



**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
SEDE LATACUNGA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA
E INSTRUMENTACIÓN**

**PROYECTO DE GRADO PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA ESPECIALIDAD
INSTRUMENTACIÓN**

**“Diseño e Implementación de un Sistema de
Diagnóstico de Fallas en Máquinas Rotatorias
Mediante Análisis Espectral de Vibraciones.”**

**EDGAR IGNACIO MUÑOZ SOLÍS
JOSÉ LUIS SALAZAR MALLIQUINGA**

LATACUNGA – ECUADOR

2005

ÍNDICE

PÁG.

INTRODUCCIÓN

CAP. I ANÁLISIS DE VIBRACIÓN EN MÁQUINAS ROTATORIAS

1.1	PRINCIPIOS DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL	1
1.1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.1.2	METAS DE PROGRAMAS DE MANTENIMIENTO	3
1.1.3	CLASIFICACIONES DEL MANTENIMIENTO	3
1.2	INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE VIBRACIÓN	7
1.2.1	CONCEPTO BÁSICO DE VIBRACIÓN	7
1.2.2	CONSIDERACIONES ACERCA DE LA ENERGÍA Y LA FUERZA	15
1.2.3	ESTRUCTURAS MECÁNICAS	15
1.2.4	SISTEMAS LINEALES Y NO LINEALES	20
1.3	SENSORES DE VIBRACIÓN	23
1.3.1	SENSOR DE PROXIMIDAD	23
1.3.2	SENSOR DE VELOCIDAD	24
1.3.3	EL ACELERÓMETRO	25
1.4	VIBRACIONES CARACTERÍSTICAS EN MÁQUINAS ROTATORIAS	28
1.4.1	DESEQUILIBRIO	28
1.4.2	DESALINEACIÓN	31
1.5	DIAGNOSTICO DE MÁQUINAS ROTATORIAS	33
1.5.1	INTRODUCCIÓN	33
1.5.2	CHUMACERAS	34
1.5.3	RODAMIENTOS CON ELEMENTOS RODANTES	37
1.5.4	TURBINAS	50
1.5.5	BOMBAS	51
1.5.6	ACOPLAMIENTOS	52
1.5.7	BANDAS DE ACTIVACIÓN	53

1.5.8	CAJAS DE ENGRANES	55
1.5.9	COMPRESORES CENTRÍFUGOS	57
1.5.10	MÁQUINAS RECÍPROCAS	58

CAP. II SISTEMAS DE ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

2.1	SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS	60
2.1.1	PRINCIPIOS BÁSICOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS	60
2.1.2	HARDWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS	61
2.1.3	SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS	63
2.1.4	PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES	64
2.2	ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	66
2.2.1	DOMINIO DE LA FRECUENCIA Vs DOMINIO DEL TIEMPO	66
2.2.2	TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER	69
2.2.3	FUNDAMENTOS DE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)	71
2.2.4	LIMITACIONES DE LA FFT	72
2.2.5	MÉTODOS DE VENTANEO	73

CAP. III DISPOSITIVOS E INTERFASES PARA ADQUISICIÓN DE DATOS

3.1	EL PIC18F452	83
3.1.1	ARQUITECTURA	83
3.1.2	ORGANIZACIÓN DE MEMORIA	86
3.1.3	PUERTOS DE ENTRADA/SALIDA	89
3.1.4	MÓDULOS ESPECIALES	94
3.2	EL INTERFASE EIA-232	98
3.2.1	INTRODUCCIÓN	98

3.2.2	CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA TRANSMISIÓN SERIE	99
3.2.3	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	103
3.2.4	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	106
3.2.5	CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES	108

CAP. IV DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS ROTATORIAS

4.1	DISEÑO DEL HARDWARE Y FIRMWARE	112
4.1.1	CONSIDERACIONES DE DISEÑO	112
4.1.2	DISEÑO DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL	113
4.1.3	DISEÑO DE LA ETAPA DE CONVERSIÓN A/D Y TRANSMISIÓN SERIE	116
4.1.4	PROGRAMACIÓN DEL PIC18F452	119
4.1.5	IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE HARDWARE	122
4.2	DISEÑO DEL SOFTWARE	124
4.2.1	CONSIDERACIONES DE DISEÑO	124
4.2.2	DISEÑO DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS	125
4.2.3	DISEÑO DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE DATOS	126
4.2.4	DISEÑO DEL SOFTWARE DE DIAGNÓSTICO	128
4.3	RECOPIACIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	130

	CONCLUSIONES	138
--	---------------------	-----

	RECOMENDACIONES	139
--	------------------------	-----

	BIBLIOGRAFÍA	
--	---------------------	--

ENLACES

ANEXOS

ANEXO A: Circuito Impreso de la tarjeta de adquisición de datos

ANEXO B: Código fuente del PIC16F452

ANEXO C: Código fuente del software de adquisición de datos

ANEXO D: Manual de usuario

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las máquinas rotatorias constituyen el pilar fundamental de la industria moderna, su continuo y correcto funcionamiento garantizan la calidad y competitividad del producto final. Por esta razón, tales máquinas, requieren de un adecuado mantenimiento que permita detectar fallas oportunamente y corregirlas causando el menor impacto posible al proceso productivo. Hoy por hoy, uno de los mejores métodos que permite garantizar dicho mantenimiento se relaciona con los principios de la teoría de vibraciones, y el análisis espectral de las mismas, aplicadas a la determinación de las características de operación de las máquinas y sus deficiencias.

Por tal motivo, se ha planteado como objetivo principal de este proyecto, diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos de vibración y un software de análisis espectral, capaces de diagnosticar fallas relacionadas con máquinas rotatorias.

Para lograr este propósito, se ha adquirido un sensor de vibración (acelerómetro ADXL202E), el mismo que nos proporciona una señal de salida PWM, proporcional a la vibración recibida, para interpretar esta información se diseñó una tarjeta de adquisición de datos, utilizando el microcontrolador PIC18F452, que es un medio muy económico, eficiente y de fácil acceso en el mercado local, finalmente la comunicación a la PC se la realiza con la utilización del puerto serie vía RS-232.

Con la utilización del lenguaje de programación LabVIEW se elaboro el software de adquisición y procesamiento de datos, realizando una interfase en la que se puede observar las señales procesadas tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, también se permite al usuario escoger el puerto de comunicación serie (COM1, COM2, etc), observar los ejes con los que trabaja el acelerómetro, mirar la velocidad de giro del motor, etc.

Se ha elaborado tres capítulos teóricos que permiten comprender de mejor manera el funcionamiento del proyecto. En el capítulo I trata de los principios de mantenimiento, así como todos los fundamentos sobre análisis de vibración y su aplicación para el diagnóstico de máquinas rotatorias. El capítulo II trata temas como: sistemas de adquisición de datos y análisis de señales en el dominio de la frecuencia. En el capítulo III ponemos énfasis en el funcionamiento del PIC18F452 y la interfase EIA-232.

Finalmente en el capítulo IV se enfoca en las consideraciones de diseño, tanto del software como el hardware y se procede a realizar la recopilación de datos y análisis de resultados

En el transcurso del desarrollo de este proyecto, se ha ido recopilando información valiosa, las mismas que exponemos en las conclusiones y recomendaciones.

Temas como el software, firmware del PIC16F452, guía del usuario, etc., se incluyen en la sección de anexos.

CAPÍTULO I

ANÁLISIS DE VIBRACIÓN EN MÁQUINAS ROTATORIAS

1.1. PRINCIPIOS DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL¹

1.1.1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento en general es considerado como uno de los factores indispensables para el buen funcionamiento y desarrollo de toda empresa y lo podemos definir como el conjunto de técnicas y sistemas que permiten:

- ✓ Reparar las averías que se presenten.
- ✓ Prever estas averías mediante revisiones y otras técnicas más complejas como técnicas estadísticas, seguimiento y diagnósticos.
- ✓ Especificar las normas de manipulación y buen funcionamiento de equipos y líneas.
- ✓ Perfeccionar diseños sucesivos de los medios de producción.

El mantenimiento no es una función “miscelánea”, produce un bien real que puede resumirse en: capacidad de producir con calidad, seguridad y rentabilidad.

Para nadie es un secreto la exigencia que plantea una economía globalizada, mercados altamente competitivos y un entorno variable donde la velocidad de cambio sobrepasa en mucho nuestra capacidad de respuesta. En este panorama estamos inmersos y vale la pena considerar algunas posibilidades que siempre han existido pero ahora cobran mayor relevancia.

¹ <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/glenn espanol-index.htm>

Debido a que el ingreso siempre provino de la venta de un producto o servicio, esta visión primaria llevó a la empresa a centrar sus esfuerzos de mejora, y con ello los recursos, en la función de la producción. El mantenimiento fue “un problema” que surgió al querer producir continuamente, de ahí que fue visto como un mal necesario, una función subordinada a la producción cuya finalidad era reparar desperfectos en forma rápida y barata. Ahora bien, ¿cuál es la participación del mantenimiento en el éxito o fracaso de una empresa? Por estudios comprobados se sabe que incide en:

- ✓ Costos de producción.
- ✓ Calidad del producto o servicio.
- ✓ Capacidad operacional (aspecto relevante dado el ligamen entre competitividad y por citar solo un ejemplo, el cumplimiento de plazos de entrega).
- ✓ Capacidad de respuesta de la empresa como un ente organizado e integrado: por ejemplo, al generar e implantar soluciones innovadoras y manejar oportuna y eficazmente situaciones de cambio.
- ✓ Seguridad e higiene industrial, y muy ligado a esto.
- ✓ Calidad de vida de los colaboradores de la empresa.
- ✓ Imagen y seguridad ambiental de la compañía.

La labor del departamento de mantenimiento, está relacionada muy estrechamente en la prevención de accidentes y lesiones en el trabajador ya que tiene la responsabilidad de mantener en buenas condiciones, la maquinaria, herramienta y equipo de trabajo, lo cual permite un mejor desenvolvimiento y seguridad evitando en parte riesgos en el área laboral.

1.1.2. METAS DE PROGRAMAS DE MANTENIMIENTO

La meta más importante de cualquier programa de mantenimiento es la eliminación de alguna avería de la maquinaria. Muchas veces una avería grave causará daños serios a la máquina, incrementando los costos de reparación. Una eliminación completa no es posible en la práctica, pero se le puede acercar con una atención sistemática en el mantenimiento.

El segundo propósito del mantenimiento es de poder anticipar y planificar con precisión sus requerimientos. Eso quiere decir que se pueden reducir los inventarios de refacciones y el tiempo de trabajo. Las reparaciones a los sistemas mecánicos se pueden planificar de manera ideal durante los paros programados de la planta.

El tercer propósito es incrementar la disponibilidad para la producción de la planta, por medio de la reducción importante de la posibilidad de algún paro durante el funcionamiento de la planta, y mantener la capacidad operacional del sistema por medio de la reducción del tiempo de inactividad de las máquinas críticas. Idealmente, las condiciones de operación de todas las máquinas se deberían conocer y documentar.

El último propósito del mantenimiento es permitir al personal de mantenimiento trabajar durante horas predecibles y razonables.

1.1.3. CLASIFICACIONES DEL MANTENIMIENTO

1.1.3.1. MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Podemos definir el mantenimiento correctivo como el efectuado a una máquina o instalación, cuando la avería ya se ha producido, para restablecerla a su estado operativo habitual de servicio. El mantenimiento correctivo puede ser o no planificado. El mantenimiento

correctivo planificado comprende las intervenciones no planificadas (preventivas) que se efectúan en las paradas programadas.

