del capavete del transductor, y está asegurado en un extremo directamente a la bobina móvil, figura 3.3.

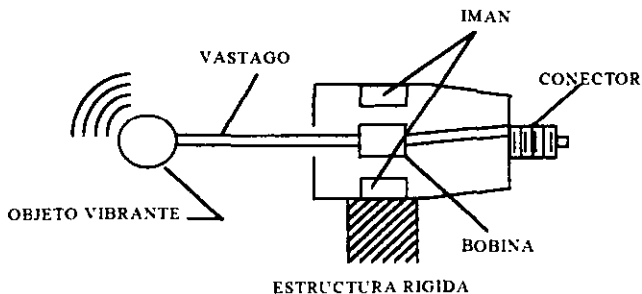


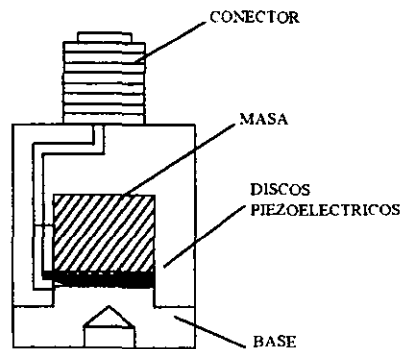
Figura 3.3.- Transductor de vástago directo.

Una de las ventajas del transductor sísmico de velocidad de vástago directo es que añade solamente el peso del vástago y de la bobina que se mueve a las piezas en vibración. Esto hace que el captador sea extremadamente útil con objetos pequeños y livianos, donde la masa intrínseca de un captador sísmico de velocidad estándar puede afectar la vibración misma.

### 3.4 TRANSDUCTORES SÍSMICOS DE VELOCIDAD (TIPO PIEZOELECTRICO).

Existe un segundo tipo de transductor que sirve para medir velocidad pero usa un diferente principio de funcionamiento. Se trata del transductor de velocidad piezoeléctrico. Estos transductores tienen una salida que es proporcional a la velocidad, pero no tienen partes móviles internas. Los esfuerzos debidos a las fuerzas vibratorias aplicadas al captador originan una carga eléctrica en una pieza de cristal o de cerámica especial, figura 3.4.

La carga eléctrica producido por el elemento piezoeléctrico es muy pequeña, por lo que la señal debe ser amplificada antes de poder medirla. Para lo cual es necesario contar con un Amplificador de carga incorporado.



**Figura 3.4.-**Transductor sísmico de velocidad piezoeléctrico.

### 3.5 ACELERÓMETROS.

Un acelerómetro es un dispositivo autogenerador, con una salida de tensión o carga proporcional a la aceleración de la vibración.

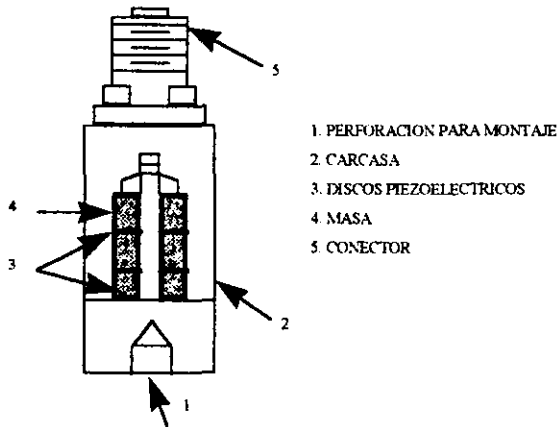
La aceleración es una medida del coeficiente ( o incremento) de cambio de la velocidad, y se expresa normalmente en términos “g”, siendo “g” la unidad de aceleración definida como la aceleración producida por la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra. El valor de la aceleración estándar debida a la gravedad ha sido establecido en  $9.81 \text{ m/seg}^2$  . La aceleración es una función del desplazamiento y la frecuencia al cuadrado. Como resultado, el acelerómetro es un instrumento extremadamente sensible a la vibración que ocurre a altas frecuencias. Esto hace que el acelerómetro sea particularmente útil para medir y analizar la vibración producida por engranajes y por rodamientos de elementos rodantes.

Las dimensiones reducidas y el poco peso de la mayor parte de los transductores de aceleración los hacen particularmente adecuados para las aplicaciones donde hay carencia de espacio y donde el peso del transductor es una consideración importante.

La figura 3.5 muestra un diagrama simplificado de un acelerómetro típico con amplificador de carga incorporado. Asegurando este captador a una pieza de máquina que vibra, o manteniéndolo adherido a la misma, la vibración mecánica pasa a través de la carcasa y llega al material piezoeléctrico. Este material tiene la capacidad de generar una carga eléctrica en respuesta a una fuerza mecánica aplicada al mismo. En este caso, la vibración mecánica produce la fuerza, y el material piezoeléctrico responde generando una carga eléctrica que es proporcional a la cantidad de aceleración de la vibración.

La carga eléctrica generada por el material piezoeléctrico es muy pequeña comparada con la salida de un transductor de velocidad. Es una carga que puede ser medida en términos de

picocoulomb por g, donde coulomb es la unidad estándar de las cargas eléctricas, y un picocoulomb es una millonésima parte de un microcoulomb ( $10^{-12}$  C) .



**Figura 3.5.-** Plano esquemático de un acelerómetro.

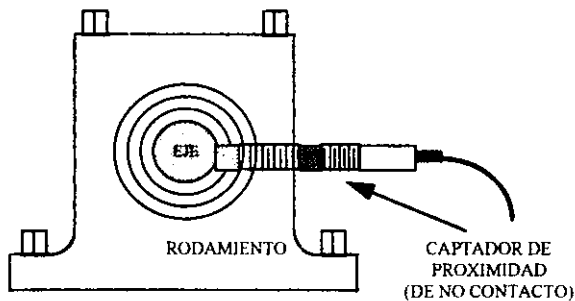
Siendo que la carga eléctrica generada directamente dentro de un acelerómetro es tan pequeña, es necesario incorporar un amplificador de carga electrónico de alta ganancia.

### 3.6 TRANSDUCTORES DE PROXIMIDAD ( DE NO CONTACTO).

Muchas de las máquinas que funcionan a velocidades muy elevadas, tales como turbinas, compresores y bombas centrífugas, constan de rotores relativamente livianos montados en carcasas robustas y rodamientos rígidos. Debido al peso y rigidez de la carcasa de gran tamaño de la máquina y de los rodamientos, los transductores de aceleración y vibración montados externamente a menudo no lo logran mostrar evidencia de la vibración que podría afectar el eje y/o el rotor. Sin embargo, el rotor podría estar vibrando excesivamente dentro de las tolerancias de los rodamientos. En tales casos es necesario medir la vibración real del eje, para poder determinar cuándo exista peligro para las tolerancias de sellos y rodamientos. Esta es la función de los transductores de proximidad.



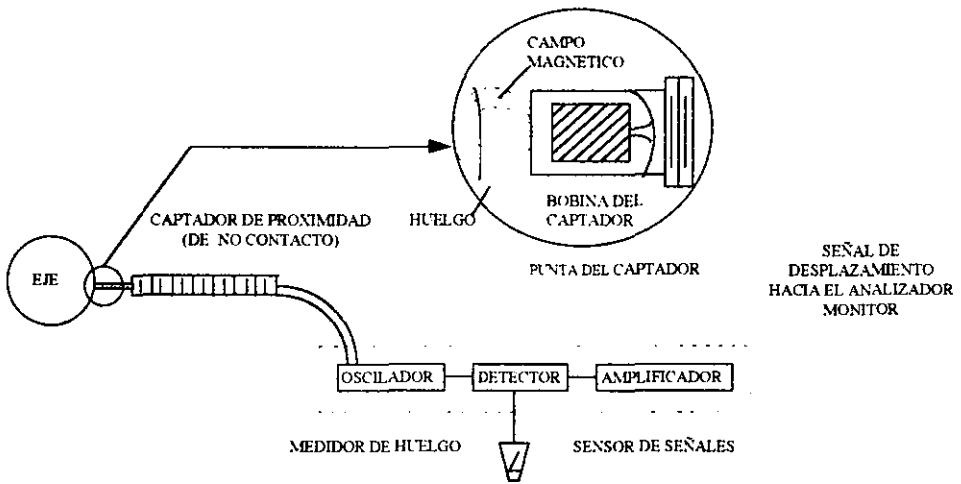
La figura 3.6 ilustra un transductor de proximidad montado a través del alojamiento del rodamiento. Básicamente se trata de un transductor de desplazamiento; pero, en lugar de medir el desplazamiento del rodamiento o de la carcaza, éste mide el desplazamiento del eje en relación con el soporte y el alojamiento.



**Figura 3.6.-**Transductor de proximidad (de no contacto).

A diferencia de los transductores de velocidad y de aceleración, un transductor de proximidad no cuenta con un elemento que genere una tensión o una carga eléctrica en respuesta a una vibración. Así como se ilustra en la figura 3.7, un sensor de proximidad requiere un dispositivo electrónico externo que genere una señal de corriente alterna de frecuencia muy elevada y detecte la vibración inducida en la señal de corriente alterna causada por la vibración del eje.

El dispositivo electrónico, llamado sensor de señales, genera una señal eléctrica de muy alta frecuencia, llamada señal portadora. Esta señal, por medio de un cable coaxial, es conducida hasta una pequeña bobina de alambre, ubicada en la punta del transductor de proximidad. La señal eléctrica de alta frecuencia aplicada a la bobina genera un campo magnético. Cualquier objeto metálico en las cercanías de la bobina, por ejemplo, el eje de acero, absorbe un poco de esa energía magnética. Ese efecto de absorción coloca una "carga" eléctrica en la señal, reduciendo así su potencia. La cantidad de esa carga - reducción de potencia de la señal- es



**Figura 3.7.-**Diagrama esquemático de un transductor de proximidad (de no contacto).

inversamente proporcional a la distancia entre la bobina y el eje. Cuanto más cerca está la bobina del eje, más fuerte será el efecto de carga, y más pequeña la cantidad de señal portadora. A medida que el eje se mueve en relación con la punta del transductor, la fuerza de la señal eléctrica cambia, proporcionalmente con el movimiento. El sensor de señales produce una tensión de corriente alterna proporcional a la separación existente. La variación de la “fuerza de la señal portadora es por lo tanto proporcional a la cantidad de vibración. Esta señal de desplazamiento” es enviada, por medio de un cable, a un medidor de vibración, y a un monitor o analizador.

### 3.7 MÉTODOS DE MONTAJE.

Existen varios métodos de montaje para los transductores de vibración, como son:

1. Montaje con perno roscado.
2. Montaje con resina epóxica
3. Manual sin sonda.

4. Manual con sonda.
5. Sujetador magnético.
6. Pinzas sujetadoras.
7. Estacas para ejes.
8. Accesorio de contacto directo.

El montaje de los transductores son seleccionados de acuerdo a la máquina y a la frecuencia de rotación de la misma.

### **3.8 SELECCIÓN DE UN TRANSDUCTOR.**

Hay cuatro puntos importantes que se consideran en el proceso de selección:

- Las características mecánicas de la máquina.
- Los parámetros que hay que medir
- La gama de frecuencias de la vibración
- Las consideraciones relativas al montaje

#### **3.8.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA MÁQUINA.**

Para medir el huelgo de los rodamientos, la posición del rotor, o la vibración del eje hace falta la medición del desplazamiento usando un transductor de proximidad o un accesorio de contacto con eje. El transductor de proximidad mide la vibración del eje en relación con el alojamiento del rodamiento. El accesorio de contacto directo con eje combinado con un transductor (sismico) de velocidad mide la vibración del eje en relación con el espacio.

#### **3.8.2 PARÁMETROS DE MEDICIÓN.**

Entre, los parámetros más importantes para seleccionar un captador se encuentran: desplazamiento, velocidad, aceleración y energía de impulsos.

*Desplazamiento:* el desplazamiento puede ser medido con captadores de velocidad ó con captadores de aceleración. La medición normalmente se logra con circuitos integrados, que están incluidos en los medidores y analizadores de la vibración.

Los casos en los cuales la medición son de frecuencias muy bajas, se puede considerar un transductor de vibración del tipo piezoeléctrico. Este tipo de transductores, pueden dar mediciones de desplazamiento confiables, llegando a 1Hz, o sea 60 cpm.

*Velocidad:* Este parámetro puede ser medido con sensores, sísmicos de velocidad y acelerómetro. En los sensores de velocidad la lectura es directa; mientras que en la salida del acelerómetro puede ser integrada una vez para producir el equivalente de una medición de velocidad, llegando a frecuencias bajas hasta aproximadamente 3 Hz, o sea 180 cpm.

*Aceleración y energía de impulsos* deberán medirse solamente con un acelerómetro.

### **3.8.3 GAMA DE FRECUENCIAS.**

La gama de frecuencias de la vibración generada por una máquina influye en la selección del sensor; a continuación se presenta el uso de los sensores utilizados para el monitoreo de sistemas vibratorios.

#### **a) Transductores de desplazamientos**

1. medición de bajas frecuencias, por debajo de 600 cpm aproximadamente
2. mediciones relativas
3. monitoreo de máquinas pesadas con rotores livianos
4. posición del rotor

#### **b) Transductores de velocidad**

1. la gama de velocidad a medir se encuentra entre 600 y 100,000 cpm
2. medición manual
3. medición de niveles de vibración total en la maquinaria

c) transductores acelerómetros

1. medición de velocidad entre los 600 y los 600,000 cpm
2. medición de respuestas estructurales a altas frecuencias
3. medición de energía de impulsos en rodamientos de elementos rodantes, engranajes y trenes de engranajes, así como en fuentes de vibración aerodinámica de alta frecuencias.

### 3.8.4 SELECCIÓN DE UN TRANSDUCTOR ESPECÍFICO.

Una vez que se haya determinado el tipo de transductor, de conformidad con los parámetros de medición, el paso siguiente es la selección de un transductor específico. La tabla 3.1, resume las pautas para la selección de un transductor.

## 3.9 FINALIDAD DE LA MEDICIÓN DE LA VIBRACIÓN.

**Verificaciones periódicas de rutina:** unas verificaciones periódicas a intervalos regulares podrán permitir la detección de problemas de una máquina al comienzo de su deformación, y así poderla incluir en un cronograma de reparaciones.

**Mediciones para determinar la línea de base:** una medición para línea de base es, por definición, una serie de mediciones realizadas sobre una máquina bien equilibrada, bien alineada, y que esté funcionando en condiciones operativas normales en su configuración de instalación final. Los niveles de vibración “normales” en dichas condiciones servirán como “línea de base” contra la cual se podrán comparar todos los datos obtenidos subsecuentemente.

DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA.	PARÁMETRO	GAMA DE FRECUENCIAS EN CPM	UBICACIÓN DEL TRANSDUCTOR	TIPO DE TRANSDUCTOR
Turbinas de vapor/bombas de gran tamaño	Desplazamiento	600 - 6000	En relación con el eje	De proximidad o accesorio de contacto directo con eje
Compresor de gran tamaño	Velocidad	600 - 60000	Montaje sobre el rodamiento	De velocidad o acelerómetro
Turbinas de vapor/bombas de gran tamaño	Velocidad	600 - 60000	Montajes sobre el rodamiento	De velocidad o acelerómetro
Motores eléctricos	Aceleración , Energía de impulsos	600 - 600000	Montajes sobre el rodamiento	Acelerómetro
Ventiladores y sopladores, accionamiento por motor, con rodamientos de elementos rodantes	Velocidad , Energía de impulsos , Aceleración	600 - 60000	Sobre la caja	De velocidad o acelerómetro
Cajas de engranajes con rodamientos de elementos rodantes	Aceleración y Energía de impulsos	600 - 600000	Sobre la caja	Acelerómetro

Tabla 3.1.- Selección de parámetros y transductores .

DESCRIPCION DE LA MAQUINARIA	PARAMETRO	GAMA DE FRECUENCIAS EN CPM	UBICACION DEL TRANSDUCTOR	TIPO DE TRANSDUCTOR
Cajas de engranajes con rodamientos de película hidrodinámica	Desplazamiento y Aceleración de Energía de impulsos	600 - 6000 600 - 600000	En relación con el eje	De proximidad
Cajas especiales Muy bajas frec.				
Torres de enfriamiento. Generadores hidroeléctricos Ventiladores de baja velocidad	Desplazamiento	600 - 60000	Sobre la caja	De velocidad

**Tabla 3.1.-** Selección de parámetros y transductores (continuación).

**Verificaciones antes y después de las reparaciones generales:** las mediciones de la vibración antes de efectuar las reparaciones generales podrán decirnos cuáles máquinas necesitan ser sometidas a dichas reparaciones y cuáles otras no las requieren. Las mediciones después de las reparaciones generales nos podrán indicar si los problemas que aquejan las máquinas reparadas fueron corregidos o no y si la calidad de los trabajos de reparación ha sido satisfactoria o no.