Por ejemplo, una instalación en la que aparece una junta (unión mecánica) por la que se produce una fuga de aceite y se mantiene en servicio hasta una parada programada en la que se interviene para sustituir dicha junta. Esta es una intervención correctiva planificada por realizarse durante una parada programada sin afectar la disponibilidad de la instalación.

Como dijimos anteriormente el mantenimiento correctivo puede ser, planificado y no planificado, aquí los conceptos más detalladamente.

1.1.3.2. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo también es llamado mantenimiento periódico preventivo o también "mantenimiento histórico". Aquí se analizan los datos históricos de cada máquina y se programan reacondicionamientos periódicos antes de que ocurran los problemas que estadísticamente se pueden esperar. Ya se sabe desde hace mucho que grupos de máquinas similares van a tener proporciones de fallas que se pueden predecir hasta cierto punto, si se toman promedios durante un tiempo largo. Esto produce "la curva de la tina" que relaciona la proporción de fallas al tiempo de operación de la manera siguiente:

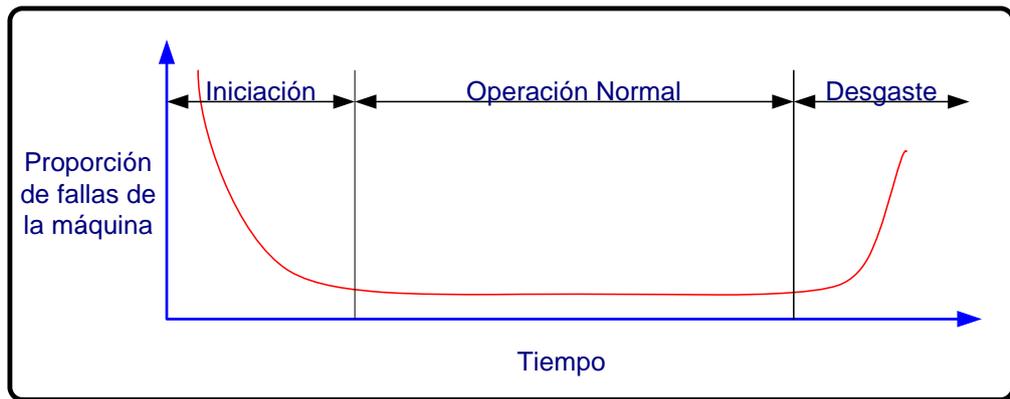


Figura 1.1. Curva de fallas

Si esta curva es aplicable a todas las máquinas del grupo y si la forma de la curva es conocida, se podría usar el mantenimiento preventivo de manera ventajosa. Lamentablemente eso no es el caso en la práctica.

La actividad de mantenimiento se puede planificar sobre la base del tiempo del calendario o a horas de operación de la máquina, cantidad de partes producidas etc. El mantenimiento preventivo se hizo muy popular al principio de la década de los 80 cuando se empezó a usar pequeñas computadoras para la planificación y el registro de las actividades de mantenimiento.

1.1.3.3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El siguiente paso en la tecnología de mantenimiento fue la llegada del mantenimiento predictivo, basado en la determinación del estado de la máquina en operación: La técnica esta basada en el hecho que la mayoría de las partes de la máquina darán un tipo de aviso antes de que fallen. Para percibir los síntomas con que la máquina nos esta advirtiendo requiere varias pruebas no destructivas, tal como análisis de aceite, análisis de desgaste de partículas, *análisis de vibraciones* y medición de temperaturas. El uso de estas técnicas, para determinar el estado de la máquina dará como resultado un mantenimiento mucho más eficiente, en comparación con los tipos de mantenimiento

anteriores. El mantenimiento predictivo permite que la gerencia de la planta tenga el control de las máquinas y de los programas de mantenimiento y no al revés. En una planta donde se usa el mantenimiento predictivo el estado general de las máquinas se conoce en cualquier momento y será posible una planificación más precisa.

El mantenimiento predictivo usa varias disciplinas. La más importante de estas es el *análisis periódico de vibraciones*. Se ha demostrado varias veces que de todas las pruebas no destructivas, que se pueden llevar a cabo en una máquina, la *firma* (espectro característico de una máquina) de vibraciones proporciona la cantidad de información más importante acerca de su funcionamiento interno. En algunas máquinas que podrían afectar de manera adversa las operaciones de la planta si llegarían a fallar, se puede instalar un monitor de vibración continuo. En este monitor, una alarma se activará cuando el nivel de vibraciones rebasa un valor predeterminado. De esta manera se evitan fallas que progresan rápidamente y puedan provocar un paro catastrófico. La mayoría del equipo moderno, accionado por turbinas se vigila de esta manera.

El análisis de aceite y el análisis de partículas de desgaste son partes importantes de los programas predictivos modernos, especialmente en equipo crítico o muy caro.

La termografía es la medición de temperaturas de superficie por detección infrarroja. Es muy útil en la detección de problemas en interruptores y áreas de acceso difícil.

El análisis de la firma de corriente del motor es otra técnica muy útil que permite detectar barras de rotor agrietadas o rotas, con el motor en operación.

La prueba de sobre tensión de los estatores de motor se usa para detectar una falla incipiente en el aislamiento eléctrico.

1.1.3.4. MANTENIMIENTO PRO ACTIVO

Es la última innovación en el campo del mantenimiento predictivo, usa gran cantidad de técnicas para alargar la duración de operación de la maquinaria. La mayor parte de un programa pro activo es el análisis de las causas fundamentales de las fallas en máquinas. Esas causas fundamentales se pueden remediar y los mecanismos de falla se pueden eliminar gradualmente en cada máquina. Se ha sabido desde hace mucho tiempo que el desbalanceo y la desalineación son las causas fundamentales de la mayoría de las fallas en máquinas. Ambos fenómenos provocan una carga en los rodamientos con fuerzas indebidas y acortan su vida útil. En lugar de reemplazar continuamente rodamientos gastados en una máquina que presenta una falla, una mejor política sería de llevar a cabo un balanceo y alineación de precisión en la máquina y de verificar los resultados por medio de un análisis de vibraciones.

1.2. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE VIBRACIÓN

1.2.1. CONCEPTO BÁSICO DE VIBRACIÓN

En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento.

El movimiento vibratorio de un cuerpo entero se puede describir completamente como una combinación de movimientos individuales de 6 tipos diferentes. Esos son traslaciones en las tres direcciones ortogonales x , y , y z , y rotaciones alrededor de los ejes x - y , y - z y x - z . De cierto cuerpo

se dice que posee seis grados de libertad. Por ejemplo un barco se puede mover desde adelante hacia atrás, desde abajo hacia arriba y de izquierda a derecha. También puede girar en los ejes transversal, vertical y longitudinal. Supongamos que a un objeto se le impide el movimiento en cualquier dirección. Por ejemplo el péndulo de un reloj solamente se puede mover en un plano; por eso, se dice que es un sistema con un grado único de libertad. Otro ejemplo de un sistema con un grado único de libertad es un elevador que se mueve hacia arriba y hacia abajo en el cubo del elevador.

La vibración de un objeto es causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza se puede aplicar externamente o puede tener su origen en el interior. La proporción (frecuencia) y la magnitud de la vibración están completamente determinadas por la fuerza de excitación, su dirección y frecuencia. Esa es la razón porque un análisis de vibración puede determinar las fuerzas de excitación que actúan en una máquina. Esas fuerzas dependen de su estado y el conocimiento de sus características e interacciones permite diagnosticar un problema.

1.2.1.1. MOVIMIENTO ARMÓNICO SENCILLO

El movimiento más sencillo que existe, es el movimiento en una dirección, de una masa controlada por un resorte único. Este sistema mecánico se llama sistema resorte-masa, con un grado único de libertad. Si se desplaza la masa, hasta una cierta distancia del punto de equilibrio, y después se libera, el resorte la regresará a la posición de equilibrio. Para entonces, la masa tendrá algo de energía cinética, rebasará esta posición y desviará el resorte en la dirección opuesta. Perderá velocidad hasta detenerse en el otro extremo, donde el resorte regresará nuevamente hacia su punto de equilibrio. El mismo proceso se volverá a repetir con la energía transfiriéndose entre la masa y el resorte, desde energía cinética en la masa hasta energía potencial en el

resorte. La ilustración siguiente describe el desplazamiento de la masa en función del tiempo.

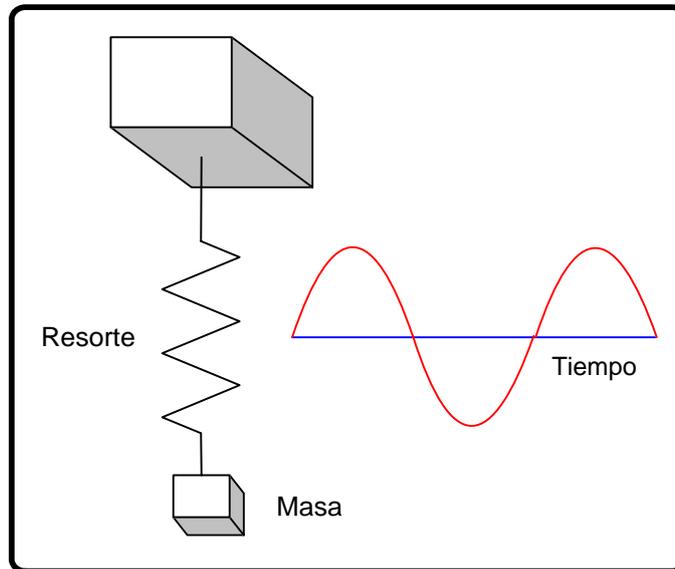


Figura 1.2. Movimiento Armónico Simple

Si no hubiera fricción en el sistema, la oscilación continuaría en la misma proporción y con la misma amplitud indefinidamente. Este movimiento armónico sencillo idealizado, casi nunca se encuentra en sistemas mecánicos reales. Cualquier sistema real tiene fricción y eso hace que la amplitud de la vibración disminuya gradualmente a medida que la energía se convierte en calor.

Las definiciones siguientes son aplicables al movimiento armónico sencillo:

$$T = \text{Periodo de Onda} \quad (1.1)$$

Es el tiempo necesario para un ciclo, o para un viaje ida y vuelta, o de un cruce del nivel cero hasta el siguiente cruce del nivel cero en la misma dirección. El periodo se mide en segundos o milisegundos dependiendo de que tan rápido se cambie la onda.

$$f = \text{Frecuencia de la Onda} = \frac{1}{T} \quad (1.2)$$

La frecuencia es el número de ciclos que ocurren en un segundo, y sencillamente es el recíproco del período. La unidad de frecuencia es el Hertz (Hz), llamada así en honor al científico alemán, Heinrich Hertz, que fue el primero en investigar las ondas radio.

1.2.1.2. ECUACIONES DE MOVIMIENTO

Si se registra la posición o el desplazamiento de un objeto que está sometido a un movimiento armónico sencillo en función del tiempo en una gráfica, como se muestra en la figura 1.2, la curva resultante será una onda senoidal que se describe en la siguiente ecuación:

$$s = D \text{sen } \omega t \quad (1.3)$$

Donde:

s = desplazamiento instantáneo

D = desplazamiento máximo o pico

ω = frecuencia angular en rad/s

t = tiempo

Esta es la misma curva que la de una función senoidal trigonométrica, y se puede considerar como la más sencilla y básica de todas las formas repetitivas de ondas. En el caso de vibración, la onda senoidal se registra como una función de tiempo pero a veces, se considera que un ciclo de la onda es igual a un ángulo de 360 grados.

La velocidad del movimiento es igual a la proporción del cambio del desplazamiento, o en otras palabras a que tan rápido cambia su

posición. La razón de cambio de una cantidad respecto a otra se puede describir con la derivada siguiente:

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega D \cos \omega t \quad (1.4)$$

Donde v = velocidad instantánea

Se puede ver que la forma de la función de velocidad también es senoidal, pero ya que está descrita por el coseno, está desplazado de 90 grados.

La aceleración del movimiento que aquí se describe está definida como la proporción de cambio de la velocidad, o que tan rápido cambia su velocidad.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -\omega^2 D \sin \omega t \quad (1.5)$$

Donde a = aceleración instantánea.

Si se examinan las ecuaciones (1.4) y (1.5), se ve que la velocidad es proporcional a la frecuencia, y que la aceleración es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Eso quiere decir que con un gran desplazamiento y a una alta frecuencia, resultan velocidades muy altas, y se requerirían niveles de aceleración extremadamente altos.

Cuando el desplazamiento está a su máximo, la velocidad estará en cero, porque esa es la posición en la que la dirección del movimiento cambia de sentido (véase figura 1.3). Cuando el desplazamiento está en cero (el punto de equilibrio), la velocidad estará en su máximo. Esto quiere decir que la fase de la onda de velocidad se desplazará hacia la izquierda a 90 grados, comparada a la forma de onda del

desplazamiento. En otras palabras, se dice que la velocidad tiene un avance sobre el desplazamiento de un ángulo de 90 grados.

Cuando la velocidad está en su máximo, la aceleración es cero. En otras palabras, la velocidad no se está cambiando en este momento. Cuando la velocidad es cero, la aceleración está en su máximo, en este momento la velocidad está cambiando lo más rápido. La curva senoidal de la aceleración en función del tiempo se puede ver de esta manera como desplazada en fase hacia la izquierda de la curva de velocidad y por eso la aceleración tiene un avance de 90 grados sobre la velocidad.

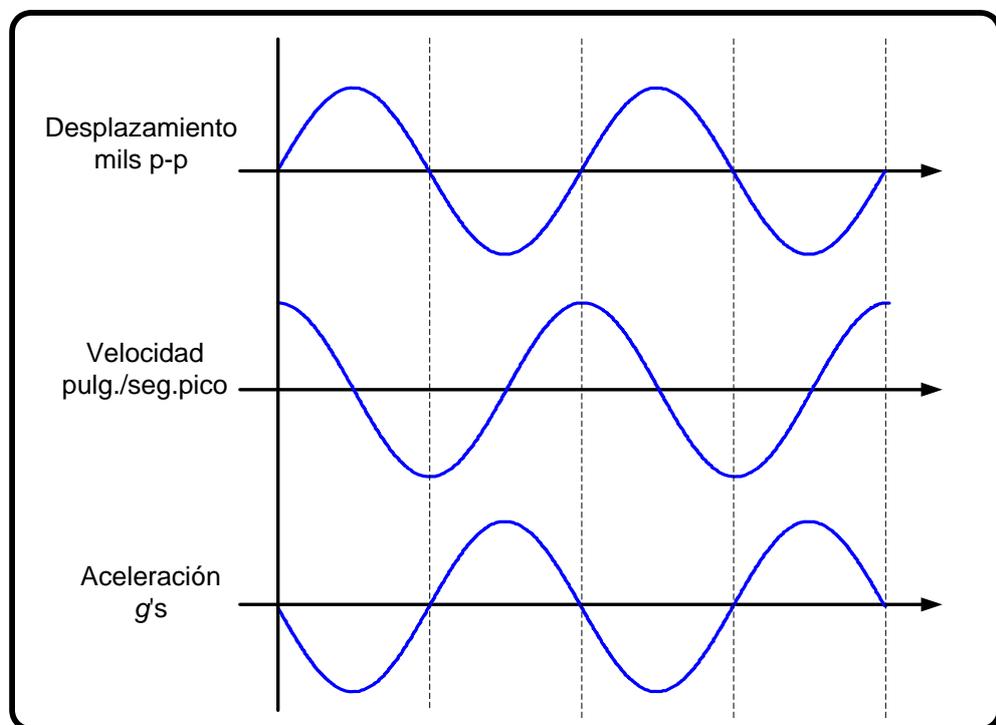


Figura 1.3. Desplazamiento, velocidad y aceleración

1.2.1.3. DINÁMICA DE SISTEMAS MECÁNICOS

Una estructura física pequeña y compacta se puede imaginar como una sola masa. Se moverá en respuesta a una fuerza externa que se aplica a ella, y su movimiento será gobernado por las leyes de movimiento de Newton. En términos sencillos, las leyes de Newton dicen que si el

objeto está en reposo, se quedará en reposo, a menos que una fuerza externa actúe sobre él. Si está sometido a una fuerza externa, su aceleración será proporcional a esa fuerza.

La mayoría de los sistemas mecánicos son más complejos que una masa sencilla. Los sistemas mecánicos, como las máquinas rotativas, no tienen una rigidez infinita y tienen varios grados de flexibilidad a varias frecuencias. Como lo veremos, su movimiento en respuesta a una fuerza externa depende de la naturaleza de esta fuerza, de las características dinámicas de su estructura mecánica y muchas veces es muy difícil predecirlas.

1.2.1.4. MEDICIÓN DE AMPLITUD DE VIBRACIÓN

Las definiciones siguientes son de aplicación a la medición de la amplitud de las vibraciones mecánicas. Amplitud Pico (p) es la distancia entre el punto cero o punto de equilibrio y el valor máximo. Amplitud Pico a Pico (p-p) es la distancia de una cresta negativa hasta una cresta positiva. En el caso de una onda senoidal, como la de la figura 1.4, el valor pico a pico es exactamente dos veces el valor pico, ya que la forma de la onda es simétrica. Pero eso no es necesariamente el caso con todas las formas de ondas de vibración.

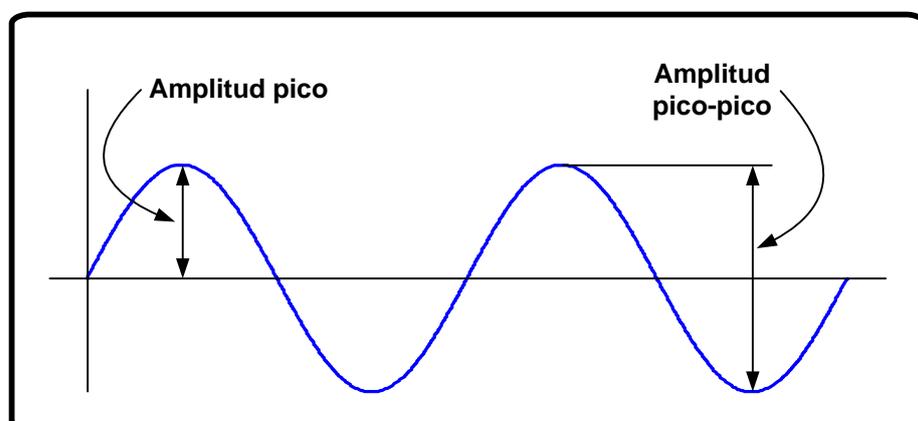


Figura 1.4. Amplitud pico y amplitud pico a pico.

El valor RMS de una señal de vibración es una medida importante de su amplitud, es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda. En el caso de una onda senoidal el valor RMS es igual a 0.707 del valor pico.

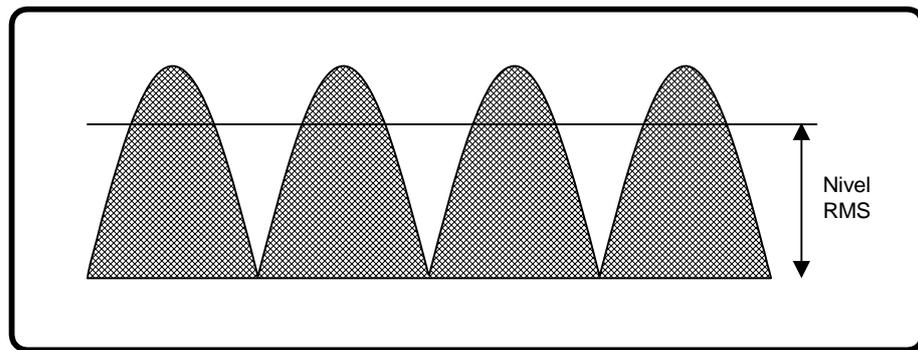


Figura 1.5. Amplitud RMS

1.2.1.5. RESUMEN DE LAS UNIDADES DE AMPLITUD

En el sistema inglés de medición, el desplazamiento se mide generalmente en mils (milésimos de pulgada), y el valor pico a pico se usa por convención.

La velocidad generalmente se mide en pulgadas por segundo y la convención es de usar el valor pico o el valor RMS. Lo más común es de usar el valor pico.

La aceleración se mide generalmente en g 's. $1g$ es la aceleración debida a la gravedad en la superficie de la tierra. El g en realidad no es una unidad de aceleración, es sencillamente una cantidad de aceleración a que estamos sometidos como habitantes de la tierra.

A veces la aceleración se mide en pulgadas/s² o m/s², que son unidades verdaderas. Un g es igual a 386 pulgadas/s² o 9.81 m/s².

1.2.2. CONSIDERACIONES ACERCA DE LA ENERGÍA Y LA FUERZA

Para producir vibración, se requiere energía, y en el caso de vibración de máquina, esa energía viene de la fuente de poder hacia la máquina. La fuente de energía puede ser la línea de corriente CA, un motor a combustión interna, vapor accionando una turbina etc.

Energía se define como fuerza multiplicada por la distancia sobre la que la fuerza actúa, y la unidad internacional de energía es el Julio. Un Julio de energía es el equivalente de un Newton de fuerza actuando sobre una distancia de un metro. El concepto físico de trabajo es similar al de energía, y las unidades que se usan para medir el trabajo son las mismas que se usan para medir la energía.

La cantidad de energía presente en la vibración de la máquina misma por lo general no es tan grande comparada a la energía requerida para activar la máquina para su tarea asignada.

Fuerza se define como la proporción con que se hace el trabajo, o la proporción de transferencia de energía. Según las normas internacionales se mide en Julios por segundo o Vatios. La fuerza es proporcional al cuadrado de la amplitud de la vibración, igual como la fuerza eléctrica es proporcional al cuadrado del voltaje o al cuadrado de la corriente.

Según la ley de la conservación de energía no se puede crear ni destruir energía, pero se puede cambiar en formas diferentes. La energía vibratoria en un sistema mecánico se disipará al final en forma de calor.

1.2.3. ESTRUCTURAS MECÁNICAS

Cuando analizamos la vibración de una máquina, que es un sistema mecánico más o menos complejo es útil considerar las fuentes de la energía de vibración y las rutas en la máquina que sigue esta energía. La

energía siempre se mueve o fluye de la fuente de la vibración hacia el punto de absorción, donde se transforma en calor. En algunos casos eso puede ser una ruta muy corta, pero en otras situaciones es posible que la energía viaje largas distancias antes de ser absorbida.