**Identificación y eliminación de fallas de una máquina:** la medición de la vibración se realiza a menudo para establecer con exactitud las causas de la excesiva vibración de una máquina. También, en algunas máquinas, como máquinas herramientas por ejemplo, la

finalidad de la medición y análisis de la vibración podría ser para determinar la causa de un acabado de mala calidad, de marcas debidas a vibración de la herramienta, o de piezas fuera de tolerancia.

### 3.10 TIPOS DE MONITOREO.

La medición de la vibración se efectúa generalmente en los rodamientos de una máquina. Los transductores deberán ser colocados lo más cerca posible de los cojinetes de la máquina porque es a través de ellos que se transmitan las fuerzas vibratorias. Los movimientos de los cojinetes son el resultado de las fuerzas de reacción que actúan en la máquina, figura 3.9.

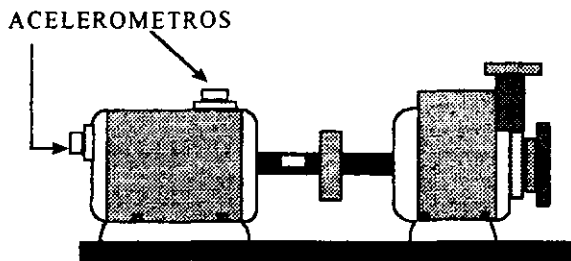


Figura 3.9.-Ubicación de los transductores.

La experiencia ha demostrado que hay tres importantes sentidos para realizar la medición de la vibración: horizontal (H), vertical (V), y axial (A). La figura 4.10 ilustra estos tres sentidos. Los sentidos horizontal y vertical a menudo son llamados direcciones radiales. Las mediciones en dirección radial se toman con el eje del transductor colocado a 90 grados ( es decir, en ángulo recto) con respecto al eje de rotación de eje (o árbol) de la máquina.



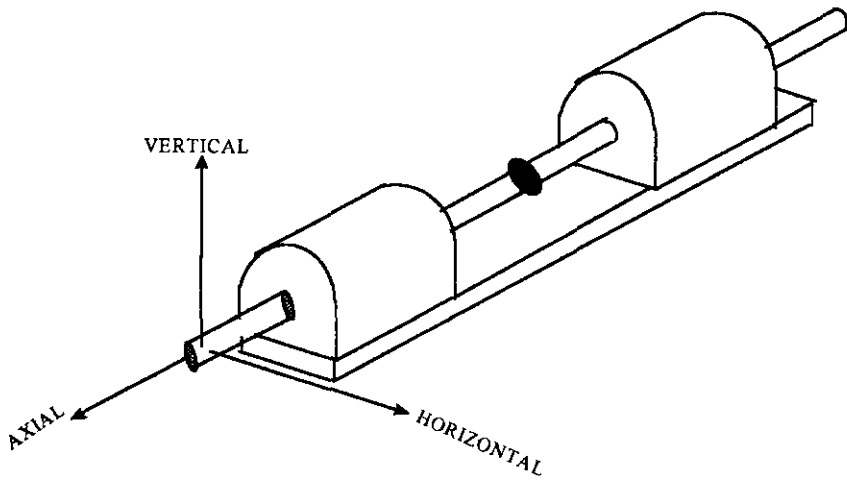


Figura 3.10.-Sentidos de medición de la vibración.

# CAPITULO 4

"DISEÑO ELECTRONICO DEL  
EQUIPO"

## CAPITULO 4

### “DISEÑO ELECTRONICO DEL EQUIPO”

**E**n este capítulo se presenta el diseño electrónico del monitor de fallas para máquinas rotatorias.

#### 4.1 DIAGRAMA A BLOQUES.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama a bloques del equipo.

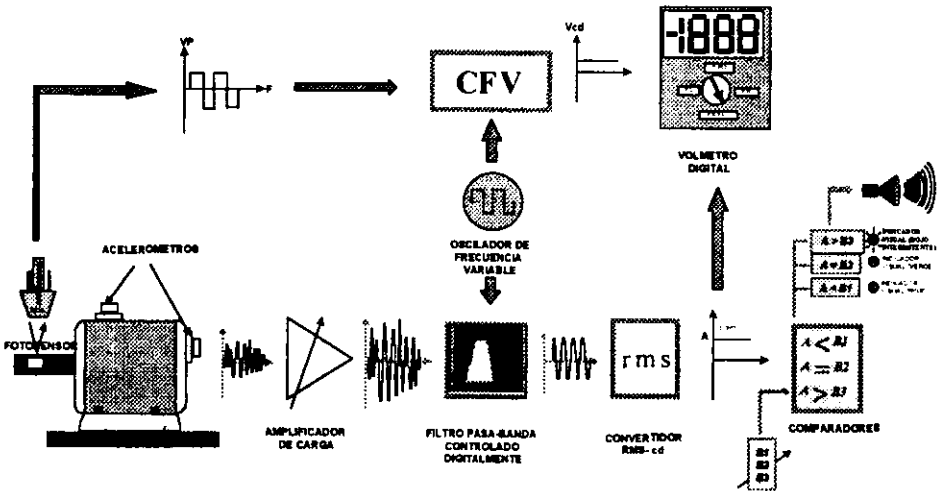


Figura 4.1.-Diagrama a bloques del monitor electrónico de fallas para máquinas rotatorias.

## 4.2 ACCELERÓMETRO PIEZOELÉCTRICO.

Es un elemento importante para el funcionamiento del monitor, ya que es el elemento sensor de los movimientos mecánicos convirtiéndolos en señales de carga eléctrica, cubriendo una amplia gama de frecuencias.

## 4.3 AMPLIFICADOR DE CARGA.

El amplificador de carga se utiliza como Acondicionador de Señales; este dispositivo integra la corriente de carga generada por el sensor piezoeléctrico produciendo un voltaje de salida proporcional a la corriente de carga.

## 4.4 FILTROS.

Un filtro es un circuito diseñado para dejar pasar señales con una banda de frecuencias específica, atenuando todas las señales fuera de esta banda. Los filtros pueden ser activos o pasivos. Los filtros pasivos contienen sólo resistencias, inductores y capacitores, mientras Los filtros activos, emplean transistores o amplificadores operacionales.

Hay cuatro tipos de filtros: pasa bajas, pasa altas, pasa banda y rechaza banda. En la figura 4.2 se ilustran las gráficas de respuesta en frecuencia de los cuatro tipos de filtros.

*Filtro pasa bajas:* es un circuito que tiene voltaje de salida constante desde  $\omega = 0$  hasta una frecuencia de corte  $f_c$ . Conforme la frecuencia aumenta arriba de  $f_c$ , el voltaje de salida se atenúa. La frecuencia de corte,  $f_c$ , también se denomina: frecuencia 0.707, frecuencia de -3dB o frecuencia de esquina, figura 4.2(a).

*Filtro pasa altas:* Este filtro, atenúan el voltaje de salida para todas las frecuencias abajo de la frecuencia de corte  $f_c$ , la magnitud del voltaje de salida es constante, figura 4.2(b).

**Filtro pasa banda:** Este filtro, permite pasar sólo una banda de frecuencia mientras atenúan todas las demás, figura 4.2(c).

**Filtros rechaza banda:** Este filtro se comporta exactamente de manera opuesta; esto es, rechazan una banda específica de frecuencia mientras que pasan las que se encuentran fuera de ella, figura 4.2(d).

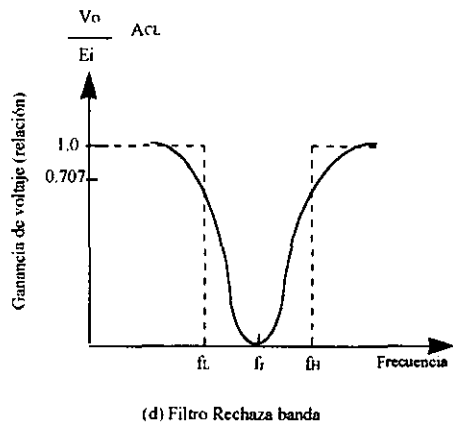
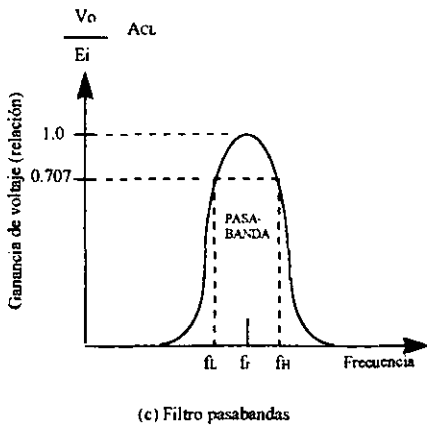
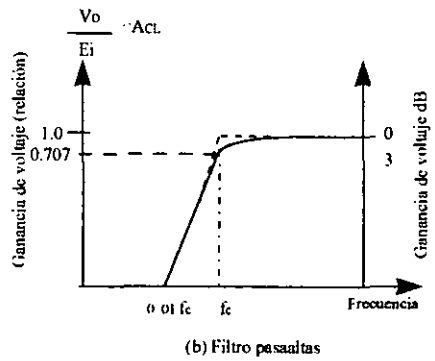
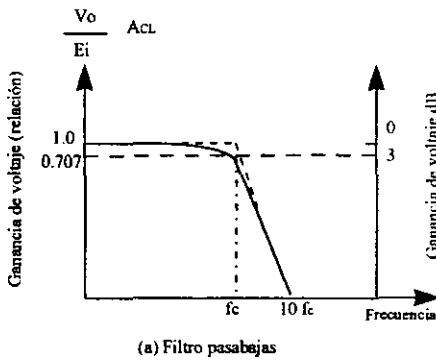


Figura 4.2.- Gráficas de la respuesta en frecuencia de los filtros.

#### 4.4.1 FILTRO PASA-BANDA.

Un filtro pasa banda es un selector de frecuencia. Permite seleccionar o pasar únicamente una banda particular de frecuencias. En la figura 4.3 se muestra una curva típica de respuesta en frecuencia. Este tipo de filtro posee una ganancia máxima a una frecuencia resonante  $f_r$ , también denominada frecuencia central de sintonización. Hay una frecuencia por debajo de  $f_r$  en la que la ganancia cae a 0.707. Esta es la *frecuencia inferior de corte*,  $f_L$ . La frecuencia por encima de  $f_r$  se denomina *frecuencia de corte mayor*,  $f_H$ , en donde la ganancia también es igual a 0.707. A las frecuencias  $f_L$  y  $f_H$  también se les denomina *frecuencias críticas* por lo que en este punto la señal se ve reducida al 30% con respecto a su verdadera amplitud. Más allá de las frecuencias críticas la señal se reduce cada vez más, de manera considerable.

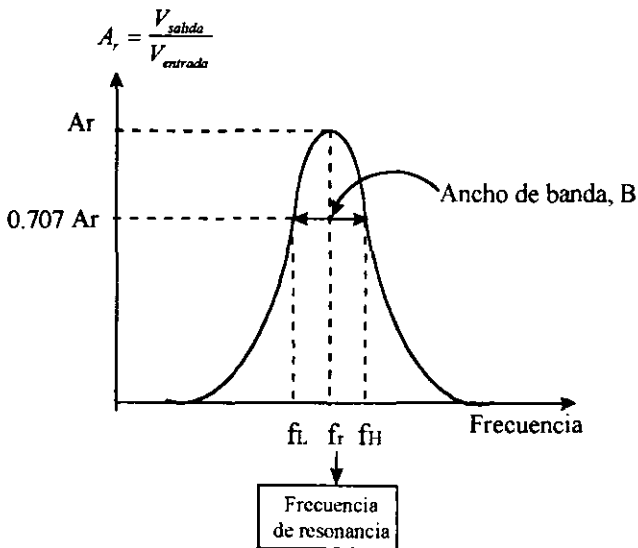


Figura 4.3.- Gráfica de la respuesta en frecuencia de un filtro pasa-banda.

El intervalo de frecuencias entre  $f_L$  y  $f_H$  recibe el nombre de *ancho de banda BW*.

El *factor de calidad*  $Q$  se define como la relación entre la frecuencia de resonancia y el ancho de banda; es una medida de *selectividad* del filtro pasa banda. Un  $Q$  alto indica que el filtro selecciona una banda de frecuencias más pequeña (es más selectivo).

**EXISTEN DOS TIPOS DE FILTROS PASA-BANDA : EL DE BANDA ANCHA Y EL DE BANDA ANGOSTA.**

Un filtro de banda-ancha tiene un ancho de banda de dos o más veces la frecuencia de resonancia, en otras palabras,  $Q \leq 0.5$ . Para el caso de un filtro de banda-angosta,  $Q > 0.5$ .

El filtro de “banda ancha” es generalmente utilizado para una exploración veloz de las gamas de frecuencia, para poder determinar en forma rápida las frecuencias de vibración presentes. En cambio, el filtro de “banda angosta” proporciona un mejor rechazo y una mayor selectividad , y se usa cuando se requiere estudiar una frecuencia de vibración particular.

Los filtros de “banda angosta” y “banda ancha” presentan su respuesta en frecuencia típica en las figuras 4.4(a) y 4.4(b) respectivamente. El análisis y la construcción de esos filtros, se simplifica mucho al estipularse que estos dos tipos de filtros tendrá una ganancia máxima de 1 ó 0 dB a la frecuencia de resonancia  $f_r$ .

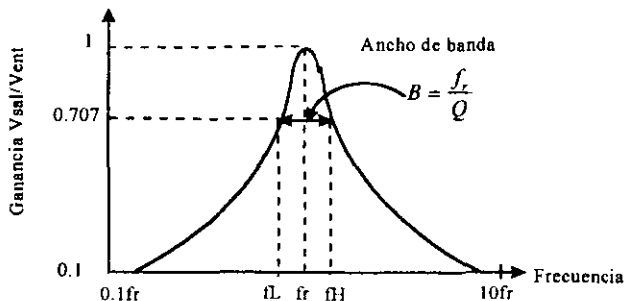
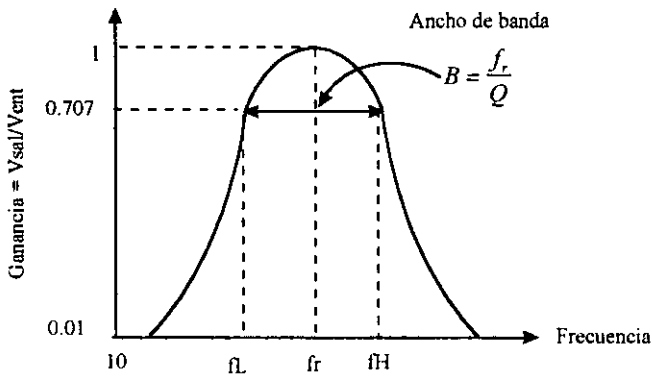


Figura 4.4a.- Respuesta en frecuencia del filtro de banda angosta.



**Figura 4.4b.-** Respuesta en frecuencia de un filtro de banda ancha.

Los filtros pasa banda también pueden ser divididos como *filtros de “ancho de banda constante”* y *filtros de “ancho de banda de porcentaje constante”*. En el primero, el ancho de banda entre las frecuencias críticas superior e inferior queda constante (por ejemplo, 50cpm ó 500 cpm), haciendo caso omiso de la frecuencia en que está sintonizado el filtro.

En cambio, el ancho de banda de un filtro de *ancho de banda por porcentaje constante* es expresado normalmente como porcentaje entre la frecuencia central de sintonización y las frecuencias críticas superior e inferior. Por ejemplo, el ancho de banda del filtro ilustrado en la figura 4.5 está 10% por debajo (-) de la frecuencia de sintonización. Por lo tanto, este tipo de filtro, sintonizado para una frecuencia de 1000 cpm, tendría un ancho de banda que se extendería de 950cpm a 1050 cpm, es decir un ancho de banda de 100 cpm (el 5% de 1000 es igual a 50).

El filtro de “banda ancha” típico tiene un ancho de banda del 10%, mientras que el filtro de “banda angosta” tiene un ancho de banda del 5%. En la figura 4.6 se muestra un filtro de banda angosta.