La más grande absorbidora de energía es la fricción, que puede ser fricción deslizador o fricción viscosa. Si una máquina tiene poca fricción, su nivel de vibración tiende a ser muy alto, ya que la energía de vibración se va incrementando debido a la falta de absorción. Por otra parte, una máquina con una mayor fricción tendrá niveles de vibración más bajos, ya que su energía se absorbe más rápidamente. Por ejemplo, una máquina con rodamientos a elementos rodantes (muchas veces se le llama rodamientos anti-fricción) vibra más que una máquina con chumaceras, donde la película de aceite absorbe una cantidad importante de energía. Las estructuras de aviones son remachadas en lugar de soldadas en una unidad sólida debido a que las uniones remachadas se mueven ligeramente y absorben la energía por medio de la fricción deslizador. Eso impide que las vibraciones se incrementen hasta niveles destructivos. De una estructura de este tipo se dice que está altamente amortiguada y la amortiguación es en realidad una medida de su capacidad de absorción de energía.

1.2.3.1. FRECUENCIAS NATURALES

De cualquier estructura física se puede hacer un modelo en forma de un conjunto de resortes, masas y amortiguadores. Los amortiguadores absorben la energía pero los resortes y las masas no lo hacen. Un resorte y una masa interactúan uno con otro, de manera que forman un sistema que hace resonancia a su frecuencia natural característica. Si se aplica energía a un sistema resorte-masa, el sistema vibrará a su frecuencia natural, y el nivel de las vibraciones dependerá de la fuerza de la fuente de energía y de la absorción inherente al sistema. La

frecuencia natural de un sistema resorte-masa no amortiguado se da en la siguiente ecuación:

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.6)$$

Donde F_n = Frecuencia natural

k = Constante del resorte o rigidez

m = Masa

De eso se puede ver que si la rigidez aumenta, la frecuencia natural también aumentará, y si la masa aumenta, la frecuencia natural disminuye. Si el sistema tiene absorción, lo que tienen todos los sistemas físicos, su frecuencia natural es un poco más baja y depende de la cantidad de absorción.

Un sistema resorte-masa-amortiguador se denomina “grado de libertad”, la energía de vibración que se aplica en la máquina, se distribuirá entre los grados de libertad en cantidades que dependerán de sus frecuencias naturales y de la amortiguación, así como de la frecuencia de la fuente de energía.

Por esta razón, la vibración no se va a distribuir de manera uniforme en la máquina. Por ejemplo, en una máquina activada por un motor eléctrico la fuente de la mayor energía de vibración es el desbalanceo residual del rotor. Esto proporcionará una vibración medible en los rodamientos. Pero si la frecuencia natural de uno de los grados de libertad de la máquina es cercana a la velocidad de giro del motor, su nivel de vibraciones puede ser muy alto, aunque esté ubicada a una gran distancia. Es importante tener este hecho en mente cuando se hace la evaluación de la vibración de una máquina. La energía de vibración frecuentemente se mueve por largas distancias y puede ser destructiva cuando encuentra una estructura remota con una frecuencia natural cercana la frecuencia de la fuente de vibración.

1.2.3.2. RESONANCIA

La resonancia es un estado de operación en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural de la estructura de la máquina. Una frecuencia natural es una frecuencia a la que una estructura vibrará si es excitada y luego se deja oscilar libremente. Una estructura típica tendrá muchas frecuencias naturales. Cuando ocurre la resonancia, los niveles de vibración que resultan pueden ser muy altos y pueden causar daños muy rápidamente.

BAJO NINGUNA CIRCUNSTANCIA SE DEBE OPERAR UNA MÁQUINA A LA FRECUENCIA DE RESONANCIA.

En una máquina que produce un espectro ancho de energía de vibración, la resonancia se podrá ver en el espectro, como un pico constante aunque varíe la velocidad de la máquina. El pico puede ser agudo o puede ser ancho, dependiendo de la cantidad de amortiguación que tenga la estructura en la frecuencia en cuestión.

Para determinar si una máquina tiene resonancias prominentes se puede llevar a cabo una o varias pruebas con el fin de encontrarlas:

- ✓ Se puede encontrar la frecuencia de resonancia si se procede a dar un golpe a la máquina con una masa pesada, mientras se registran los datos. Si hay una resonancia, la vibración de la máquina ocurrirá a la frecuencia natural.
- ✓ Arranque y rodamiento libre: Se enciende y se apaga la máquina, mientras se registran los datos de vibración y de velocidad. La forma de onda de tiempo indicará un máximo, cuando velocidad alcance las frecuencias naturales.

- ✓ Prueba de la velocidad variable: Se varía la velocidad, mientras se registran datos de vibración y de velocidad. La interpretación de los datos se hace como en la prueba anterior.

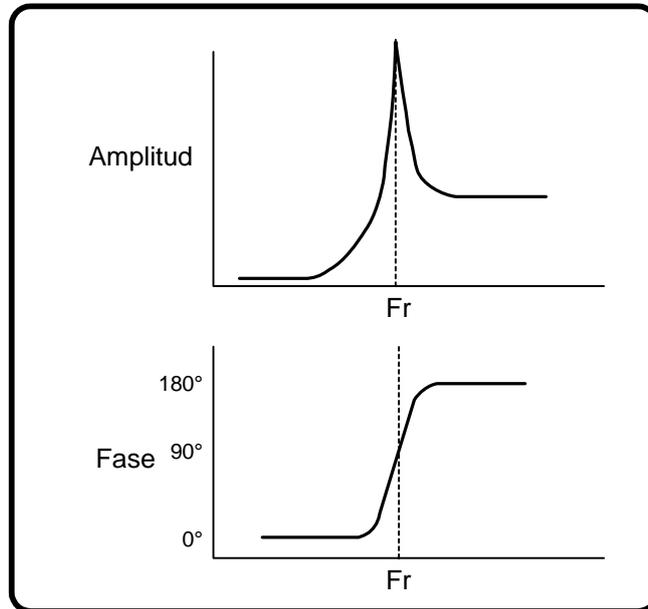


Figura 1.6. Resonancia

Las frecuencias de resonancia en las máquinas rotativas son las llamadas **frecuencias críticas de flechas rotativas**. En la figura 1.6 se muestra la curva de respuesta idealizada de resonancia mecánica.

SE DENOMINA FLECHA AL EJE SOBRE EL CUAL SE PRODUCE LA VIBRACIÓN.

El ángulo de fase entre la vibración de la fuente de excitación y la respuesta de la estructura siempre es de 90 grados a la frecuencia natural.

En el caso de rotores largos, como en turbinas, las frecuencias naturales se llaman "frecuencias críticas" o "velocidades críticas" y se debe cuidar que estas máquinas no operen a velocidades donde 1x o 2x corresponde a esas frecuencias críticas.

1.2.4. SISTEMAS LINEALES Y NO LINEALES

Para ayudar a entender la transmisión de vibración a través de una máquina es conveniente investigar el concepto de linealidad y lo que significa sistemas lineales y no lineales, el término "lineal" también se refiere a las características de un sistema en función de las señales de entrada y salida. Un sistema es cualquier dispositivo o estructura que puede aceptar una señal de entrada o estímulo en alguna forma y producir una señal de salida o respuesta.

1.2.4.1. DEFINICIÓN DE LINEALIDAD

Se dice que un sistema es lineal, cuando cumple con los dos criterios siguientes:

- 1) Si una entrada x al sistema produce una salida y , entonces una entrada $2x$ producirá una salida $2y$. En otras palabras, la magnitud de la salida del sistema es proporcional a la magnitud de la entrada del sistema.
- 2) Si una entrada x_1 produce una salida y_1 , y una entrada x_2 produce una salida y_2 , entonces una entrada $x_1 + x_2$ producirá una salida $y_1 + y_2$. En otras palabras, el sistema maneja dos entradas simultáneas de manera independiente y esas no interactúan en el sistema. Esos criterios implican el hecho que un sistema lineal no producirá frecuencias de salida, que no estén presentes en la entrada.

Observen que no hay nada en estos criterios que diga que la salida del sistema debe tener la misma naturaleza que la entrada. Por ejemplo la entrada podría ser una corriente eléctrica y la salida podría ser una temperatura. En el caso de estructuras mecánicas como máquinas consideraremos la entrada como una fuerza vibratoria y la salida como la vibración medida.

1.2.4.2. NO LINEALIDADES EN SISTEMAS

La linealidad con absoluta perfección no existe en ningún sistema real. Hay muchos tipos diferentes de no linealidad y existen en varios grados en todos los sistemas mecánicos, aunque muchos sistemas actuales se acercan a un comportamiento lineal, especialmente con niveles de entrada pequeños. Si un sistema no es lineal, producirá frecuencias en su salida, que no existen en su entrada.

Muchos sistemas son casi lineales en respuesta a entradas pequeñas, pero se vuelven no lineales con niveles de excitación superiores. A veces existe un umbral definido. Las señales de entrada ligeramente superiores a este umbral resultan no lineales en una gran proporción. Un ejemplo de este fenómeno es el corte de un amplificador cuando el nivel de su señal de entrada excede el voltaje de su suministro de energía. Este es análogo a un sistema mecánico donde una parte se puede mover libremente hasta que pega con un tope.

1.2.4.3. NO LINEALIDADES EN MÁQUINAS ROTATIVAS

Como vimos, la vibración de una máquina es su respuesta a fuerzas causadas por sus partes moviéndose en la máquina. Se mide la vibración en varios lugares en la máquina y de estas mediciones se deduce la magnitud de las fuerzas. Midiendo la frecuencia de la vibración se supone que las fuerzas se presentan a la misma frecuencia que la respuesta, y que los niveles medidos son proporcionales a la magnitud de las fuerzas. Este razonamiento supone que la máquina es lineal en su respuesta a las funciones forzadas, y para la mayoría de las máquinas es una suposición razonable.

Pero a medida que se desgasta una máquina o si se forman grietas u holgura, la respuesta ya no seguirá siendo lineal. El resultado es que la vibración medida puede ser muy diferente de las funciones forzadas.

Por ejemplo un rotor desbalanceado comunica una fuerza senoidal al rodamiento en la frecuencia $1x$, y esta fuerza no contiene ninguna otra frecuencia. Si la estructura mecánica de la máquina no es lineal esta fuerza senoidal será distorsionada y la vibración resultante ocurrirá en los armónicos de $1x$ y también en $2x$. El rango y la magnitud del contenido armónico de la vibración es una medida del grado de no linealidad de la máquina.

Por ejemplo la vibración de un rodamiento con holgura mecánica contendrá cantidades y magnitudes de armónicos cada vez mayores, a medida que el defecto va aumentando.

Los acoplamientos flexibles son no lineales, cuando están desalineados y esta es la razón que su firma de vibración contiene una fuerte componente en $2x$. Muchas veces, los acoplamientos desgastados y desalineados producen una fuerte componente en $3x$. Cuando las fuerzas que actúan en frecuencias diferentes interactúan de una manera no lineal, en una máquina, el resultado es la generación de frecuencias de suma y de diferencias, nuevas frecuencias que no están presentes en las frecuencias forzadas. Esas frecuencias de suma y de diferencia son las bandas laterales que se encuentran en los espectros de cajas de engranes defectuosas, rodamientos con elementos rodantes, etc. En el caso de una caja de engranes una frecuencia forzada es el engranaje y la otra es la velocidad del engrane. Si el engrane está excéntrico, o tiene alguna otra deformación, la frecuencia de giro causará una modulación y el resultado serán las bandas laterales. La modulación siempre es un proceso no lineal que crea nuevas frecuencias que no existen en las funciones forzadas.