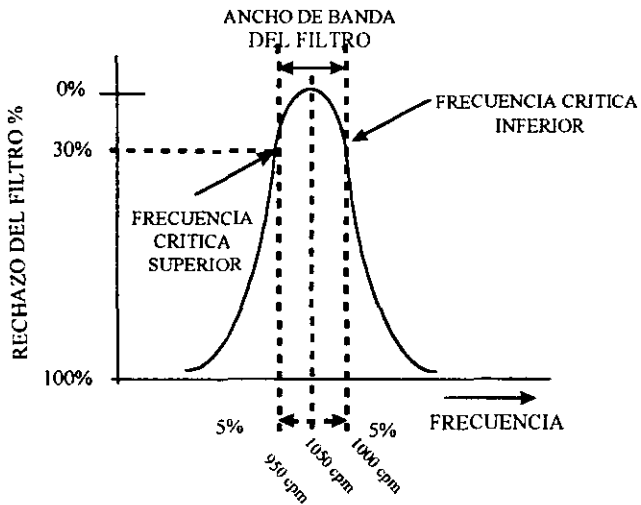
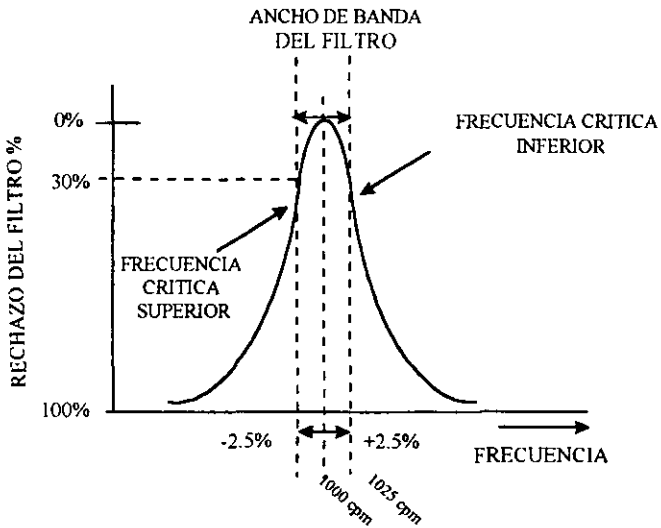


Figura 4.5.- Filtro de banda ancho (B = 10%).



Filtro 4.6.- Filtro de banda angosta (B = 5%).

#### 4.4.2 FILTRO PASA BANDA CONTROLADO DIGITALMENTE.

Una máquina en operación puede estar sometidas a más de una frecuencia de vibración, la medición de las frecuencias es de vital importancia para determinar algún problema específico de una máquina. Para esto se necesita de alguna manera impedir el paso a todas las frecuencias menos una, esto nos permitirá apreciar cuál es la pieza (o piezas) de la máquina que tienen problemas y requiere corrección. Esta es la tarea del filtro pasa banda.

Una alternativa para seleccionar diferentes frecuencias es la utilización de filtros activos de precisión como es el CI MF-10. Este dispositivo CMOS puede ser usado para realizar varias, funciones de filtrado.

En un filtro de precisión, es deseable tener un manejo independiente para cada uno de los tres parámetros básicos del filtro: frecuencia de resonancia ( $f_H$ ),  $Q$  o factor de calidad, y la ganancia pasa-banda ( $H_0$ ).

El MF-10, cuenta en su interior con todos los componentes activos y reactivos necesarios para construir dos filtros activos. Sólo se necesitan tres componentes externos para establecer los parámetros de diseño.

Con este dispositivo es posible realizar cuatro configuraciones de filtros: pasa baja, pasa altas, pasa banda y rechaza banda.

Para seleccionar la frecuencia de resonancia de el filtro, ó frecuencia de corte se requiere de un circuito oscilador(Reloj).

El circuito de reloj para el MF-10 debe de operar en  $f_c \times 50$  ó  $f_c \times 100$  esto determinará la resolución de la forma de onda de la salida de la señal.

4.4.2.1 DISEÑO DEL MF-10 COMO FILTRO PASA-BANDA.

Para el diseño de un filtro digital pasa banda con el MF-10, se propusieron las siguientes características, figura 4.7:

Ganancia  $H_{OBP} = 1$

Factor de calidad  $Q = 20$

Ancho de banda  $AB \pm 1.5 \text{ Hz}$

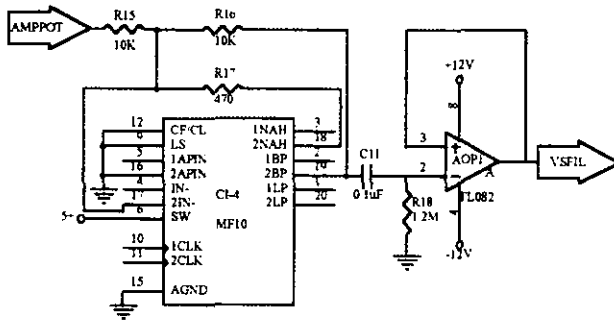


Figura 4.7.- Filtro digital pasa banda MF-10.

Ecuaciones de diseño

$$f_r = \frac{f_{CLK}}{100} \text{ ó } \frac{f_{CLK}}{50} \quad \text{ec. (4.1)}$$

$$Q = \frac{R_3}{R_2} \quad \text{ec.(4.2)}$$

$$H_{OBP} = -\frac{R_3}{R_1} \quad \text{ec. (4.3)}$$

donde:

$f_r$  = frecuencia central

$f_{cik}$  = frecuencia de resonancia del oscilador

$Q$  = factor de calidad

$H_{OBP}$  = ganancia del filtro pasa banda

BW = ancho de banda

Como:  $H_{OBP} = 1$ ,  $Q = 20$

Se propusieron los valores de resistencias para:

$$R_1 = R_3 = 10K\Omega$$

Por lo que:

$$H_{OBP} = -\frac{10K\Omega}{10K\Omega} = -1$$

De la ec.(4.2):

$$R_2 = \frac{R_3}{Q} = \frac{10K}{20} = 500 \text{ ajustando a un valor comercial: } R_2 = 470\Omega$$

por lo que:

$$Q = \frac{10K\Omega}{470\Omega} = 21.3$$

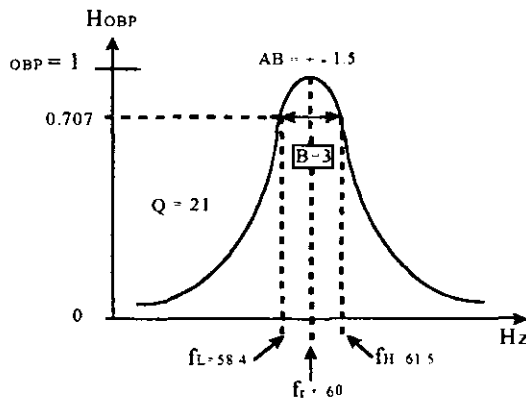
La frecuencia central de trabajo ( $f_c$ ) de este filtro se selecciona digitalmente mediante un oscilador de frecuencia variable obteniéndose únicamente una señal a la frecuencia seleccionada en el filtro.

La tabla 4.1 muestra la respuesta del filtro ; con una frecuencia central de resonancia de 60 Hz y una señal de entrada senoidal con frecuencia variable.

Frecuencia de reloj $f_{CLK}$ (KHz)	Frecuencia central $f_r = \frac{f_{CLK}}{100}$	$f_H$	$f_L$	Ancho de banda AB
6	60	61.42	58.6	+ - 1.5

**Tabla 4.1.-**Datos de la respuesta del filtro Pasa-Banda.

En la figura 4.8 se muestra la respuesta en frecuencia del filtro pasa banda diseñado con el CI MF-10 para una  $f_r = 60$  Hz.



**Figura 4.8.-** Filtro digital pasa banda con una  $f_r = 60$  Hz.

A la salida del filtro digital MF-10 se añadió un filtro pasivo pasa altas para eliminar posibles componentes de cd de la señal de salida, figura 4.9.

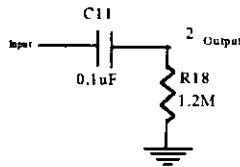


Figura 4.9.- Filtro pasivo pasa altas.

la respuesta del filtro pasivo esta dado por :

$$f_c = \frac{1}{R_{18} C_{11} 2\pi}$$

los componentes se propusieron para obtener una frecuencia de corte de 1Hz. aproximadamente.

$$f_c = 1.32Hz$$

## 4.5 OSCILADOR DE FRECUENCIA VARIABLE.

Para controlar la frecuencia central del filtro Pasa-banda se utilizó un oscilador de frecuencia variable, esto permite seleccionar diferentes frecuencias en el monitoreo de una máquina rotatoria, en esta etapa se utilizo un CI 555 configurado como oscilador astable, figura 4.10.

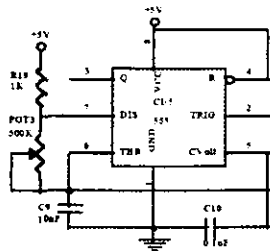


Figura 4.10.- Oscilador de frecuencia variable.

En las formas de onda de la figura 4.11, se sigue la operación del circuito. En el tiempo "A" las terminales 2 y 6 van exactamente abajo de  $V_{LT} = 1/3 V_{CC}$  y la terminal de salida 3 a alto (estado A). La terminal 7 queda abierta, de modo que el capacitor  $C_9$  se carga a través de  $R_{19} + Pot3$ . Durante el tiempo de salida A-B, el 555 está en el estado de memoria C, recordando el estado anterior A. Cuando  $V_{C9}$  pasa justo arriba de  $V_{LT} = 2/3 V_{CC}$  en el tiempo B, el 555 entra en el estado D y envía una señal baja. La terminal 7 también pasa a baja y el capacitor  $C_9$  se descarga a través del Pot3. Durante el tiempo de salida baja B-C, el 555 está en estado de memoria C, recordando el estado previo D. Cuando  $V_C$  cae abajo de  $V_{LT}$ , se repite la secuencia.

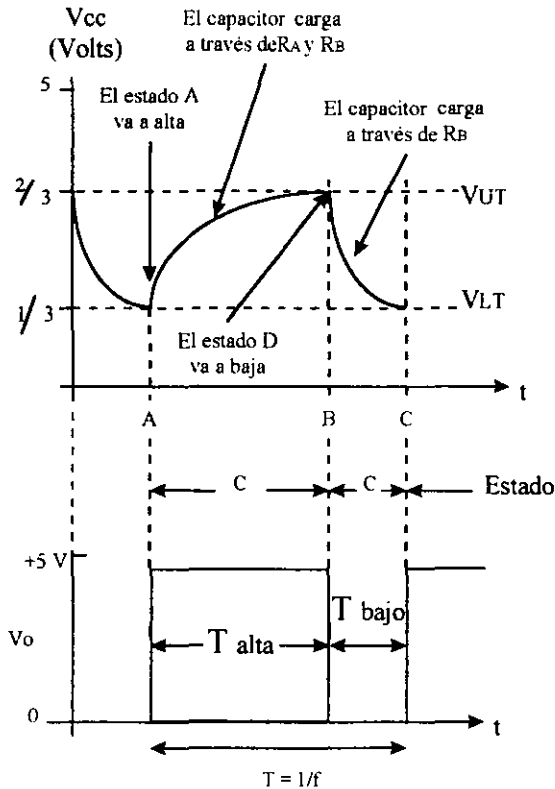


Figura 4.11.- Gráfica de respuesta en el tiempo del oscilador de frecuencia variable.

La salida permanece alta durante el intervalo de tiempo en que  $C_9$  se carga desde  $1/3V_{CC}$  a  $2/3V_{CC}$  como se muestra en la figura 4.11. Este intervalo de tiempo esta dado por:

$$t_{alta} = 0.695(R_{19} + R_{POT})C_9 \quad \text{ec. (4.4)}$$

La salida está baja durante el intervalo en que  $C_9$  se descarga de  $2/3 V_{CC}$  a  $1/3 V_{CC}$  y está dado por:

$$t_{baja} = 0.695(R_{POT}C_9) \quad \text{c. (4.5)}$$

Así el periodo total de oscilación  $T$  es

$$T = t_{alta} + t_{baja} = 0.695(R_{19} + 2R_{POT})C_9 \quad \text{ec. (4.6)}$$

La frecuencia de oscilación  $f$  es

$$f_{osc} = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_{19} + 2R_{POT})C_9} \quad \text{ec.(4.7)}$$

Calculo de la frecuencia máxima de oscilación:

Proponemos:

$$R_{19}=1K, C_9=10nF \text{ y } R_{POT} = 0$$

sustituyendo estos valores en la ec. (4.7) tenemos que:

$$f_{osc} = \frac{1}{T} = \frac{1}{6.95\mu S} = 143KHz$$

La frecuencia mínima de oscilación se calcula de la misma manera pero con:



$$R_{\text{POT}} = 500\text{K}$$

$$f_{\text{osc}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{6.95\text{ms}} = 143.8\text{Hz}$$

## 4.6 CONVERTIDOR RMS A CORRIENTE DIRECTA - cd.

Hay tres valores de amplitud en una señal de corriente alterna ac los cuales son comúnmente convertidos a un voltaje dc:

1. *Amplitud pico* (o amplitud pico a pico).
2. *Valor promedio*, el cual es el valor absoluto promedio, ya que el valor promedio de una forma de onda simétrica es cero. El valor promedio de una forma de onda de ac es igual al nivel de dc el cual transferiría la misma carga por unidad de tiempo, y matemáticamente el valor absoluto promedio es:

$$E_{\text{ave}} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} |e(t)| dt$$

donde  $t_0$  es el intervalo de tiempo de interés de la forma de onda.

3. *Valor cuadrático medio o rms*, es una medida del valor de calentamiento generado en una resistencia aplicando un voltaje ó corriente, sobre el intervalo T. La expresión matemática para el valor rms sobre un intervalo de tiempo  $t_0$  es :

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} e^2(t) dt} \quad \text{ec. (A)}$$

En la mayoría de las aplicaciones prácticas la medición continua del valor **rms** siempre es deseado en vez de un valor **rms** sobre un intervalo de tiempo específico. Por lo tanto, una importante pero sutil información es la aproximación debajo del radical, debido a representa el valor promedio  $e^2(t)$ .

La expresión matemática simplificada de esta expresión es :

$$E_{rms} = \sqrt{\overline{e^2(t)}}$$

donde la barra (-) denota valor promedio.

El valor **rms** es necesario para calcular la potencia de una señal. En otras palabras, 1 ampere rms de ac produce la misma cantidad de calor en una resistencia que causa en un instante de tiempo 1 ampere de cd.

#### 4.6.1 CONVERTIDOR RMS.

El convertidor rms analógico puede ser diseñado usando cuatro transistores logarítmicos, figura 4.12. Los voltajes base emisor de los transistores logarítmicos son :

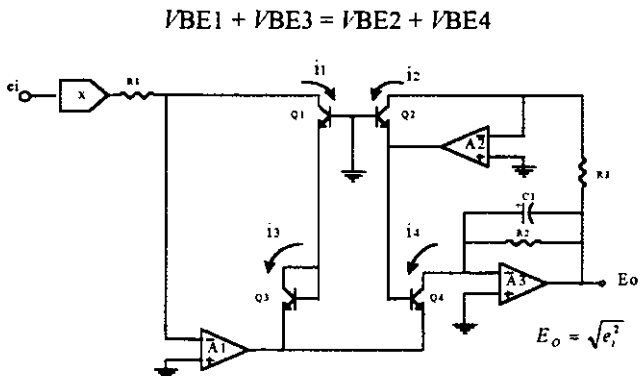


Figura 4.12.-Convertidor rms con transistores logarítmicos.

Los voltajes base-emisor son logarítmicamente relacionados con sus corrientes de colector, resultando la relación:

$$\frac{kT_1}{q} \ln \frac{i_1}{I_{s1}} + \frac{kT_3}{q} \ln \frac{i_3}{I_{s3}} = \frac{kT_2}{q} \ln \frac{i_2}{I_{s2}} + \frac{kT_{s4}}{q} \ln \frac{i_4}{I_{s4}}$$

Asumiendo que todos los transistores tienen la misma constante de temperatura, esta expresión puede ser simplificada como:

$$\frac{kT_1}{q} = \frac{kT_3}{q} \text{ y } \frac{kT_2}{q} = \frac{kT_4}{q}$$

entonces tenemos:

$$\frac{kT_1}{q} \left[ \ln \frac{i_1}{I_{s1}} + \ln \frac{i_3}{I_{s3}} \right] = \frac{kT_2}{q} \left[ \ln \frac{i_2}{I_{s2}} + \ln \frac{i_4}{I_{s4}} \right]$$

de donde:

$$\ln \frac{i_1}{I_{s1}} + \ln \frac{i_3}{I_{s3}} = \ln \frac{i_2}{I_{s2}} + \ln \frac{i_4}{I_{s4}}$$

$$e^x \left| \ln \frac{i_1 i_3}{I_{s1} I_{s3}} = \ln \frac{i_2 i_4}{I_{s2} I_{s4}} \right|$$

$$\frac{i_1 i_3}{I_{s1} I_{s3}} = \frac{i_2 i_4}{I_{s2} I_{s4}}$$

$$i_4 = \frac{I_{s4} I_{s3}}{I_{s1} I_{s2}} \frac{i_1 i_3}{i_2} \quad \text{ec.(4.8)}$$

Debido a que el transistor logaritmico es un dispositivo unipolar, el circuito de valor absoluto es necesario para suministrar una señal de corriente unipolar. Si el amplificador  $A_1$  es simulado para tener un voltaje de offset insignificante y predisponer la corriente de entrada, la corriente del colector del transistor logaritmico Q1 es:

$$i_1 = \frac{|e_1|}{R_1}$$

entonces la corriente del colector del transistor logaritmico Q3 es:

$$i_3 = \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \frac{|e_1|}{R_1}$$

donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_3$  son las ganancias de corriente en base-común de Q1 y Q3 respectivamente. Asumiendo que los amplificadores operacionales A2 y A3 tiene un insignificante voltaje de offset y predisponiendo la corriente de entrada, la relación  $i_2$  e  $i_4$  pueden ser escritas como:

$$i_2 = \frac{e_0}{R_3}$$

y

$$i_4 = \frac{e_0}{R_2} + c_1 \frac{de_0}{dt}$$

Combinando estas expresiones con las corrientes de colector del transistor logaritmico en la ec.(5.8) se produce la ecuación diferencial:

$$\frac{I_{s2}I_{s4}}{I_{s1}I_{s3}} \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \frac{|e|^2}{R_1^2} = \frac{e_0}{R_2R_3} + \frac{e_0C_1}{R_3} \frac{de_0}{dt}$$

Combinando la ecuación anterior con las identidades:

$$|ei|^2 = et^2$$

y

$$2e_0 \frac{de_0}{dt} = \frac{de_0^2}{dt}$$

reordenando, obtenemos:

$$e_0^2 + \frac{R_2C_1}{2} \frac{de_0^2}{dt} = \frac{I_{s2}I_{s4}}{I_{s1}I_{s3}} \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \frac{R_2R_3}{R_1^2} e_i^2 \quad \text{ec. (4.9)}$$

En el dominio de la frecuencia compleja  $s$ , la función de transferencia para la ecuación diferencial (5.9) es :

$$E_0^2(s) = \frac{I_{s2}I_{s4}}{I_{s1}I_{s3}} \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \frac{R_2R_3}{R_1^2} \frac{E_i^2(s)}{1 + sR_2C_1/2} \quad \text{ec.(4.10)}$$

Para señales de entrada sinusoidales:

$$e_i(t) = \sqrt{2}E_{rms} \cos \omega t$$

y para señales de entrada cuadrada es:

$$e_i^2(t) = E_{rms}^2 (1 + \cos 2\omega t)$$

Si la frecuencia  $\omega$  de entrada es mucho más grande que la constante inversa de tiempo  $R_2 C_1/2$  de la función de transferencia, o si la entrada es un nivel de **dc**, el estado estable en la función de transferencia se simplifica a :

$$E_o = \sqrt{\frac{I_{s2} I_{s4}}{I_{s1} I_{s3}} \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \frac{R_2 R_3}{R_1^2}} E_{irms} \quad \text{ec. (4.11)}$$

De la ec. (4.11) se puede ver que con un circuito ideal de valor absoluto y un amplificador operacional ideal, existe un error en el cálculo de la ganancia en el ancho de banda del convertidor **rms-cd**. Este error en la ganancia puede ser compensada ajustando una de las resistencias para forzar a:

$$\frac{I_{s2} I_{s4}}{I_{s1} I_{s3}} \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \frac{R_2 R_3}{R_1^2} = 1$$

Si bien cualquiera de las resistencias puede ser ajustada, se recomienda ajustar  $R_3$ , ya que  $R_1$  posiblemente reciba corrientes de alta frecuencia y su respuesta en frecuencia puede ser deteriorada; sin embargo considerando el circuito práctico de valor absoluto del la figura 4.12,  $R_1$  puede ser una combinación de resistencias.  $R_2$  no debe ser ajustada, debido a que su valor en conjunto con el valor del capacitor determina la frecuencia-inferior de corte y la sensibilidad de la respuesta.

#### 4.6.2. DISEÑO DEL CONVERTIDOR RMS-CD.

Para el diseño de un convertidor rms-cd práctico, se retomó en gran medida el diseño del convertidor rms de la figura 4.12, añadiendo algunas etapas, como: un circuito de valor absoluto, incluyendo una protección con los diodos  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_5$ , y  $D_6$  para prevenir la corriente de corte en los emisores de los transistores logarítmicos, y dos redes compensadoras de fase  $C_{12}/R_{24}$  y  $C_{13}/R_{25}$ .

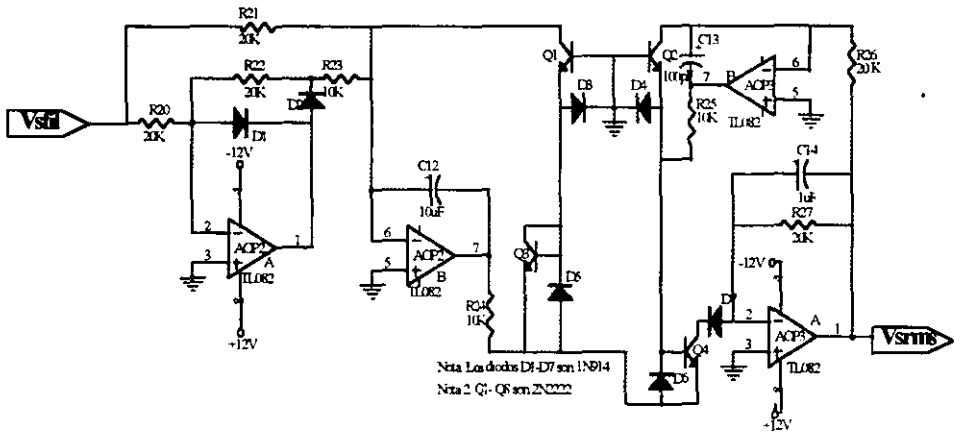


Figura 4.13.-Convertidor rms a dc práctico

La compensación de fase está diseñada para suministrar un mejor ancho de banda en AOP<sub>2B</sub>; una compensación de fase menos crítica es usada en AOP<sub>3B</sub> ya que solo recibe corriente directa. Además, el diodo D<sub>7</sub> ha sido incluido en serie con el colector de Q<sub>4</sub> para reducir su voltaje base-colector aproximadamente a cero. Los dispositivos AOP<sub>3A</sub>, R<sub>27</sub> y C<sub>14</sub> conforman un filtro pasa bajas, el cual determina la frecuencia de corte del circuito así como la sensibilidad del mismo.

El voltaje de offset de entrada y la corriente de los amplificadores puede producir errores, así como un voltaje offset de salida y error inverso de dc. El error inverso de dc es definido como el cambio en la salida debido a la polaridad inversa de un nivel dc de entrada. Un ajuste en los voltajes de offset del amplificador operacional producirá un offset de salida de 5 mV, el cual es solo 0.05 por ciento de error en la escala total de 10 V. El error inverso de dc en el cálculo del convertidor es debido a offsets en la salida de AOP<sub>2A</sub> y AOP<sub>2B</sub>, y además debido al mal equilibrio entre las resistencias. Para obtener la forma final, el voltaje de offset de AOP<sub>2A</sub> y AOP<sub>2B</sub> debe ser nulo.

### 4.6.2.1 RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA.

El rectificador de onda completa también se conoce como *circuito de valor absoluto*. El rectificador de onda completa transmite una polaridad de la señal de entrada e invierte la otra. Por tanto, ambos medios ciclos de un voltaje alterno se transmiten pero se convierten en una polaridad única a la salida del circuito, figura 4.14.

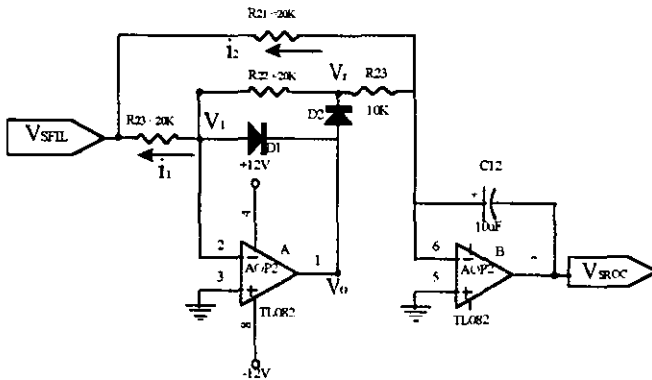


Figura 4.14.-Circuito de valor absoluto

La tensión  $V_r$  es la tensión de entrada de  $V_{SFIL}$  después de la rectificación de media onda. Esto se puede comprobar observando que cuando  $V_{SFIL} > 0$  V,  $D_1$  conduce y  $V_0$  se hace negativo, el diodo  $D_2$  se bloquea. Con  $D_2$  en corte, la corriente  $i_2 = 0$  y  $V_r = V_1$ . Con  $D_1$  en conducción,  $V_0 = V_1 - 0.7$ . Como  $V_1 = -V_0/A_d = -(V_1 - 0.7)/A_d$ , se tiene

$$V_r = V_1 = 0.7 / (A_d + 1) \approx 0V \text{ cuando } V_{SFIL} > 0V \quad \text{ec. (4.12)}$$

Cuando  $V_{SFIL}$  es negativa,  $V_0$  es positiva y el diodo  $D_1$  está en corte mientras  $D_2$  conduce. Ahora  $AOP_{2A}$  está conectada como amplificador inversor y con  $i_2 \approx i_1$  y  $V_{d1} \approx 0$  se tiene :

$$V_r = -V_{SFIL} \text{ cuando } V_{SFIL} < 0V \quad \text{ec. (4.13)}$$



Combinando (12) y (13), se ve que el AOP2<sub>A</sub> actúa como rectificador de media onda. Las formas de onda de V<sub>SFL</sub> y V<sub>r</sub> están representadas en la figura 4.15.

El amplificador AOP2<sub>B</sub> es un integrador sumador inversor, con una tensión de salida :

$$V_{SROC} = -\int_{T1}^{T2} \left[ \frac{V_R(\tau)}{R_{21}C_{12}} + \frac{V_{SFL}(\tau)}{R_{18}C_{12}} \right] d\tau \quad \text{ec.(4.14)}$$

sustituyendo valores en la ec.(14) tenemos :

$$V_{SROC} = \frac{1}{0.1} \int_0^{0.055} V_R dt - \frac{1}{0.2} \int_0^{0.15} V_{SFL} dt$$

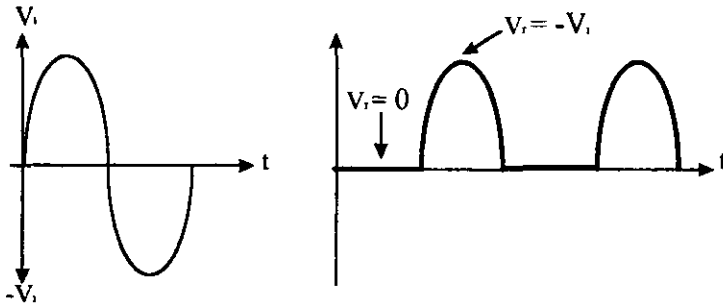
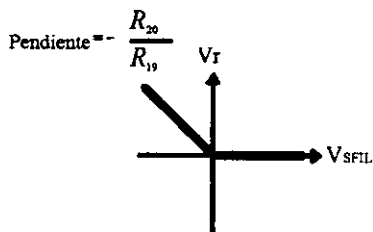


Figura 4.15.-Señales de entrada y salida del cto. Rectificador.

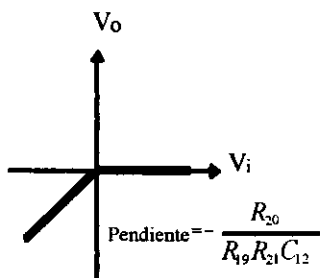
En la figura 4.16 se observan las gráficas V<sub>SFL</sub> vs V<sub>r</sub> del circuito de valor absoluto, de la figura 4.14.



①  $V_i$  debido a  $V_{SFIL}$  :

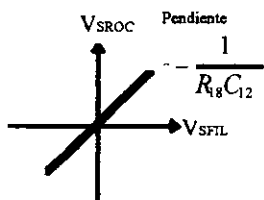
$$V_i |_{V_2=0} = -\frac{R_{20}}{R_9} V_i$$

$$V_i = \begin{cases} V_i, & V_i < 0 \\ -V_i, & V_i > 0 \end{cases}$$



②  $V_{SROC}$  debido a  $V_i$  :

$$V_{SROC} |_{V_2=0} = -\frac{1}{R_{21}C_{12}} \int_0^t V_i dt = -\frac{R_{20}}{R_{19}R_{21}C_{12}} \int_0^t V_i dt$$



$V_{SROC}$  debido a  $V_2$  :

$$V_o |_{V_1=0} = -\frac{1}{R_{18}C_{12}} \int_{-\infty}^{\infty} V_i dt$$

④  $V_o$  debido a  $V_0$  y  $V_2$

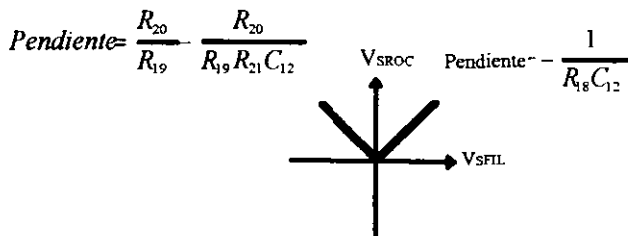


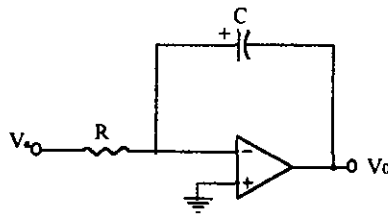
Figura 4.16.- Gráficas de entrada y salida del circuito de valor absoluto.

**4.6.2.2 INTEGRADOR SUMADOR.**

Para el diseño del circuito integrador se utiliza un amplificador operacional inversor (ver anexo I ), la ganancia de este amplificador está dada por la ecuación.:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_F}{Z_A} \tag{ec. (4.14)}$$

Si en la ec. (4.14),  $Z_F$  es sustituida por la impedancia de un capacitor y  $Z_A$  la de un resistor obtenemos entonces un circuito integrador, figura 4.17.



**Figura 4.17.- Integrador**

Siguiendo la notación en operadores de transformada de Laplace un integrador se representa como  $1/s$ . El comportamiento de este circuito se describe por medio de la siguiente ecuación:

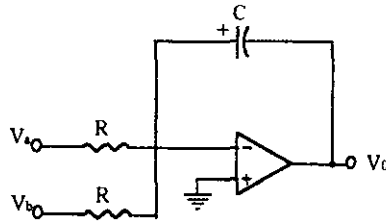
$$V_o(s) = -\left(\frac{1}{sCR}\right)V_i(s) \tag{ec. (4.15)}$$

Cuando la ec. 15 se convierte al dominio del tiempo, se obtiene

$$V_o(t) = -\left(\frac{1}{RC}\right)\int_0^t V_i(\tau) d\tau \tag{ec. (4.16)}$$

La ventaja de utilizar amplificadores operacionales con capacitores se debe a la facilidad de sumar entradas.

En la figura 4.18 se ilustra un *integrador sumador inversor*.