1.3. SENSORES DE VIBRACIÓN

El transductor de vibraciones es un aparato que produce una señal eléctrica que es una réplica o análogo del movimiento vibratorio al cual está sujeto. Un buen transductor no debe agregar falsos componentes a la señal, y debe producir señales uniformes en todo el rango de frecuencias de interés.

1.3.1. SENSOR DE PROXIMIDAD

El Sensor de proximidad, también llamado "Sensor de Corriente de Remolino", o "Transductor de Desplazamiento" es una unidad de montaje permanente, y necesita un amplificador que acondiciona la señal para generar un voltaje de salida proporcional a la distancia entre el transductor y la extremidad de la flecha. Su operación está basada en un principio magnético y por eso, es sensible a las anomalías magnéticas en la flecha.

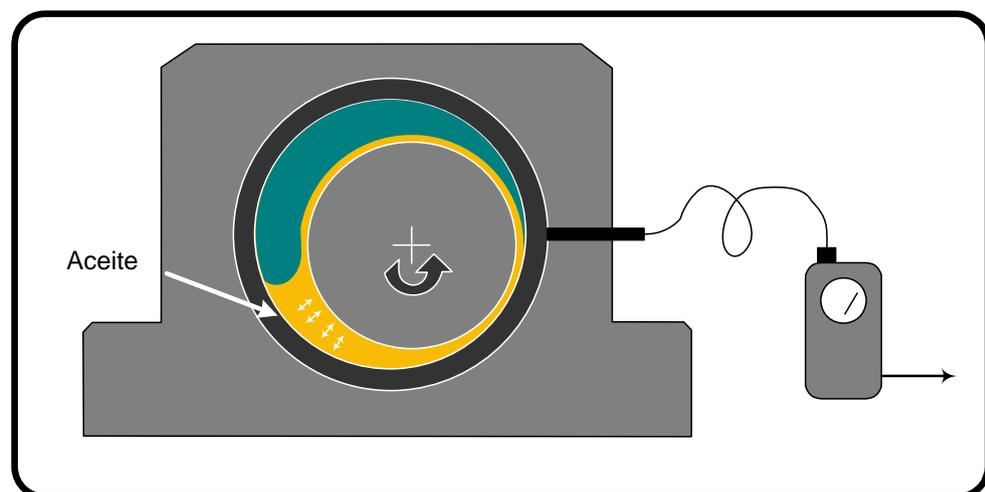


Figura 1.7. Sensor de Proximidad

Esos transductores se usan mucho en pares, separados por una diferencia de orientación de 90 grados.

La frecuencia de respuesta del transductor de desplazamiento va desde DC (0 Hz) hasta alrededor de 1000 Hz.

1.3.2. SENSOR DE VELOCIDAD

El sensor de velocidad fue uno de los primeros transductores de vibración, que fueron construidos. Consiste de una bobina de alambre y un imán colocados en el interior de un soporte, de tal manera que si se mueve el soporte, el imán tiende a permanecer inmóvil debido a su inercia. El movimiento relativo entre el campo magnético y la bobina induce una corriente proporcional a la velocidad del movimiento. De esta manera, la unidad produce una señal directamente proporcional a la velocidad de la vibración. Es autogenerador y no necesita de aditamentos electrónicos acondicionadores para funcionar. Tiene una impedancia de salida eléctrica relativamente baja que lo hace relativamente insensible a la inducción del ruido.

Aun tomando en cuenta estas ventajas, el transductor de velocidad tiene muchas desventajas, que lo vuelven casi obsoleto para instalaciones nuevas, aunque hoy en día todavía se usan varios miles. Es relativamente pesado y complejo y por eso es caro, y su respuesta de frecuencia que va de 10 Hz a 1000 Hz es baja. El resorte y el imán forman un sistema resonante de baja frecuencia, con una frecuencia natural de alrededor de 10 Hz. La resonancia tiene que ser altamente amortiguada, para evitar un pico importante en la respuesta a esta frecuencia. El problema es que la amortiguación en cualquier diseño práctico es sensible a la temperatura, y eso provoca que la respuesta de frecuencia y la respuesta de fase dependan de la temperatura.

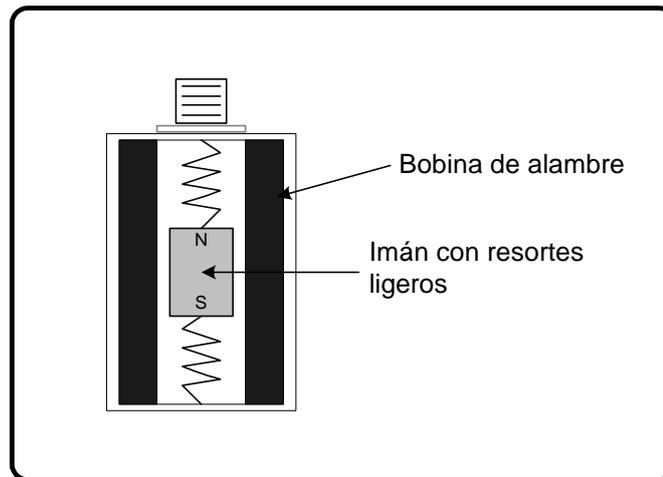


Figura 1.8. Sensor de Velocidad

1.3.3. EL ACELERÓMETRO

Se puede considerar al acelerómetro piezoeléctrico como el transductor estándar para medición de vibración en máquinas. Se produce en varias configuraciones, pero la del tipo a compresión sirve para describir el principio de la operación.

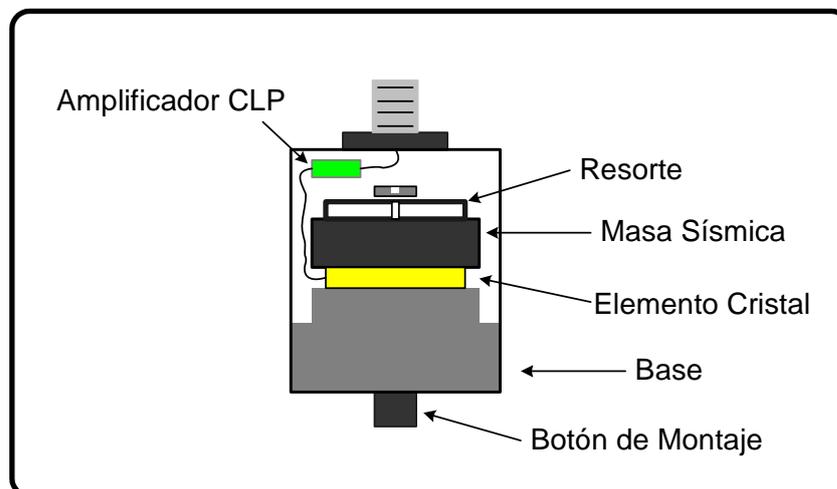


Figura 1.9. Acelerómetro Piezoeléctrico

La masa sísmica está sujeta a la base con un perno axial, que se apoya en un resorte circular. El elemento piezo eléctrico está ajustado entre la base y la masa. Cuando un material está sujeto a una fuerza, se genera

una carga eléctrica entre sus superficies. Hay muchos materiales de este tipo. El cuarzo es el más utilizado. También hay materiales piezoeléctricos sintéticos que funcionan bien y en algunos casos son capaces de funcionar a temperaturas más altas que el cuarzo. Si se incrementa la temperatura de un material piezo eléctrico, se va llegar al llamado "punto curie" o "temperatura curie" donde se pierde la propiedad piezo eléctrica. Una vez que esto pasa, el transductor se estropea y no se puede reparar.

Cuando se mueve el acelerómetro en la dirección arriba/abajo, la fuerza que se requiere para mover la masa sísmica es soportada por el elemento activo. Según la segunda ley de Newton, esa fuerza es proporcional a la aceleración de la masa. La fuerza sobre el cristal produce la señal de salida que proporcional a la aceleración del transductor. Los acelerómetros son lineales en el sentido de la amplitud, lo que quiere decir que tienen un gran rango dinámico. Los niveles más bajos de aceleración que puede detectar son determinados únicamente por el ruido del sistema electrónico, y el límite más alto es la destrucción del elemento piezoeléctrico.

El acelerómetro piezoeléctrico es muy estable sobre largos periodos de tiempo. Mantendrá su calibración si no se maltrata. Un acelerómetro puede dañarse por exposición un calor excesivo y la caída en una superficie dura. Una pequeña cuarteadura en el cristal causará una reducción en la sensibilidad y también afectará de manera importante a la resonancia y a la respuesta de frecuencia. Es recomendable calibrar los acelerómetros una vez al año, si están en servicio con registradores de datos portátiles.

El rango de frecuencias del acelerómetro es muy ancho y se extiende desde aproximadamente 1 Hz hasta varias decenas de Khz. La respuesta de alta frecuencia está limitada por la resonancia de la masa sísmica, junto con la elasticidad del piezo elemento. Esa resonancia produce un pico importante en la respuesta de la frecuencia natural del transductor, y eso se sitúa normalmente alrededor de 30 Khz. para los acelerómetros que se usan normalmente. Una regla general es que un acelerómetro se puede usar alrededor de 1/3 de su frecuencia natural. Los valores por encima de

esta frecuencia se acentuarán debido a la respuesta resonante, pero se pueden usar si se toma en cuenta este efecto.

La mayoría de los acelerómetros que hoy en día se usan en la industria son del tipo "PCI", lo que quiere decir que tienen un preamplificador interno de circuito integrado. El acelerómetro PCI tendrá un límite de baja frecuencia, debido al preamplificador y este se sitúa generalmente a 1 Hz para la mayoría de las unidades disponibles comercialmente. Algunas unidades se han diseñado especialmente para operar desde 0.1 Hz si se necesita datos de muy baja frecuencia.

Cuando se conecta un acelerómetro PCI a la fuente de energía, el amplificador necesita unos segundos para estabilizarse. Durante este tiempo cualquier dato que la unidad recoja será contaminado por las lentas variaciones del voltaje. Por esa razón, los recopiladores de datos deben de tener un retraso integrado, para asegurar que la unidad está en condición estable. Si el retraso es demasiado breve, la forma de onda de tiempo tendrá una rampa de voltaje en forma exponencial superpuesta sobre los datos y en el espectro se verá una característica creciente de muy baja frecuencia. Este se debe evitar, ya que compromete el rango dinámico de la medición.

Cuando se usa un acelerómetro PCI hay que tener cuidado de no exponerlo a niveles de aceleración donde el voltaje de salida alcanza varios voltios para evitar que se sobrecargue el preamplificador interno y se distorsione la señal.