**Figura 4.18.-**Integrador sumador.

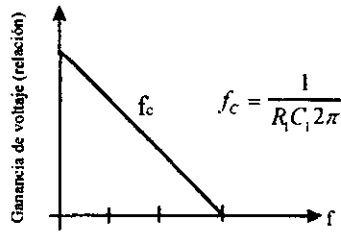
Esta configuración proporciona las siguientes ecuaciones de salida:

$$V_0(s) = -\frac{1}{s} \left[ \frac{Va(s)}{RaC} + \frac{Vb(s)}{RbC} + \dots \right] dt \quad \text{ec. (4.17)}$$

en el dominio del tiempo, la ec. (14) se convierte en:

$$V_0(t) = -\int \left[ \frac{Va(\tau)}{RaC} + \frac{Vb(\tau)}{RbC} + \dots \right] d\tau \quad \text{ec.(4.18)}$$

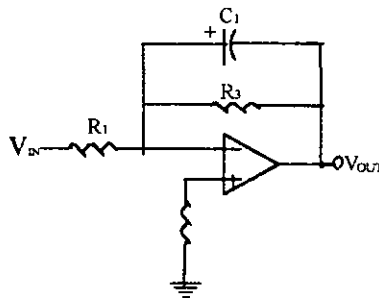
Un integrador se también es considerado como un filtro pasa bajas con respuesta en frecuencia decrementada, figura 4.19 :



**Figura 4.19.-** Respuesta en frecuencia del integrador

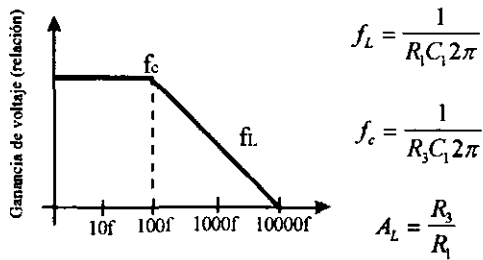
### Filtro paso bajas

El circuito de un filtro pasa bajas se muestra en la figura 4.20. En este filtro la ganancia por debajo de la frecuencia de corte esta definida por la razón de  $R_3$  y  $R_1$ . El circuito puede ser considerado como un integrador AC arriba de  $f_c$ ; de cualquier modo la respuesta en el dominio del tiempo es un simple RC en vez de una integral.



**Figura 4.20.-** Filtro pasa bajas

La ganancia de frecuencia está trazada en la figura 4.21 para ilustrar la diferencia entre este circuito y el integrador.



**Figura 4.21.-**Respuesta en frecuencia de un filtro pasa bajas.

Para el diseño del circuito integrador contenido en el convertidor rms-cd se propusieron los siguientes valores de los componentes :

$$C_{14} = 1\mu F, R_{25} = 20K$$

La frecuencia de integración del circuito se obtiene a través de la siguiente expresión :

$$f_c = \frac{1}{R_{25} C_{14} 2\pi}$$

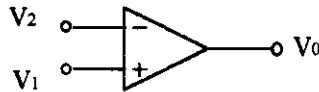
sustituyendo valores se tiene que :

$$f_c = 7.95 \text{ Hz.}$$

Donde las señales de entrada mayores de 7.95 Hz son integradas

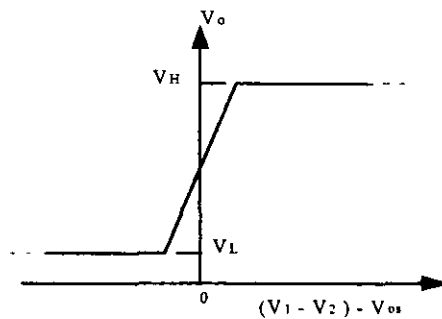
## 4.7 COMPARADORES DE VOLTAJE.

Un comparador de voltaje es un circuito como el que se muestra en la figura 4.22, se usa para comparar dos voltajes de entrada  $V_1$  y  $V_2$  para producir un voltaje de salida  $V_o = V_H$  si  $V_1 > V_2$  y  $V_o = V_L$  si  $V_1 < V_2$ , donde  $V_H$  y  $V_L$  son dos niveles de voltajes de salida fijos.



**Figura 4.22.-** Circuito comparador.

En la figura 4.23 se observa la gráfica  $V_o$  vs  $V_i = (V_1 - V_2)$  en donde se muestra la forma de onda característica de los niveles de transferencia de un comparador. Dependiendo del tipo de comparador en particular y de los niveles de voltaje suministrados,  $V_H$  y  $V_L$  estarían con polaridades opuestas con  $V_H$  positivo y  $V_L$  negativo, o ambos estarían positivos, o ambos estarían negativos.



**Figura 4.23.-** Forma de onda de los niveles de transferencia de un comparador.

La ganancia en lazo-abierto de un comparador es muy grande, aunque generalmente menor que la de los amplificadores operacionales.

Un comparador puede ser considerado como un simple convertidor analógico-digital (A/D) de un bit, produciendo una salida digital 1 para  $V_o = V_H$ , si el voltaje analógico de entrada  $V_1$  es superior al nivel de referencia  $V_{REF} = V_2$ . Un 0 digital  $V_o = V_L$  resultaría si la caída del nivel de voltaje de entrada disminuyera por debajo del nivel de referencia.

Los amplificadores operacionales pueden ser usados como comparadores de voltaje. Un comparador es diseñado especialmente para operar bajo condiciones de lazo-abierto, básicamente es un dispositivo de interrupción. Por otro lado, un amplificador operacional (AOP), es por lo general utilizado en configuración de lazo-cerrado ó (amplificador lineal).

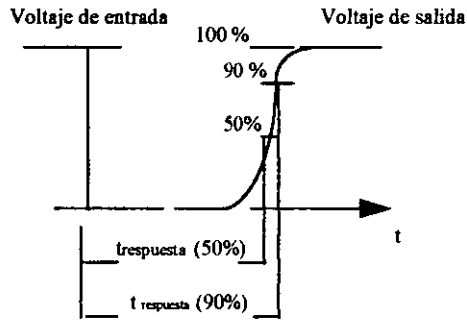
Un AOP está diseñado para producir una salida de 0 volts cuando la diferencia en la señal de entrada es normalmente cero. Un comparador, en contraste, opera entre dos niveles fijos de voltaje de entrada, así para obtener el voltaje de salida para cero volts la entrada es generalmente cualquiera de los dos niveles  $V_H$  ó  $V_L$ , dependiendo de la polaridad de compensación del voltaje de entrada.

Existen muchas aplicaciones para los comparadores. Estas incluyen generadores del pulso, generadores de onda cuadrada, generadores de onda triangular, moduladores de ancho de pulso, detectores de nivel, detectores de cruce por cero, regeneradores de pulso, receptores de línea, comparadores de límite, osciladores controlados por voltaje. Convertidores A/D, y generadores retraso de tiempo.

La característica más importante de un comparador es generalmente el tiempo de respuesta o retraso de tiempo de propagación, este es el tiempo entre la transición de voltaje de entrada y alguno de los puntos específicos en la transición del voltaje de salida, como se



muestra en la figura 4.24. Un punto frecuentemente usado es el punto 50%, si bien alguna vez el punto 90% es especificado.



**Figura 4.24.-** Gráfica de respuesta en el tiempo de un comparador.

La configuración de los circuitos comparadores, está diseñada para convertir señales de bajo nivel analógico a una salida digital de nivel alto.

#### 4.7.1 SELECCIÓN DE LOS NIVELES DE REFERENCIA Y ALARMAS.

Para determinar la magnitud de una falla en una máquina rotatoria, se toma un valor **rms** de referencia, en condiciones normales de operación de la máquina, a este valor se le obtiene el porcentaje del 5 al 20 por ciento, estos valores de porcentaje sumados al valor de referencia, son prefijados en los circuitos comparadores figura 4.25, los cuales al ser rebasados activan indicadores luminosos mostrando el desarrollo de la falla, teniendo el último nivel prefijado de referencia como nivel de máxima alerta, si este nivel es superado se activará simultáneamente una señal luminosa y una audible.

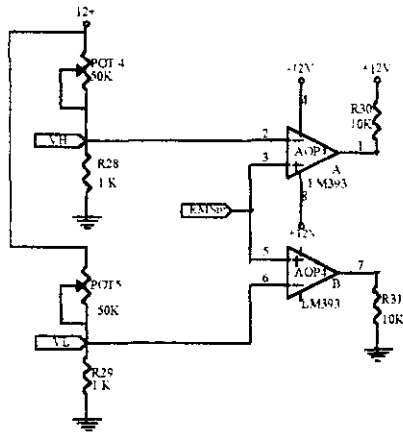


Figura 4.25.- Comparador de ventana.

Diseño :

Para determinar el porcentaje de la falla se utilizó el comparador de ventana mostrado en la figura 4.26, formado por el comparador AOP4A y el comparador AOP4B, el voltaje de entrada  $RMS_{IN}$  se conecta a la entrada (-) del comparador AOP4A y a la entrada (+) del comparador AOP4B.

El límite superior  $VH = RMS_{ref} + 20\%$  es ajustado con el potenciómetro POT4 configurado como divisor de voltaje conectado a la entrada (-) de AOP4A, en tanto que el límite inferior  $VL = RMS_{ref} + 5\%$  ajustado de igual forma con el POT5 que el anterior conectándose a la entrada (+) de AOP4B. Cuando  $V_{in}$  cae entre VL y VH, un indicador verde D11 se ilumina, indicando que la falla está en un nivel permisible. Pero cuando  $RMS_{IN}$  está abajo de VL el indicador D12 de luz roja se ilumina, y cuando  $RMS_{IN}$  va hacia arriba de VH, el indicador de alarma roja parpadeará simultáneamente con el indicador audible, para indicar que la falla está por encima del límite máximo preestablecido.

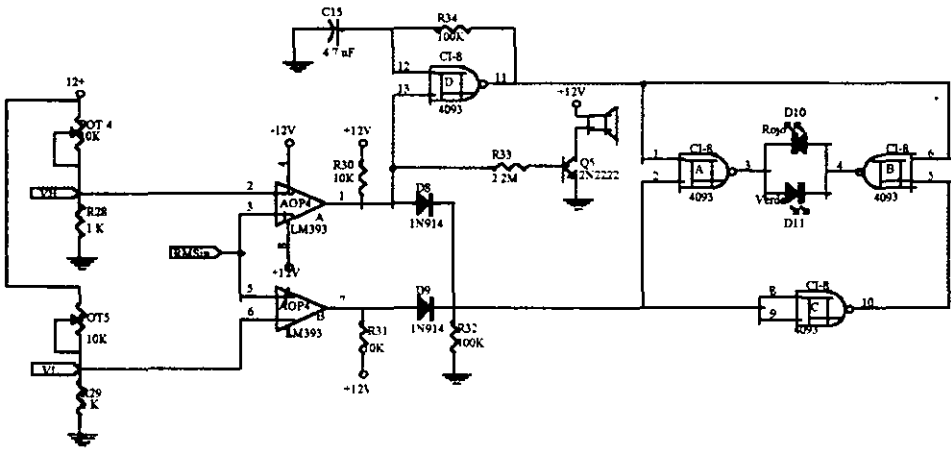


Figura 4.26.-Alarma visual y audible.

Ambas salidas de AOP4A y AOP4B son bajas cuando el  $RMS_{IN}$  está entre los límites. Con tal resultado, hay un nivel alto en CI-8A-3 y un bajo en CI-8B-4, polarizando el D11 led verde. Si  $RMS_{IN}$  disminuye por debajo del limite aceptable, la salida de CI-6B será un nivel alto. Los cambios de estado de ambos CI-8A y CI-8B via D9, iluminan el led rojo en D12 para indicar una condición de bajo voltaje. Cuando el nivel  $RMS_{IN}$  este dentro de los límites preestablecidos, el oscilador CI-8D permanece inactivo figura 4.27.

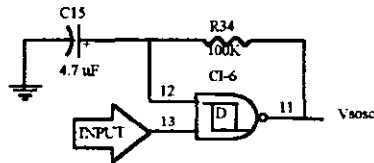


Figura 4.27.- Circuito Oscilador del circuito de alarma.

Si  $RMS_{in}$  se sobrepone a el limite VH, CI-8A-1 pasa a nivel alto. Esto cambiará el estado de CI-8A y CI-8B via D8, polarizando el indicador D12 rojo. Por lo que, la terminal 13 del

CI-8D también estaría en nivel alto y activando al oscilador y el indicador audible, causando el parpadeo del indicador luminoso D12 color rojo. Significando una condición de alerta, figura 4.28.

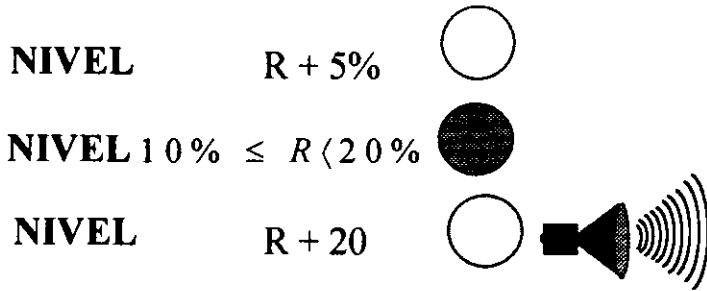


Figura 4.28.- indicadores luminosos y alarma audible.

**ALARMA AUDIBLE.**

De acuerdo con la figura 4.26, la alarma auditiva se activa en el momento en que  $RMS_{in}$  sobrepasa el límite  $VH$ , ocasionando que la terminal de salida de U1A tenga un nivel alto, con lo cual D8 conduce, produciéndose una corriente que alimenta a la base del transistor Q5 a través de R34, figura 4.29.

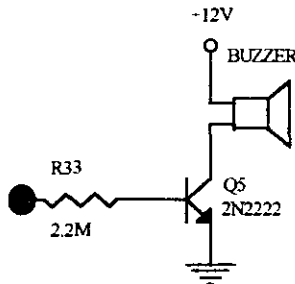


Figura 4.29.- Alarma audible.

Diseño:

Se utilizó el transistor 2N2222, un buzzer y dos resistencias. Consultando la hoja de datos del fabricante, obtenemos los siguientes datos del transistor :

La ganancia y la corriente promedio para  $Q_3$  de acuerdo con la hoja del fabricante tenemos :

$$\beta_{prom} = 100$$

$$I_{C_{prom}} = 50mA$$

el circuito de alarma audible tiene un voltaje de polarización de  $V_{POL} = 12 V$ , por lo que acuerdo con la ley de Hom se tiene :

$$R_c = \frac{V_{POL}}{I_c} \quad \text{ec. (5.19)}$$

sustituyendo valores en la ec.(4.19) tenemos que :

$$R_c = 240 \Omega$$

Utilizando el voltaje de saturación del comparador de ventana :

$$V_{SAT} = 12 V$$

tenemos que :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad \text{ec.(4.20)}$$

$$I_B = \frac{V_{en}}{R_B} \quad \text{ec.(4.21)}$$

Sustituyendo valores en la ec.( 4.20) tenemos que:

$$I_B = 0.05 \text{ mA}$$

Despejando  $R_B$  en la ec. (4.21) y sustituyendo el valor de  $I_B$  tenemos:

$$R_B = 2.4 \text{ M}\Omega$$

donde:

$V_{en}$  es el voltaje máximo de saturación cuando el voltaje que se esta comparando y tomando como voltaje de referencia es rebasado

$$V_{en} = 12 \text{ V}$$

#### 4.8 SENSOR DE ROTACIÓN.

Para llevar acabo la lectura de la frecuencia de trabajo de la máquina rotatoria se adapto un sensor de rotación, este consiste, de un fotosensor y una placa reflectora de luz adaptado al eje de la máquina, figura 4.30.

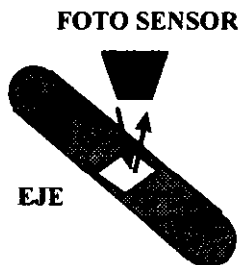


Figura 4.30.- Sensor de rotación

La frecuencia de rotación de una máquina, es detectada por el fotosensor HOA1405, éste consta de un Diodo Emisor de Luz Infrarrojo DELI y un foto detector FD integrados en un solo paquete, posee un ángulo entre emisor y receptor de 45 grados. El DELI emite la luz reflejada sobre la placa reflectora acondicionada al eje de la máquina, el FD convierte la luz reflejada en señal analógica, esta señal es convertida a niveles logicos mediante un circuito disparador Schmith, proporcionando un “1” lógico a cada rotación del eje, figura 4.31.

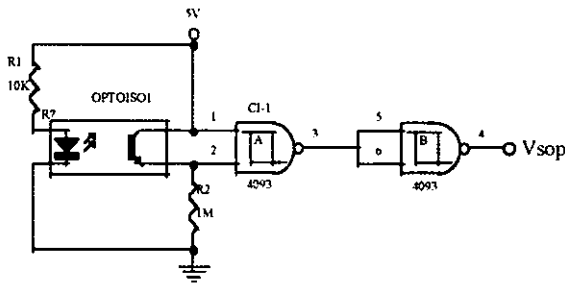


Figura 4.31.- Circuito sensor de rotación.

Diseño :

El fotosensor utiliza un voltaje de polarización de :

$$V_{POL} = 12 \text{ V}$$

De la hoja de fabricante tenemos <sup>21</sup>.

$$I_{DELI} = 40 \text{ mA}$$

$$I_{FD} = 30 \text{ mA}$$

Para estos valores de corriente y tomando en consideración que a menor corriente tanto en el FD como del DELI se obtiene una mejor sensibilidad para el sensor de rotación, se propusieron las siguientes resistencias :

$$R_{DELI} = 10 \text{ K}\Omega, R_{FD} = 1 \text{ M}\Omega$$

Con las resistencias  $R_{DELI}$  y  $R_{FD}$  y sustituyendo estos valores en las ecuaciones de corriente correspondientes se tienen :

$$I_{DELI} = \frac{V_{CC}}{R_{DELI}} ; I_{DELI} = 1.2 \text{ mA}$$

$$I_{FD} = \frac{V_{CC}}{R_{FD}} ; I_{FD} = 12 \text{ } \mu\text{A}$$

#### 4.8.1 CONVERTIDOR DE FRECUENCIA A VOLTAJE.

Los niveles lógicos obtenidos a la salida del disparador schmitt, son proporcionales a la frecuencia de rotación de una máquina, para determinar la magnitud de dicha frecuencia se utiliza un convertidor de frecuencia a voltaje (CFV) LM331, CI-2, figura 4.32.

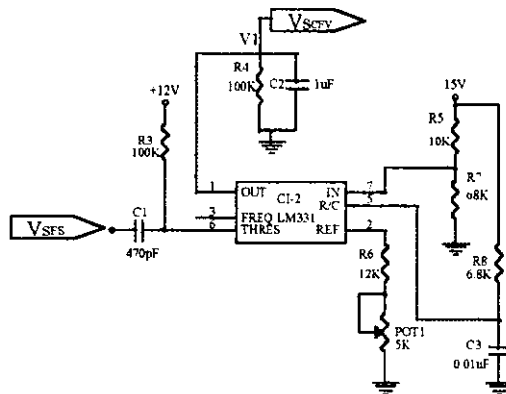


Figura 4.32.- Convertidor de frecuencia a voltaje

El CFV acepta en su entrada un tren de pulsos o una onda cuadrada.



El CFV es versátil y bastante útil en sistemas modernos de adquisición de datos. Su aplicación elemental es convertir en voltaje una frecuencia determinada.

Diseño:

El voltaje de salida se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$V_{OUT} = f_{in} \left( \frac{R_L}{R_S} \right) (1.9V) (1.1R_i C_i) \quad \text{ec. (4.22)}$$

Los valores de los componentes utilizados para el diseño del CFV son recomendados por el fabricante<sup>18</sup>.

Si sustituimos datos en la ec. (4.22), obtenemos la relación proporcional entre la frecuencia de entrada y el voltaje de salida del CFV, mostrados en la tabla 4.2.

Frecuencia de entrada $F_{IN}$ (Hz)	Voltaje de salida $V_{OUT}$ (V)
20	0.02
30	0.03
40	0.04
50	0.05
60	0.06
100	0.1
500	0.5
1000	1
5000	5
10000	10

**Tabla 4.2.** Relación entre frecuencia y voltaje de salida del CFV

Durante el ciclo de reloj dado por :

(  $t = 1.1 \times Rt \times Ct = 75\mu s$  ), y una corriente dada por :  $i = \frac{1.9V}{Rs}$  que fluye en de la terminal

1 del LM331, y carga V1 a un valor un poco más alto que la tasa promedio DC de V1.

Este CFV poseé buena linealidad, menor al 0.1% en el rango de 500 Hz a 10 KHz. Para frecuencias entre 20 Hz y 200 Hz, Vout no es muy proporcional, para 0 Hz, el rendimiento será indeterminado, porque el muestreo y retención nunca obtendrá una muestra. El rango de frecuencia adecuado del F-Ves de 20:1.

#### 4.8.2 LECTOR DIGITAL.

Para desplegar las lecturas de los voltajes obtenidos con el CFV(frecuencias), voltajes RMS y niveles preestablecidos, se diseño un lector digital LD, para ello se utilizó el circuito integrado ICL7107 CI-3, este CI es un voltmetro digital El ICL7107, cuenta internamente con tres decodificadores de 7 segmentos, alimentadores de despliegue, referencias y un oscilador, figura 4.33.

##### Principio de operación

En figura 4.34, muestra el diagrama a bloques del CI ICL7107. El circuito oscilador controla la lógica a una velocidad de aproximada de 12 Khz. Esta frecuencia se establece mediante  $C_{osc}$  y  $R_{osc}$ . Debe ser un múltiplo de la frecuencia de línea (60 Hz) para que el voltmetro sea inmune al ruido de línea.

La conversión de voltaje analógico de entrada a salida digital se realiza en tres fases y requiere cerca de un tercio de segundo. A las fases de operación se les da el nombre de *fase integradora de señal*  $T_1$ , *fase integradora de referencia*  $T_2$ , y *fase de respuesta a cero*  $T_2$ . Estas fases se explican a continuación :

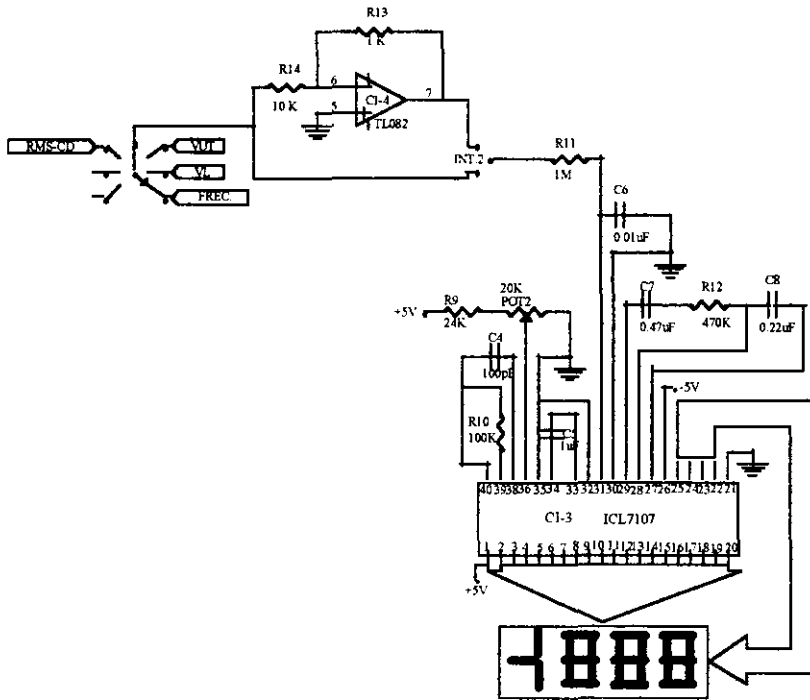


Figura 4.33.-Vólmetro Digital.

### Fase integradora de señal $T_1$

La unidad de control lógico figura 4.34 conecta  $V_{ent}$  a un integrador para iniciar la fase  $T_1$ . La salida  $V_0$  del integrador o generador de rampa aumenta o disminuye según la polaridad de  $V_{ent}$  y la velocidad establecida por  $V_{ent}$ ,  $R_{ent}$  y  $C_{ent}$ . Si  $V_{ent}$  es negativo,  $V_0$  aumenta como se aprecia en la figura 4.35. La unidad lógica  $T_1$  fija para 1000 pulsos se reloj.  $T_1$  dura 88.88 ms porque el reloj de 11.25 KHz tiene un periodo de 88.88  $\mu$ s.

Si  $V_{ent} = -1V$ ,  $V_0$  aumentará de 0 V a 88.88 mV. El valor máximo permitido de  $V_{ent}$  a plena escala es  $\pm 2V$ . Cuando  $V_{ent} = -2 V$ ,  $V_0$  aumentará a un máximo de 177.76 mV. Por supuesto,  $V_0$  es directamente proporcional a  $V_{ent}$ . Al final de 1000 pulsos la unidad lógica desconecta  $V_{ent}$  y conecta  $V_{ref}$  al integrador. Esta acción termina  $T_1$  y comienza  $T_2$ .

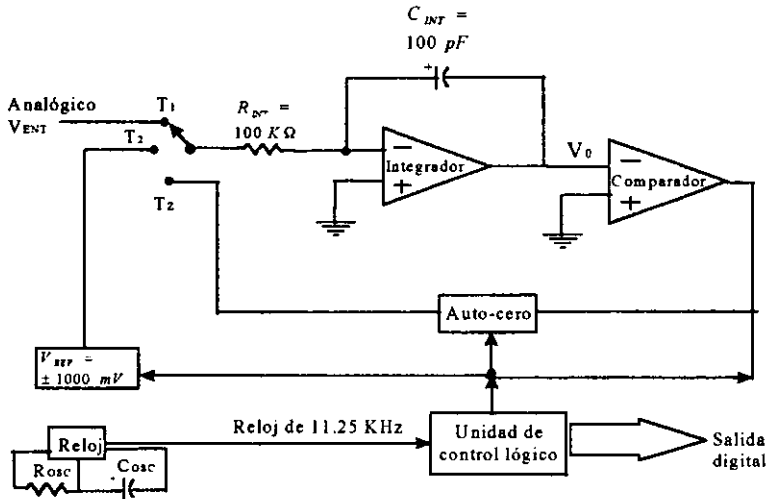


Figura 4.34.-Diagrama a bloques del CI ICL7107.

### Fase integradora de referencia

Durante la fase  $T_1$  la unidad lógica determina la polaridad de  $V_{ent}$  cargando al capacitor,  $C_{ref}$  a un voltaje de referencia  $V_{ref} = 1V$ . Al iniciarse la fase  $T_2$ , la unidad lógica conecta  $C_{ref}$  al integrador, de esta manera es que  $V_{ref}$  tiene la polaridad opuesta a  $V_{ent}$ . En consecuencia,  $V_{ref}$  llevará al integrador otra vez a cero. Dado que  $V_{ref}$  es constante, la salida del integrador  $V_0$  disminuirá a velocidad constante, figura 4.35.

Cuando  $V_0$  llega a cero, un comparador le indica a la unidad lógica que termine la fase  $T_2$  e inicie la fase de puesta a cero. Así,  $T_2$  es proporcional a  $V_0$  y, por lo mismo, a  $V_{ent}$ .

$$T_2 = T_1 \frac{V_{ENT}}{V_{REF}} \quad \text{ec.(4.23a)}$$

Puesto que  $T_1 = 88.88 \text{ ms}$  y  $V_{ref} = 1 V$ ,

$$T_2 = \left( 0.833 \frac{ms}{mV} \right) V_{ENT} \quad \text{ec. (4.23b)}$$

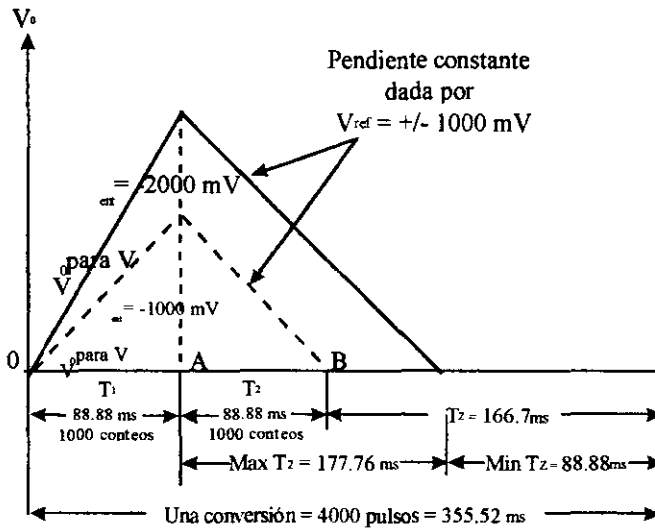


Figura 4.35.- Temporizado para las fases  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_Z$ .

### Conversión

La conversión del voltaje analógico  $V_{ent}$  al conteo digital se produce durante  $T_2$  como sigue. La unidad de control conecta el reloj a un contador interno binario codificado en decimal, al iniciarse la fase  $T_2$ . El reloj se desconecta del contador al terminar  $T_2$  el valor alcanzado se convierte en la salida digital. Salida que establecen  $T_2$  y la frecuencia de reloj:

$$\text{salida digital} = \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} \right) T_2 \quad \text{ec. (4.24a)}$$

pero  $T_2$  se establece mediante  $V_{ent}$  a partir de la ec. (5.23a) y, por consiguiente,

$$\text{salida digital} \left( \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} \right) (T_1) \left( \frac{V_{ENT}}{V_{REF}} \right) \quad \text{ec. (4.24b)}$$

Puesto que la frecuencia de reloj es de 11.25 KHz,  $T_1 = 88.88 \text{ ms}$  y  $V_{ref} = 1 \text{ V}$ , la ecuación de salida-entrada es

$$\text{salida digital} = \left( 11,250 \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} \right) \left( \frac{88.88\text{ms}}{1\text{V}} \right) V_{ENT}$$

o bien

$$\text{salida digital} = \left( 0.999 \frac{\text{pulsos}}{\text{mV}} \right) V_{ENT}$$

La salida del contador está conectada a un display de 3 ½ dígitos.

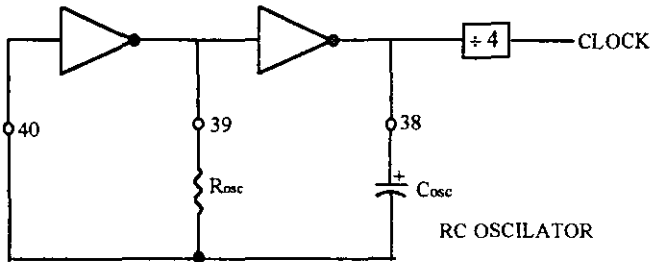
### Fase de auto-cero

En el diagrama a bloques de la figura 4.34 se observa la sección de *puesta a cero*. Durante la tercera fase de conversión,  $T_3$ , la unidad lógica activa varios interruptores analógicos y conecta un capacitor de puesta a cero  $C_{AZ}$ .

El capacitor de autocero se conecta a través del capacitor integrador  $C_{int}$  y a cualquier desviación de voltaje de entrada de los amplificadores operacionales integradores y comparadores.  $C_{AZ}$  se carga a un voltaje aproximado al voltaje de error promedio debido a  $C_{ent}$  y a la desviación de voltajes. Durante las siguientes fases  $T_1$  y  $T_2$ , el voltaje de error almacenado en  $C_{AZ}$  se conecta para cancelar cualquier voltaje de error en  $C_{ref}$ . Por tanto, el volómetro digital automáticamente se pone a cero.

**Sistema de reloj**

En la figura 4.36 se muestra el arreglo de Buffers internos que utiliza el ICL 7107 configurado como circuito oscilador R-C.



**Figura 4.36.-** Reforzadores de corriente configurados como circuito oscilador.

Consultando la gráfica de tiempos de la figura 4.35, se obtiene la siguiente relación de ciclos de reloj para cada una de las tres fases de conversión :

1. La unidad lógica toma 4000 pulsos de reloj para una conversión. A 88.88  $\mu$ s por cuenta, la conversión tarda 355 ms. La unidad de control asigna invariablemente 1000 pulsos, o sea, 88.88 ms a la fase  $T_1$ .
2. El número de pulsos necesarios para  $T_2$  depende de  $V_{ent}$ . Se cuenta hasta cero para  $V_{ent} = 0$  V y hasta un máximo de 2000, o sea, 177.76 ms cuando  $V_{ent}$  se encuentra en el límite máximo de  $\pm 2000$  mV.
3.  $T_2$  y  $T_3$  siempre comparten un intervalo total de 1000 a 3000 pulsos con un total de 266.64 ms. Para  $V_{ent} = 0$  V,  $T_2 = 0$  pulsos y  $T_3 = 3000$  pulsos. Para  $V_{ent} = \pm 2000$  mV,  $T_2 = 2000$  pulsos y  $T_3 = 1000$  pulsos.