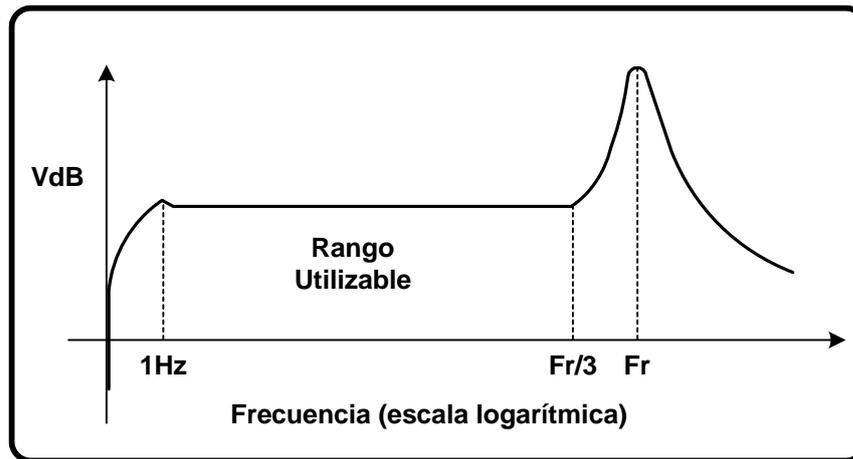


Figura 1.10. Respuesta de Frecuencia del Acelerómetro

Cuando se coloca un acelerómetro es importante que la ruta de vibración desde la fuente hacia el acelerómetro sea la más corta posible, especialmente si se está midiendo la vibración en rodamientos con elementos rodantes.

1.4. VIBRACIONES CARACTERÍSTICAS EN MAQUINAS ROTATORIAS²

1.4.1. DESEQUILIBRIO

Un sistema mecánico giratorio se dice que está equilibrado si durante su funcionamiento la resultante de todas las fuerzas (exteriores, interiores, de inercia, etc.) y sus respectivos pares son de magnitud, dirección y sentido constantes. Lograda la constancia en módulo, dirección y sentido de las fuerzas, mediante una perfecta y homogénea distribución de las masas de la parte móvil, la máquina se puede fijar mediante anclajes que opongan una fuerza y un momento de reacción a la resultante del sistema.

De la definición que se acaba de dar de equilibrio se deduce la existencia de dos posibles tipos de desequilibrio: uno condicionado exclusivamente a

² Manés, Cabanas – Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquina eléctricas rotativas Editorial Marcombo. Págs.: 155-159.

la existencia de una distribución no homogénea de masa, que se puede detectar con el rotor parado, y otro asociado a su propio movimiento.

1.4.1.1. DESEQUILIBRIO ESTÁTICO

Cuando un rotor presenta desequilibrio estático, si se apoyan sus extremos sobre dos piezas giratorias, se desplazará hasta que la parte más pesada quede situada en la posición más baja. Este tipo de desequilibrio se denomina desequilibrio estático, ya que en este caso no es necesario hacer girar el rotor para proceder a su equilibrado.

1.4.1.2. DESEQUILIBRIO DINÁMICO

Si se corta un rotor en pequeñas partes, la línea que pasa por los centros de gravedad de cada una será su eje principal de inercia. Si el rotor se pone en movimiento, tratará de girar alrededor de su eje principal de inercia; por tanto, si el movimiento del rotor se restringe debido a la fijación de los cojinetes y el eje principal de inercia no coincide con el de rotación, se presentará una situación de desequilibrio dinámico.

Teniendo en cuenta que durante la fabricación de los rotores de las máquinas rotativas es imposible conseguir una distribución de la masa totalmente homogénea, todas las máquinas estarán sometidas a una serie de esfuerzos variables alrededor de su eje. El equilibrado industrial de ejes consiste, por tanto, en la determinación de estos esfuerzos y en la introducción de masas que los contrarresten. En los rotores que están en servicio las causas de desequilibrio son bastante amplias:

- ✓ Desgastes y erosiones por rozamiento.
- ✓ Corrosión química.

- ✓ Depósitos de material.
- ✓ Deformaciones permanentes del rotor.

Las tres primeras causas de desequilibrio son inherentes al proceso industrial en el que esté involucrada la máquina; sin embargo, la última puede tener diferentes orígenes:

- 1) El mantenimiento de rotores de gran longitud y peso en una posición fija durante las paradas puede dar lugar a acomodamientos y deformaciones residuales que provocan niveles elevados de vibración una vez que la máquina se pone en marcha.
- 2) La existencia de distorsiones térmicas en los ejes o en los aros de ajuste, causadas por un desigual reparto de temperaturas, producen fuerzas que tienden a curvar los ejes produciendo desequilibrios.
- 3) Los rozamientos de ejes, fricciones, presencia de escobillas, etc. pueden causar zonas calientes localizadas, que combinadas con altas velocidades de giro pueden producir deformaciones que originan desequilibrios dinámicos.

En cualquiera de los casos citados hasta este momento, el efecto del desequilibrio es el mismo: la aparición de una fuerza, proporcional al grado de desequilibrio y a la velocidad de giro del rotor, que actúa sobre los cojinetes de soporte y, por tanto, sobre toda la estructura. Obviamente, la presencia de esta fuerza da lugar a una mayor fricción en los cojinetes que incrementará su temperatura y producirá su envejecimiento prematuro o rotura. En cuanto a la forma de detectar el desequilibrio mediante el análisis espectral de vibraciones, basta con indicar tres hechos fundamentales:

- ✓ El nivel global de vibración de la máquina estará ligado al grado de desequilibrio y se incrementará con él.

- ✓ La presencia de desequilibrio en el rotor se traduce en un incremento en la amplitud de los armónicos de frecuencia idéntica a la velocidad de giro y en menor medida de los múltiplos de ésta.
- ✓ Puesto que el desequilibrio está producido por una fuerza resultante en la dirección radial, la vibración se detectará especialmente en dicha dirección.

1.4.2. DESALINEACIÓN

Del mismo modo que resulta imposible fabricar un rotor perfectamente equilibrado, en el que toda la masa esté uniformemente distribuida, también es imposible conseguir que los ejes del motor y de la máquina acoplada estén alineados en todos los planos.

Casi la totalidad de las máquinas rotativas, bombas, compresores, molinos, ventiladores, etc., están accionadas por otra máquina motriz, habitualmente un motor eléctrico, El acoplamiento entre ambas se realiza a través de un sistema rígido o flexible, en ambas situaciones se debe conseguir que los ejes de las dos máquinas sean perfectamente colineales. En el caso de que esto no ocurra aparece una fuerza resultante sobre el acoplamiento.

La desalineación de los ejes es uno de los problemas más frecuentes de las máquinas rotativas, ya que la presencia de holguras, procesos térmicos y dinámicos en los rotores, desgastes, fuerzas externas, etc., provocan la deformación del rotor y su desplazamiento, favoreciendo así la desalineación entre ejes. Industrialmente existen diferentes técnicas para conseguir la perfecta alineación de los ejes, las cuales van desde la utilización de relojes de alineación hasta el empleo del láser.

Con relación al efecto que puede tener sobre la maquina la existencia de desalineaciones o desequilibrios hay que considerar el valor de su frecuencia natural y el de la estructura que la soporta: las amplitudes de las vibraciones originadas por el fallo siempre guardan una relación de

proporcionalidad con el nivel que éste haya alcanzado; sin embargo, en el caso de que la avería sea capaz de excitar la vibración de algún elemento del sistema a frecuencias próximas a la de resonancia, la amplitud de las vibraciones puede llegar a alcanzar niveles totalmente destructivos.

1.4.2.1. FALLAS EN COJINETES

Todas las máquinas rotativas disponen de cojinetes sobre los que se apoyan los dos extremos del eje que sustenta a la parte móvil. Puesto que estos elementos del sistema están sometidos a una continua fricción, movimiento y las vibraciones causadas por cualquier defecto de la máquina o agente exterior se les transmiten directamente, son los componentes con una tasa de fallas más elevada. Por este motivo, se han desarrollado diferentes técnicas que permiten realizar el diagnóstico de estado de los cojinetes con una considerable precisión y eficacia.

Puesto que el análisis de vibraciones es una de las técnicas más frecuentemente aplicadas, es necesario estudiar principalmente los defectos relacionados con cojinetes de bolas (análogamente de rodillos) debido a que son los más utilizados en motores de pequeño y medio tamaño. Un cojinete de elementos rodantes, posee unas tolerancias extremadamente pequeñas que no permiten un movimiento significativo del eje con respecto al propio cojinete. Los esfuerzos desde el eje son transmitidos a través de los elementos rodantes hasta el anillo exterior del cojinete y allí hacia su alojamiento

Una característica clásica de este tipo de cojinetes es la de generar una serie específica de frecuencias de vibración basadas en la geometría del cojinete, número de elementos rodantes y la velocidad de giro del eje de la máquina. Estas frecuencias aparecen incluso cuando el cojinete está en perfecto estado, aunque su magnitud es muy pequeña.

Típicamente se sitúan en una franja que comprende desde una, a siete veces la frecuencia de paso de los elementos rodantes.

La frecuencia de paso de elemento rodante (**EPx**) se puede definir como el número de veces que un elemento rodante pasa por un punto de la pista interior o exterior. El rango de frecuencias que comprende desde la frecuencia fundamental **EPx** a **7EPx** recibe el nombre de *Prime Spike Region*, y se caracteriza por el hecho de que los armónicos correspondientes a las frecuencias de esta zona se elevan en amplitud con el incremento de la severidad del fallo. Mediante el estudio de las frecuencias anteriores no sólo será posible determinar cuándo se hace necesaria la sustitución del cojinete sino cuál es la parte del mismo que ha fallado.

1.5. DIAGNOSTICO DE MAQUINAS ROTATORIAS.

1.5.1. INTRODUCCIÓN

Para realizar un correcto análisis de vibración en máquinas rotatorias es necesario primeramente aclarar ciertos pasos iniciales a seguir, así como diversos conceptos que ayudaran a aclarar ciertas inquietudes en el diagnostico de máquinas rotatorias. Los pasos iniciales a seguir son:

- ✓ Identificar los picos de vibración en el espectro y determinar su relación con frecuencias forzadas.
- ✓ Determinar la gravedad de los problemas de la máquina basándose en las amplitudes y la relación entre los picos de vibración.
- ✓ Hacer las recomendaciones apropiadas para las reparaciones, basadas en la gravedad de los problemas de máquinas.
- ✓ Disponer de una Guía para el Análisis de Pruebas de Vibración para la máquina, los promedios de datos de vibración también son útiles, si están disponibles.

1.5.1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PICO DE PRIMER ORDEN (1X)

El primer paso en el análisis de vibración de máquina es la identificación del pico espectral que corresponde a la velocidad de rotación de la flecha, o sea el llamado pico 1x. Esto será el 1x en un espectro normalizado, también se llama el pico de primer orden. Es importante verificar si la normalización se hizo de manera correcta. En máquinas con flechas múltiples, cada flecha tendrá un pico característico 1x, y el analista los podrá localizar. Noten que en máquinas con flechas múltiples, que giran a velocidades diferentes, cada flecha tendrá un grupo de armónicos 1x, relacionado con este pico.

Muchas veces, los picos 1x de la flecha van acompañados de una serie de armónicos o de múltiplos enteros de 1x y esto ayuda a que sean encontrados. Una buena confirmación del pico de primer orden es la existencia de otras frecuencias forzadas conocidas como el paso de álabes de la impulsora de la bomba. Por ejemplo, si la bomba tiene seis alabes, en la impulsora, normalmente habrá un fuerte pico espectral en 6x, o sea en el sexto armónico de la velocidad de revolución. También a veces aparecerán armónicos de la velocidad de los alabes de la impulsora.