**Diseño:**

La frecuencia de oscilación se establece por medio de la ec (4.25).

$$f_{osc} = \frac{0.45}{RC} \quad \text{ec.(4.25)}$$

donde:  $C_{osc} > 50pF$  y  $R_{osc} > 50K\Omega$ . Considerando estos parámetros se eligieron los siguientes valores:  $C_{osc} = 100 pF$  y  $R_{osc} = 100 K\Omega$ , sustituyendo estos datos en la ec. (4.25). Obtenemos que :

$$f_{osc} = 45KHz$$

El periodo de oscilación se obtiene a partir de la ec.(4.26)

$$t_{osc} = \frac{1}{f_{osc}} \quad \text{ec.(4.26)}$$

por lo tanto:

$$t_{osc} = 22.22 \mu s$$

La frecuencia de integración de reloj se establece con la siguiente ecuación :

$$f_{clock} = f_{osc}/4 \quad \text{ec. (4.27)}$$

sustituyendo el valor de  $f_{osc}$  obtenemos :

$$f_{clock} = 11.25 KHz$$



El periodo de integración se obtiene a partir de

$$t_{INT} = (1000) \left( \frac{4}{f_{OSC}} \right) \quad \text{ec. (4.28)}$$

sustituyendo valores se tiene :

$$t_{INT} = 88.89 \text{ms}$$

El fabricante establece que la corriente de integración óptima es de :

$$I_{INT} = 4 \mu A$$

Escala total de voltaje analógica de entrada:

$$V_{INFS} (typ) = 2V$$

Resistencia de integración esta dada por :

$$R_{INT} = \frac{V_{INFS}}{I_{INT}} \quad \text{ec. (4.29)}$$

sustituyendo valores :

$$R_{INT} = 500 \text{K}\Omega$$

el Capacitor de integración se determina por :

$$C_{INT} = \frac{(t_{int})(I_{INT})}{V_{INT}} \quad \text{ec. (4.30)}$$

El voltaje de integración típico recomendado por el fabricante es :

$$V_{INT}(typ) = 2V$$

sustituyendo valores en la ec.(4.30) se obtiene :

$$C_{INT} = 18\mu F$$

El ICL7107 presento mejores resultados con un capacitor :

$$C_{INT} = 22\mu F$$

voltaje de integración de salida está dado por :

$$V_{INT} = \frac{(t_{INT})(I_{INT})}{C_{INT}} \quad \text{ec.(4.31)}$$

El resultado del display se obtiene por:

$$Count = 1000 \times \frac{V_{IN}}{V_{Ref}} \quad \text{ec.(4.32)}$$

Para el capacitor de auto cero el fabricante recomienda que su valor se encuentre entre:

$$0.01\mu F < C_{AZ} < 1\mu F$$

por lo cual se propuso :

$$C_{AZ} = 0.01\mu F$$

El capacitor de referencia recomendado por el fabricante debe estar entre :

$$0.1\mu F < C_{ref} < 1\mu F$$

El ICL 7107 tiene un rango máximo de lectura hasta de 2 V, para lecturas de voltaje mayores se adapto un circuito atenuador de voltaje (ver anexo 2), obteniendo de esta forma lecturas hasta de 10 V.

# CAPITULO 5

"DIAGRAMAS ELECTRICOS Y  
CIRCUITOS IMPRESOS"

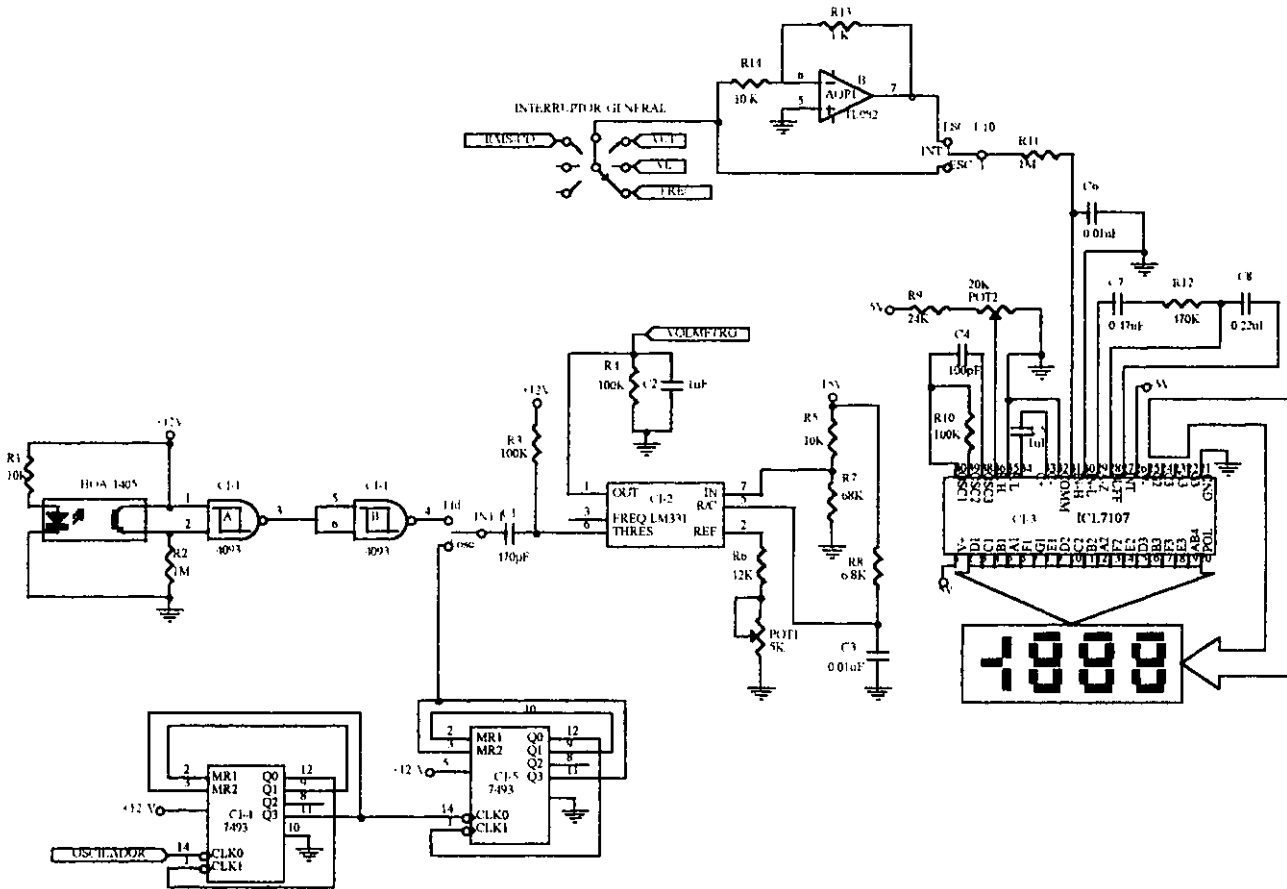


Figura 5.1.-Volmetro digital para la medición de: Frecuencia, valores RMS y Valores de referencia.

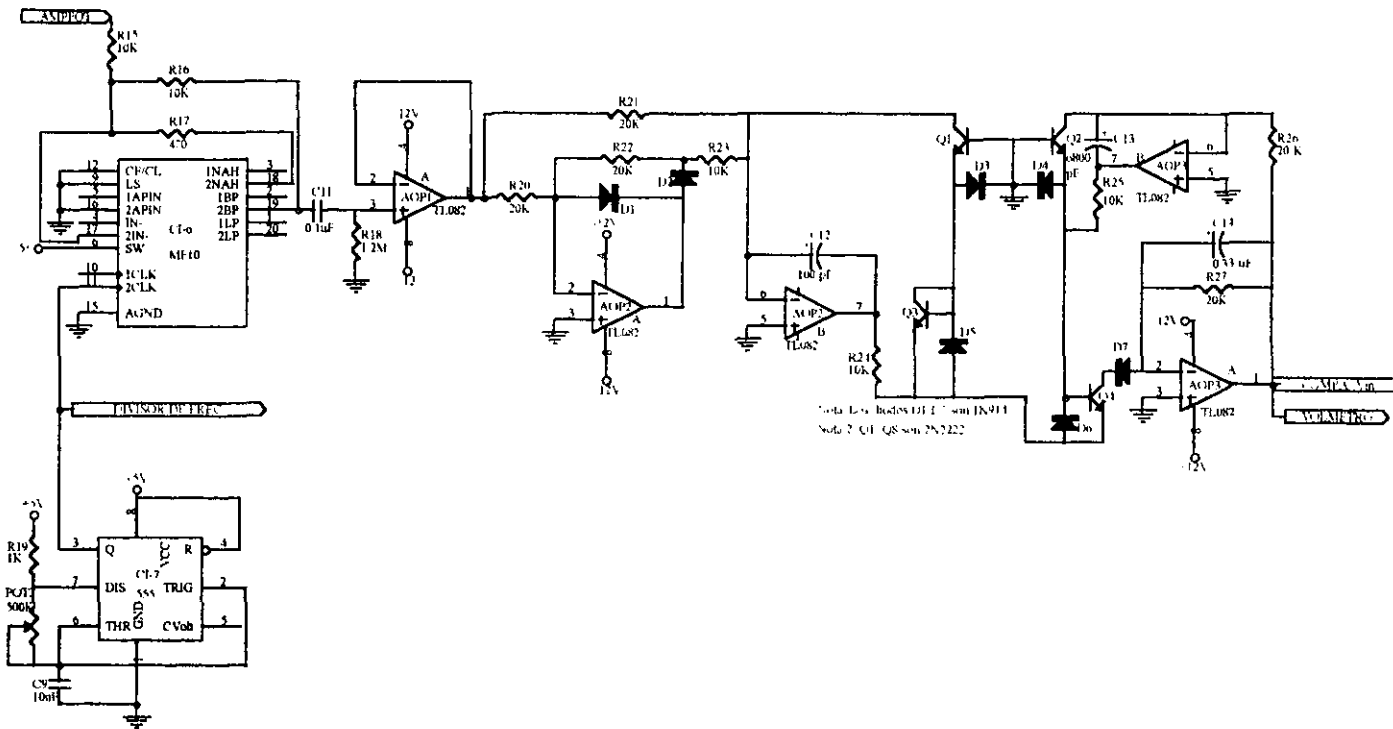


Figura 5.2.- Filtrado de la señal de vibración y conversión de RMS a cd.

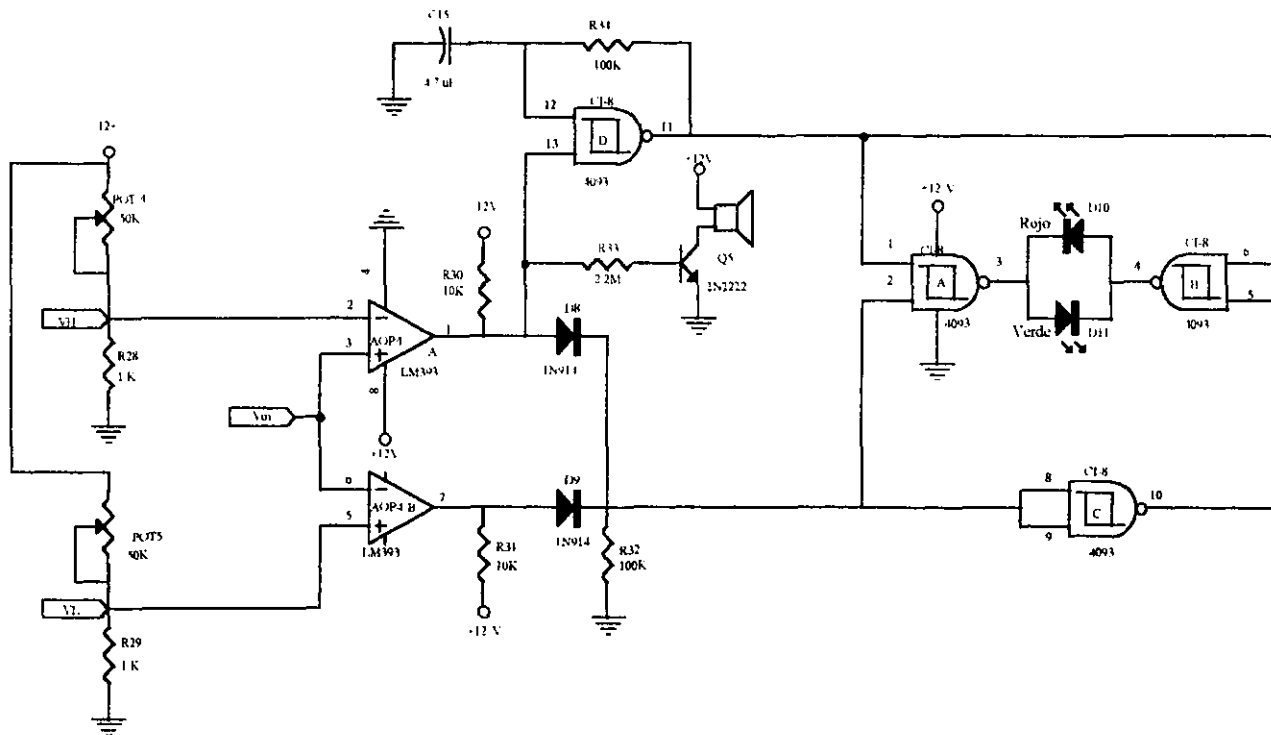


Figura 5.3.- Selección de los valores de referencia e indicadores visuales y audible (Alarmas)

CIRCUITOS IMPRESOS

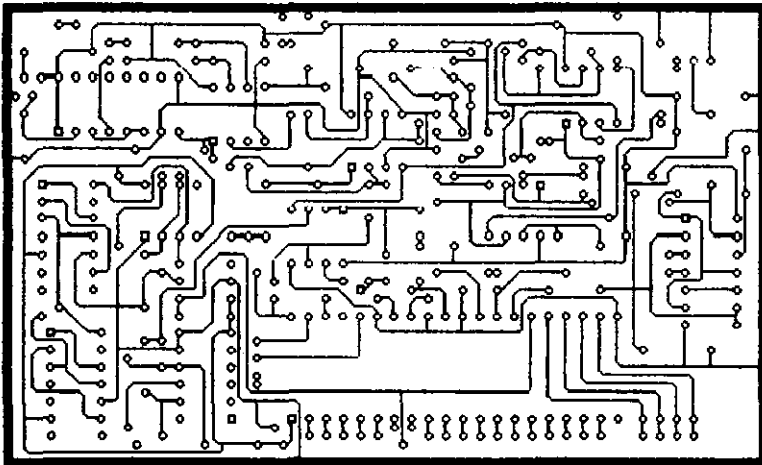
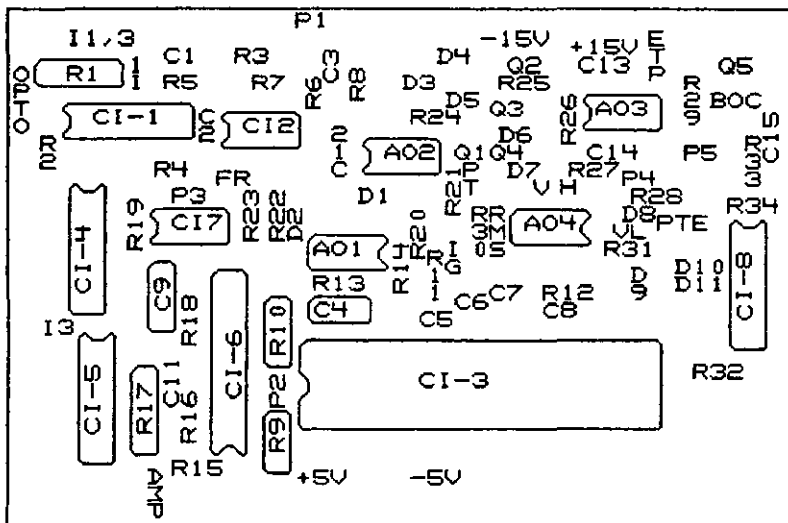


Figura 5.4.- Circuito impreso general.



# CAPITULO 6

"PRUEBAS DE OPERACION EN  
LABORATORIO Y CAMPO"



## **CAPITULO 6**

### **PRUEBAS DE OPERACIÓN EN LABORATORIO Y CAMPO.**

En este capítulo se muestra el funcionamiento del Monitor Electrónico de Fallas para Máquinas Rotatorias, con pruebas de operación realizadas en laboratorio y mediciones en campo.

#### **6.1. PRUEBA DE OPERACIÓN EN LABORATORIO.**

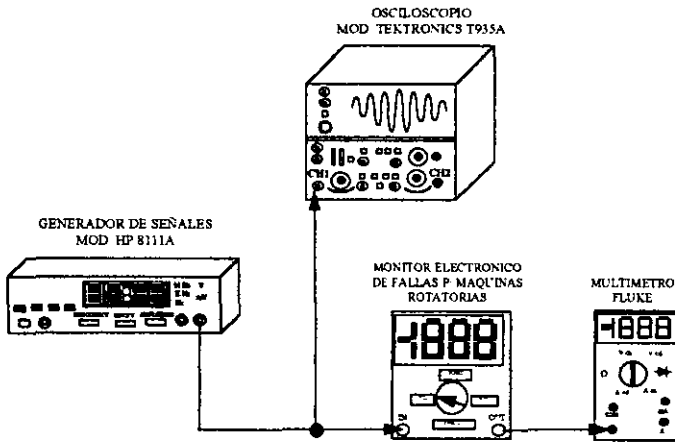
En esta prueba de operación se simuló con un generador de señales posibles fallas importantes en una máquina rotatoria.

##### **6.1.1 MATERIAL Y EQUIPO EMPLEADO.**

2. Generador de señales Mod. Hp 8111A.
3. Osciloscopio Mod. Tektronics T935A.
3. Fuente de alimentación Mod. HP6205B
4. Multímetro Digital Mod. Fluke 75.
5. Monitor electrónico de fallas para máquinas rotatorias.

##### **6.1.2 DIAGRAMA DE CONEXIONES.**

La figura 6.1 muestra el diagrama de conexión de la instrumentación utilizada para la operación en laboratorio del "Monitor Electrónico de Fallas para Máquinas Rotatorias".



**Figura 6.1.-** Diagrama de conexión de la instrumentación utilizada para la prueba de operación en laboratorio.

### 6.1.3 CONDICIONES INICIALES DE LA PRUEBA.

- Onda senoidal (señal de entrada) con amplitud variable.
- Rango de frecuencia de la señal de entrada 0-180 Hz.
- Toma de niveles **rms** con el monitor y el volmetro.
- Selección de la frecuencia de corte del filtro Pasa-Banda en 60, 120 y 180 Hz, las cuales son frecuencias características de fallas, como : Desbalance, aflojamiento mecánico y falta de alineamiento como se puede ver en la tabla 2.2.

### 6.1.4 CRITERIO DE ACEPTACIÓN.

El "Monitor electrónico de fallas para máquinas rotatorias" debe de ofrecer una respuesta confiable en la detección de los niveles de amplitud y frecuencia de las fallas características en las máquinas rotatorias durante su operación.

### 6.1.5 PROCESO DE OPRERACIÓN.

Para este proceso se conectó la instrumentación como se muestra en la figura 6.1, posteriormente, se seleccionaron señales senoidales de amplitud variable y frecuencias características de posibles fallas, visualizándose el desarrollo de estas en el “Monitor electrónico de fallas para máquinas rotatorias”. Las señales se monitorearon simultáneamente en el osciloscopio, en el monitor electrónico y en el multímetro para comparar las lecturas de frecuencia y voltaje.

Se toma la señal senoidal de entrada con 1 Voltio de amplitud pico como condición normal de operación.

Se simula el desbalanceo de un máquina, con frecuencia de rotación de 3600 r.p.m. o  $F_t = 60$  Hz., los resultados se muestran en la tabla 6.1.

Amplitud Pico (V)	$V_{RMS}$ Volmetro(V)	$V_{rmsR}$ Monitor (V)	$V_{rmsR} + 5\%$ (V)	$V_{rmsR} + 20\%$ (V)	Alarma auditiva
1	0.695	0.705	0.742	0.85	no
1.5	1.058	1.11			si
2.0	1.412	1.46			si

**Tabla 6.1.-** Desarrollo de una falla debida a desbalanceo.

Se simula una falla por aflojamiento mecánico de un máquina, con frecuencia  $F_{am} = 120$  Hz., los resultados se muestran en la tabla 6.2.

Amplitud Pico (V)	$V_{RMS}$ Volmetro(V)	$V_{rmsR}$ Monitor (V)	$V_{rmsR} + 5\%$ (V)	$V_{rmsR} + 20\%$ (V)	Alarma auditiva
1	0.695	0.705	0.742	0.85	no
1.5	1.04	1.05			si
2.0	1.40	1.40			si

**Tabla 6.2.-** Desarrollo de una falla debida por aflojamiento mecánico.

Se simula una falla de falta de alineamiento de un máquina, con frecuencia  $F_b = 180 \text{ Hz}$ , los resultados se muestran en la tabla 6.3.

Amplitud Pico (V)	$V_{RMS}$ Volmetro	$V_{rmsR}$ Monitor	$V_{rmsR} + 5\%$ (V)	$V_{rmsR} + 20\%$ (V)	Alarma auditiva
1	0.675	0.685	0.742	0.85	no
1.5	0.949	0.959			si
2.0	1.24	1.24			si

Tabla 6.3.-Desarrollo de una falla debida a falta de alineamiento.

## 6.2 PRUEBA DE OPERACIÓN EN CAMPO.

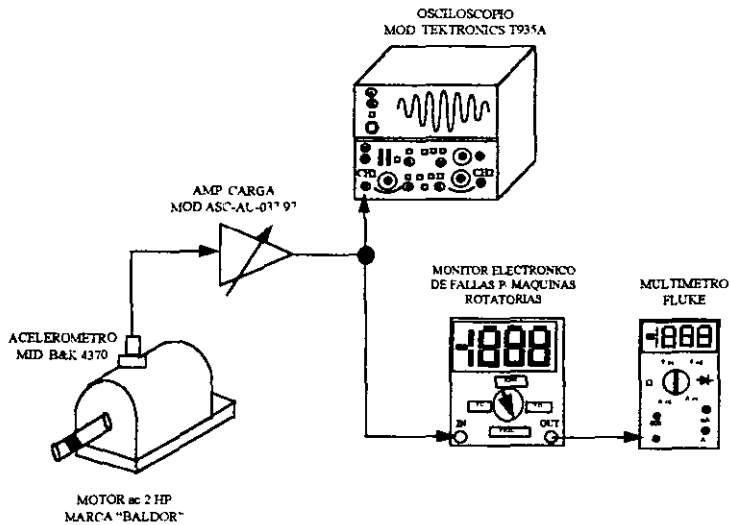
En esta prueba de operación se generaron posibles fallas importantes en una máquina rotatoria.

### 6.2.1 MATERIAL Y EQUIPO EMPLEADO

1. Motor de corriente alterna 2 Hp. Marca BALDOR
2. Acelerómetro B&K Mod. 4370.
3. Amplificador de carga mod. B & K 2634
4. Osciloscopio Mod. Tektronics T935A
5. Fuente de alimentación Mod. HP6205B
6. Multímetro Digital Mod. Fluke 75.
7. Monitor electrónico de fallas para máquinas rotatorias.

### 6.2.2 DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL EQUIPO.

La figura 6.2, muestra el diagrama de conexión de la instrumentación utilizada para la operación del monitor en campo.



**Figura 6.2.-** Diagrama de conexión de la instrumentación utilizada para la prueba de campo.

### 6.2.3 CONDICIONES PARA LA OPERACIÓN EN CAMPO.

- Polarización del amplificador de carga con +/- 12 V
- Motor en condiciones normales de operación a frecuencias de 60, 120 y 180 Hz.
- Toma de un nivel de referencia en condiciones normales de operación del motor con el monitor y el multímetro.
- Operación del motor con desajustes para producción de fallas como : Desbalance, aflojamiento mecánico y falta de alineamiento.
- Ajuste de los niveles de referencia del monitor entre el 5 y el 20 % de la amplitud de la señal filtrada con el motor operando en condiciones normales.
- Selección de la frecuencia de corte del filtro Pasa-Banda en las frecuencias características de las fallas, 60, 120 y 180 Hz.

Los resultados operación en campo se muestran en las siguientes tablas :

Frecuencia Hz	Señal de entrada	Vpp Filtrada	V <sub>RMS</sub> Volmetro	V <sub>RMS</sub> Monitor
60	200 mV	40 mV	0.014	0.015
120	300 mV	40 mV	0.014	0.014
180	400 mV	40 mV	0.015	0,015

**Tabla 6.4 .-** Operación del motor en condiciones normales.

Frecuencia Hz	Señal de entrada	Vpp Filtrada	V <sub>RMS</sub> Volmetro	V <sub>RMS</sub> Monitor	V <sub>rms</sub> M+5%	V <sub>rms</sub> M +20%	Alarma
60	200 mV	45 mV	0.016	0.016	0.015	0.017	si
120	300 mV	45 mV	0.016	0.016	0.015	0.017	si
180	400 mV	96 mV	0.034	0,034	0.015	0.017	si

**Tabla 6.5.-** Operación del motor con falla.

En todas las simulaciones se generaron amplitudes de tal forma que se activaran las alarmas, con la finalidad de observar la respuesta del monitor con las diferentes fallas.

# CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

Con la aplicación de un programa de monitoreo periódico en los sistemas rotatorios de la industria convencional, ayudaría al funcionamiento ininterrumpido de sus sistemas y máquinas, disminuyendo los costos en el mantenimiento.

El monitor electrónico de fallas para máquinas rotatorias es un sistema que trabaja en línea detectando desde cuando los defectos en una máquina son leves, indicando que no se está afectando el funcionamiento de una máquina, hasta cuando los defectos son graves el monitor dará una indicación de que la máquina está operando fuera de los límites vibratoriales permitidos.

El monitor es de bajo costo, utiliza componentes electrónicos de fácil adquisición en el mercado nacional y es de fácil manejo. El monitor está diseñado para utilizarse en los cuartos de control o en las áreas de máquinas, en forma permanente o semipermanente..

El monitor por su bajo costo y su efectividad en el seguimiento del desarrollo de posibles fallas en máquinas rotatorias, es un equipo con el cual se pueden sustituir equipos caros, voluminosos y complejos de diagnóstico, además el monitor no requiere de personal técnico o especializado para la elaboración de diagnóstico.

Para este monitor se tiene planeado en un futuro próximo ser mejorado utilizando componentes electrónicos más sofisticados con los cuales se dará más versatilidad y desarrollo de funciones del monitor.



# BIBLIOGRAFIA

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Vibration Measurements, Vibration Analysis. IRD Mechanalysis, 1981.
- [2] SMEATON, Robert W., Motores Eléctricos: Selección, Reparación y Mantenimiento, Ed. MCGraw Hill, Sda. Edición.
- [3] SERRIDGE, Mark, TORBEN, R. Licht, Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers: Teory and Applications Hanbook, Ed. Brüel & Kjaer. 1987, 150 pags.
- [4] WOWK, Victor, Machenery Vibration: Measurement and Analysis, Ed. MCGraw Hill, 1991, 358 pags.
- [5] RIVERA Grijalba, Juan José, Descripción Funcional de un Sistema Experto para el diagnóstico de fallas en rodamientos.
- [6] LOPEZ S., Rodrigo, RUIZ J., Tito Manuel, CUEVAS G., Eduardo, El Mantenimiento Predictivo en Maquinaria Rotativa, CIATEQ A.C.
- [7] GOMEZ-MANCILLA, Julio C., A Rotadynamic Model for Desing and Analysis of Some Typical Machine Malfunctions. Estudios de posgrado e investigación de la ESIME, IPN.
- [8] Condition Monitoring using Time Wavwform Parameters, Shok an Vibration Digest, May-April 1997.
- [9] SOCLOF, Sidney, Design and Applications of Analog Integrated Circuits, Ed. Prentice Hall, 1991.

- [10] COUGHLIN, F., Robert, DRISCOLL, Frederick F., Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados lineales, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1993, pags. 538.
- [11] SAVANT, C.J., RODEN Martin S., CARPENTER Gordon, Diseño Electrónico: Circuitos y Sistemas, Ed. Addison Wesley Iberoamericana, Sda. edición, 1992, pags. 880.
- [12] TOBEY, Gene E., GRAEME D., Jerald, HUELSMAN, Lawrence P., Operational Amplifiers: Design and Applications, Burr-Brown, McGraw Hill, pags. 473.
- [13] WONG, Ju Jen, OTT, William E., Function Circuits: Design and Applications, Ed. Burr-Brown, McGraw Hill.
- [14] Analog Devices, Analog-Digital Conversion Handbook, Chapter fifteen, 1986.
- [15] Electronic Design, Window Comparator, April 18, 1994.
- [16] Harris Semiconductor, Manual de aplicaciones (ICI 7107), agosto 1997.
- [17] National Semiconductor Corporation, National Operational Amplifiers databook, 1995.
- [18] National Semiconductor Corporation, Linear Applications Handbook, 1996.
- [19] Motorola, CMOS LOGIC DATA, Ed. Motorola Inc. 1990.
- [20] Technical Guide and Cross Reference NTE.
- [21] Reflective Assembly -HOA1405-

# ANEXOS

## ANEXO 1

## AMPLIFICADOR INVERSOR.

En la figura I, se ilustra un amplificador inversor, Despejando la tensión de salida,  $V_0$ , en términos de la entrada,  $V_A$ . Se tiene :

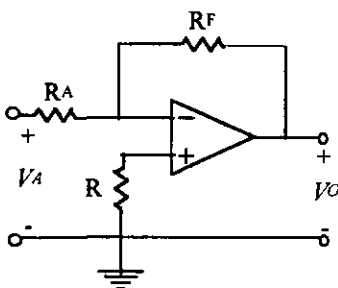


Figura I. Circuito equivalente para el amplificador operacional

1. El voltaje en  $V^+$  es :

$$V_+ = 0$$

2.El voltaje en  $V^-$  es :

$$\frac{V_A - V_-}{R_A} + \frac{V_0 - V_-}{R_F} = 0$$

3. Haciendo  $V_+ = V_-$ , se obtiene

$$V_+ = V_- = 0$$

a ganancia del amplificador inversor es :

$$\frac{V_o}{V_A} = - \frac{R_F}{R_A} \text{ despejando } V_o \text{ se obtiene:}$$

$$V_o = - \frac{R_F}{R_A} V_A$$

la ganancia del amplificador es :

$$A_{cl} = - \frac{R_F}{R_A}$$

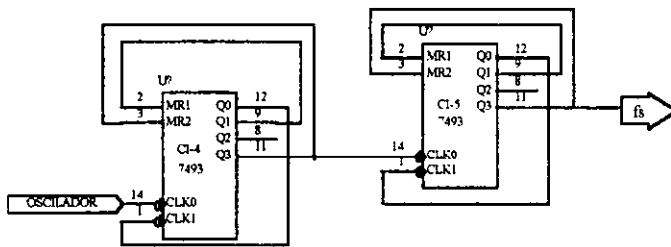
Para que el circuito amplificador no inversor actúe como atenuador de voltaje la condición es:

$$R_f < R_a$$

## ANEXO 2

### DIVISOR DE FRECUENCIA

Debido a que el circuito CFV tiene un rango máximo de lectura de hasta 10 KHz, y los valores de frecuencia manejados por el Oscilador de Frecuencia Variable se encuentran en el rango de 1- 143 KHz, fue necesario adaptar un divisor de frecuencia de 100 :1, logrando de esta forma realizar lecturas mayores de 10 KHz, figura I.



**Figura I.-** Divisor de frecuencia 100 : 1.

Para realizar el divisor de frecuencia se utilizaron dos contadores binarios 7493 CI-4,-5, divisores entre 10.

### ***Agradecimientos:***

Al M. en C. Antonio S. Rojas Salinas, quien con sus enseñanzas, paciencia y apoyo logro que se culminase este trabajo de tesis.

A los Ingenieros J.J. Ramón Mejia Roldán, Abel Verde Cruz y en especial al P. de Ing. Sergio Garcia Hernandez por su ayuda(*reconozco que doy mucha lata*).

Finalmente mi más sincero agradecimiento al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (I.N.I.N) en donde se desarrollo este trabajo de tesis y en particular a mis amigos de la ruta "Clinica 25" por los ratos de sano esparcimiento ofrecidos. Gracias