Así, después de la verificación de la validez de los espectros y de la identificación positiva de los picos espectrales especialmente los componentes 1x, el diagnóstico de los problemas de máquinas puede empezar.

1.5.2. CHUMACERAS

La mayoría de las chumaceras generarán picos espectrales a frecuencias más bajas que 1x, y estos se llaman picos sub sincrónicos. A veces, los armónicos de estos picos sub sincrónicos también se generan, lo que

indica una fuerte degeneración del rodamiento. A continuación mencionamos algunas causas que se tienen que investigar cuando se hace el diagnóstico de las chumaceras.

1.5.2.1. REMOLINO DE ACEITE (OIL WHIRL)

Remolino de aceite es una condición en la que ocurre una fuerte vibración entre $0.38x$ $0.48x$. Nunca aparece en exactamente $0.5x$, Está causado por un juego excesivo y una carga radial ligera, lo que resulta en una acumulación de la película de aceite. El remolino de aceite es una condición seria, que necesita corrección, cuando se encuentra, ya que se puede deteriorar rápidamente hasta el punto donde hay contacto de metal a metal en el rodamiento.

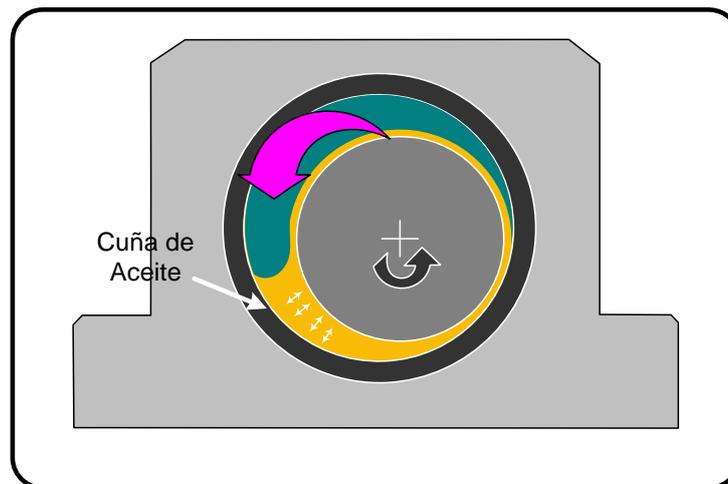


Figura 1.11. Remolino de Aceite (Oil Whirl)

1.5.2.2. LATIGAZO DE ACEITE

Las llamadas velocidades críticas son velocidades en las que se excita una frecuencia natural de la flecha. La mayoría de las máquinas con flechas largas tendrán varias velocidades críticas, y la velocidad de operación estará por lo general arriba de la primera velocidad crítica.

El latigazo de aceite es una condición muy destructiva que ocurre a veces en grandes máquinas con varios rotores operados arriba de velocidades críticas. El latigazo de aceite ocurre cuando el componente de excitación por remolino de aceite llega a una frecuencia igual a la frecuencia natural de la flecha. La resonancia está excitada y el resultado son niveles de vibración muy altos. El latigazo de aceite a veces ocurre al arrancar, en máquinas con flechas largas. Ya que la frecuencia natural que se está excitando es la influencia controladora en el sistema, la frecuencia de la vibración no cambiará a medida que se incrementa la velocidad. Esto en contraste con el sencillo remolino de aceite, cuya frecuencia cambia con la velocidad de la flecha. Esto proporciona un buen método para la detección de latigazo de aceite.

La solución al remolino de aceite, y al latigazo de aceite es un juego adecuado pequeño en el rodamiento y una carga adecuada radial. Cuando una gran turbina está llevada a su velocidad de funcionamiento, es importante pasar rápidamente a través de las velocidades críticas para evitar la generación de latigazo de aceite.

1.5.2.3. HOLGURA DE RODAMIENTO

A veces una holgura mecánica extrema en una parte que no sea un rodamiento generará un espectro como se muestra en la figura 1.12.

La holgura mecánica provoca la aparición de armónicos de $1x$ y en casos están presentes severos semi órdenes de $0.5x$. Muchas veces la causa de las semi órdenes es el rechinido del rodamiento. A veces se ven órdenes de un tercio y un cuarto en ejemplos extremos de holgura.

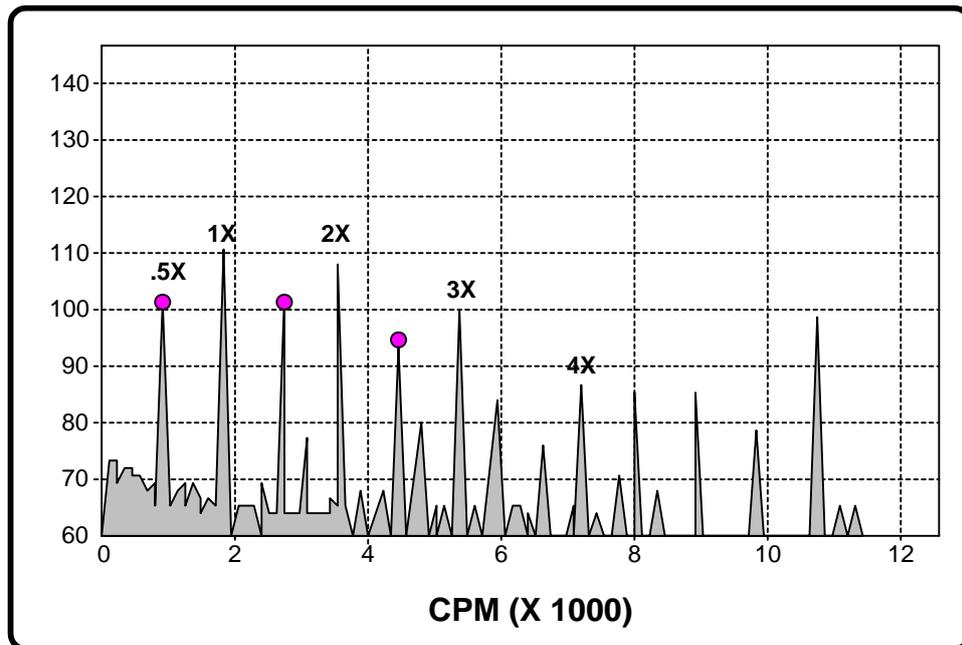


Figura 1.12. Holgura mecánica de rodamiento

Los armónicos de 1/2, 1/3 y 1/4 de orden a veces se llaman subarmónicos.

1.5.2.4. RODAMIENTOS DE EMPUJE

Los rodamientos de empuje desgastados por lo general presentan fuertes componentes axiales, en los primeros armónicos de 1x. Los rodamientos con 6 zapatas gastados generarán un pico en 6x. Este pico de vibración está de manera predominante en la dirección axial.

1.5.3. RODAMIENTOS CON ELEMENTOS RODANTES

En la práctica, menos del 10% de todos los rodamientos funcionarán durante su tiempo de vida esperado. Alrededor de 40% de fallas de rodamientos ocurren debido a una lubricación inadecuada, y alrededor de 30% de fallas ocurren debido a un montaje incorrecto, eso quiere decir desalineación. Alrededor del 30% fallan por otras causas como sobrecarga

y defectos de manufactura. Aparte de los componentes no sincrónicos, los rodamientos con fallas también pueden causar ruido de banda ancha en el espectro de vibraciones. En un estado más avanzado puede causar el calentamiento del rodamiento hasta su destrucción total.

Los problemas de rodamientos con elementos rodantes son las fallas más comunes que se diagnostican en análisis de vibración. Un rodamiento defectuoso producirá componentes de vibración que son múltiplos exactos de $1x$, en otras palabras, son componentes no sincrónicos. La existencia de componentes no sincrónicos en un espectro de vibraciones indica que puedan existir problemas de rodamientos y se debería de excluir otras posibles fuentes de este tipo de componentes para verificar el diagnóstico.

1.5.3.1. DESGASTE EN RODAMIENTOS CON ELEMENTOS RODANTES

Los primeros estados de fallas de rodamientos producirán frecuencias de vibración no sincrónicas indicativas, que se llaman "tonos de rodamientos", y sus armónicos.

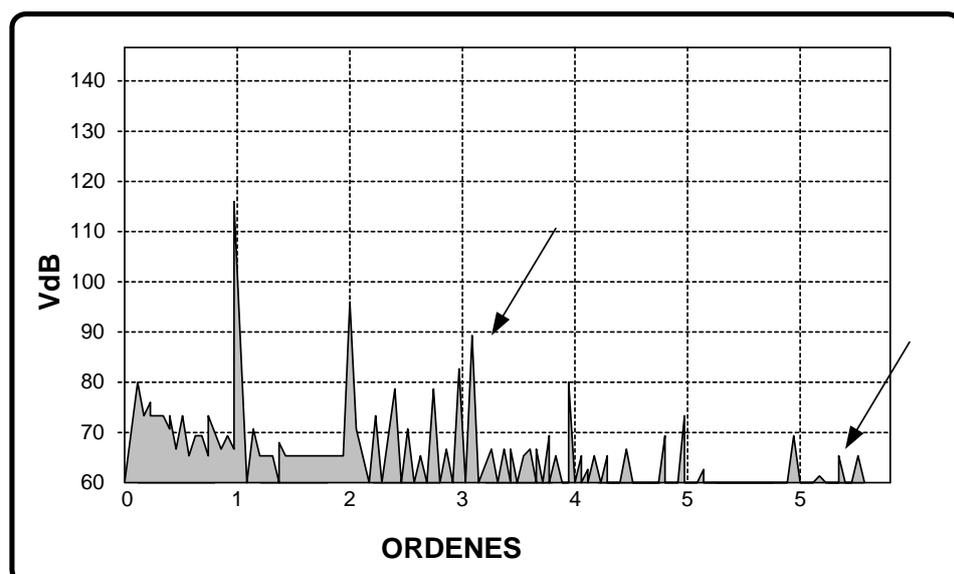


Figura 1.13. Tonos de rodamiento a $3.2x$

A veces un rodamiento nuevo producirá un tono de rodamiento, posiblemente debido a daños durante la instalación o el transporte o defectos de manufactura.

Si el defecto de rodamiento es de tamaño muy pequeño, como una grieta en uno de los anillos, la firma de vibración tendrá armónicos del tono de rodamiento y habrá poca o ninguna frecuencia fundamental. Si el defecto empieza como una astilla en un área más grande del anillo, la fundamental del tono de rodamiento estará a un nivel más alto que los armónicos. A medida que el defecto empeora, el nivel general de tonos de rodamiento se va a incrementar y también el nivel general de ruido de banda ancha.

1.5.3.2. BANDAS LATERALES

Si el efecto se encuentra localizado en el anillo interior, del rodamiento, la velocidad de revolución modulará en amplitud los tonos de rodamiento, y esto provocará bandas laterales alrededor de los tonos de rodamiento, a una distancia de $1x$. La modulación de amplitud proviene del hecho que el defecto en el anillo interior entre y salga del área de carga del rodamiento una vez por revolución. Mientras está en el área de carga el defecto producirá vibración a la frecuencia del paso de bolas, pero cuando está fuera del área de carga se producirá muy poca vibración en esta frecuencia. Esto explica la modulación de amplitud del tono de rodamiento y las bandas laterales consecuentes. Las bandas laterales a una distancia de $1x$ de tonos de rodamiento son una indicación segura de desgaste en el rodamiento, que va avanzando. A veces, si un rotor está fuertemente desbalanceado un defecto de rodamiento en el anillo interior no producirá modulación de amplitud o bandas laterales. Esto se debe a que la fuerza centrífuga causada por el desbalanceo mantiene el anillo interior cargado en el mismo lugar en su periferia todo el tiempo.

El estado final de desgaste en rodamientos a veces se llama estado termal, es el en que el rodamiento se calienta y hecha a perder el lubricante, lo que lleva a una falla catastrófica que puede incluir que se fundan los rodillos y/o los anillos.

La clave para un mantenimiento efectivo predictivo de los rodamientos es el establecer tendencias de niveles de tonos de rodamientos en el tiempo y desde su inicio. A veces una condición en un rodamiento progresará desde una falla muy pequeña hasta una falla total en un tiempo relativamente corto. Se deberá tener en mente que algunos tipos de máquinas tendrán tonos de rodamiento en los espectros promedios. El diagnóstico se hace basándose en incrementos significativos de estos valores promedios. Cualquier tono de rodamiento significativo se deberá vigilar con cuidado para darse cuenta si está empeorando.

1.5.3.3. RODAMIENTOS CON ELEMENTOS RODANTES DESALINEADOS

Un rodamiento desalineado generará un componente 1x significativo y algo de 2x en el espectro de vibración, por lo general de manera predominante en la dirección axial. En algunos casos, la dirección dominante puede ser radial.

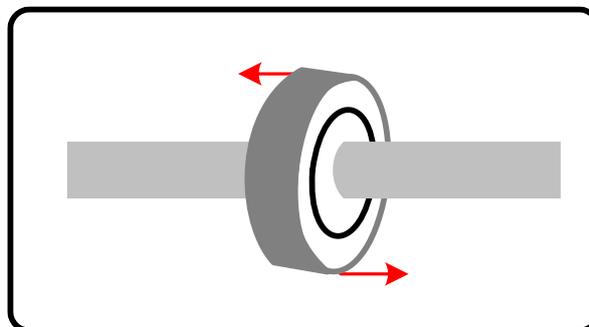


Figura 1.14. Rodamientos Desalineados

1.5.3.4. HOLGURA DE RODAMIENTOS CON ELEMENTOS RODANTES

Un juego excesivo en un rodamiento con elementos rodantes producirá armónicos de 1x usualmente en un rango de 2x hasta 8x. La holgura extrema generalmente producirá componentes de medio orden, en múltiplos de 0.5x. La holgura en otras partes de la máquina también producirá armónicos 1x y a veces armónicos 0.5x, así que esto no es una señal que permite concluir la presencia de juego en los rodamientos.

1.5.3.5. HOLGURA MECÁNICA

La holgura mecánica puede ser de dos tipos: holgura rotativa o no rotativa. Una holgura rotativa está causada por un juego excesivo entre las partes rotativas y estacionarias de la máquina, y la holgura no rotativa es una holgura entre dos partes que normalmente son estacionarias, como una pata de máquina y su base. Los dos tipos de holgura producirán armónicos 1x en los tres ejes de vibración. Las holguras rotativas y no rotativas generarán fuertes armónicos 1x.

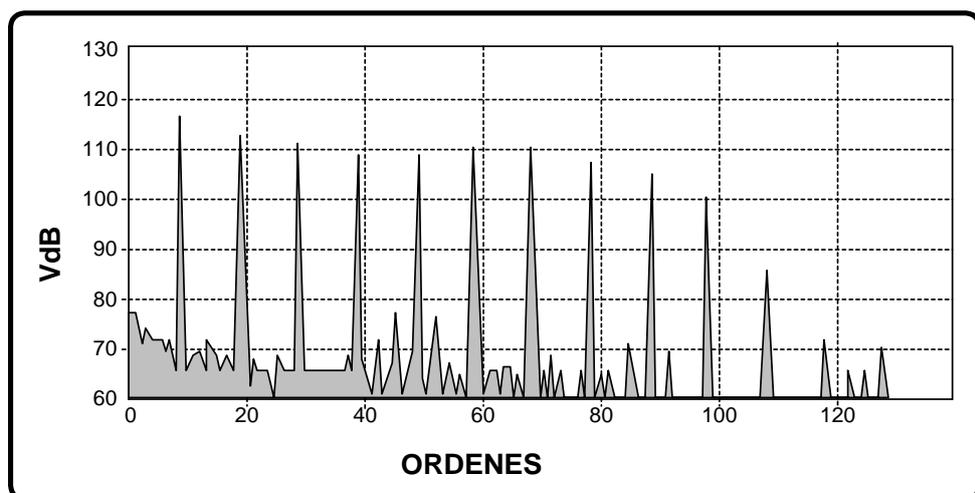


Figura 1.15. Holgura mecánica

1.5.3.6. MOTORES ELÉCTRICOS A CORRIENTE ALTERNA (CA)

Hay dos tipos de motores eléctricos a corriente alterna, el motor síncrono y el motor de inducción. Cada uno de estos tipos puede usar corriente monofásica o trifásica. En aplicaciones industriales, los motores trifásicos son los más comunes, debido a su mayor eficiencia. El motor síncrono es mucho menos generalizado que el motor a inducción, pero se usa en unas aplicaciones especiales, que requieren una velocidad absolutamente constante o una corrección del factor de potencia. Los motores de inducción y los motores síncronos son similares en muchos aspectos pero tienen algunos detalles diferentes.

El estator del motor CA contiene un número de bobinas de alambre enrollado alrededor y a través de las ranuras del estator. Siempre hay más ranuras que bobinas y por eso las bobinas son trenzadas de manera bastante compleja. Cuando se les aplica corriente a las bobinas, se genera un campo magnético rotativo dentro del estator. La velocidad de rotación depende del número de bobinas, o del número de polos. En un motor trifásico, tres bobinas formarán 2 polos magnéticos debido a la acción de las corrientes que tienen una diferencia de fase de 120 grados entre ellos. Con una frecuencia de línea de 60 Hz, y dos polos en el estator, la frecuencia de rotación del campo será de 60 ciclos por segundo o 3600 RPM. Si hay 4 polos (6 bobinas) el campo girará a 1800 RPM y etc.

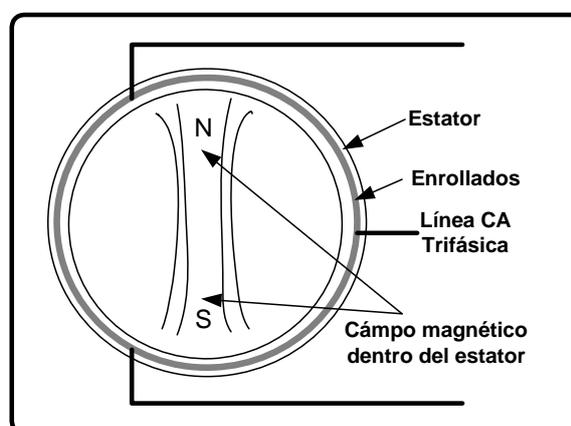


Figura 1.16. Campo magnético rotativo

1.5.3.7. MOTORES SINCRÓNICOS

Si un rotor está magnetizado de manera permanente en dirección transversal, será arrastrado por atracción magnética a la velocidad a la que está girando el campo, llamada velocidad sincrónica. Este motor se denomina sincrónico. Su velocidad está exactamente sincronizada con la frecuencia de línea. En grandes motores sincrónicos industriales el rotor es un electroimán y está excitado por corriente directa.

Una característica del motor sincrónico es que si el rotor es "sobree excitado", esto es, si el campo magnético es superior a un cierto valor, el motor se comporta como un capacitor a través de la línea de poder. Esto puede ser útil para la corrección del factor de fuerza en plantas industriales que usan muchos motores de inducción.

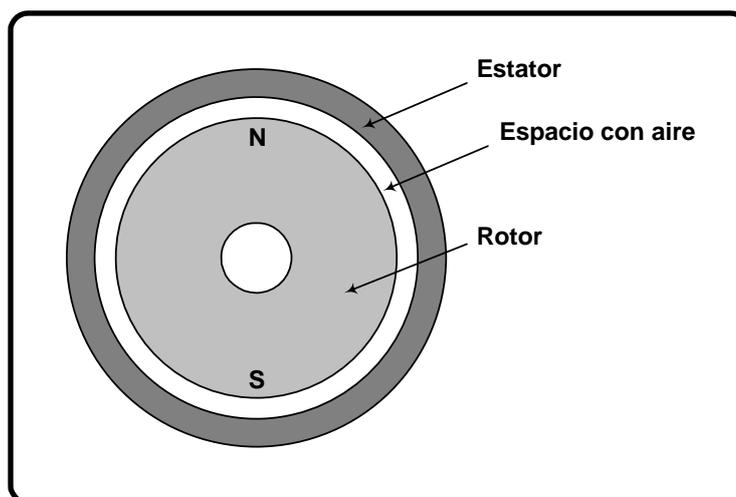


Figura 1.17. Motor sincrónico CA

1.5.3.8. MOTORES DE INDUCCIÓN

La diferencia entre el motor de inducción y el motor sincrónico es que en el motor de inducción el rotor no es un imán permanente, tiene barras de conducción en toda su longitud, incrustadas en ranuras a distancias uniformes alrededor de la periferia. Las barras están

conectadas con anillos (en cortocircuito) a cada extremidad del rotor. Este ensamblaje se denomina "jaula de ardilla".

Cada par de barras es una bobina en cortocircuito, hablando magnéticamente. El rotor se magnetiza por las corrientes inducidas en sus barras, debido a la acción del campo magnético, girando en el estator. Mientras que el campo del estator pasa a lo largo de las barras del rotor, el campo magnético que cambia induce altas corrientes en ellas y genera su propio campo magnético. La polaridad del campo magnético inducido del rotor es tal que repele al campo del estator que lo creó. Esta repulsión resulta en un torque sobre el rotor que lo hace girar.

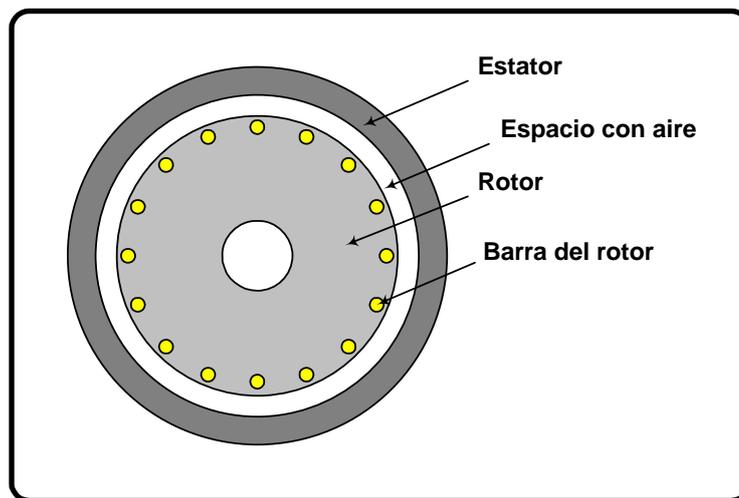


Figura 1.18. Motor de inducción CA

Ya que el motor de inducción funciona por repulsión magnética, en lugar de por atracción como el motor sincrónico, se le llama "motor a inducción repulsiva".

Si no hubiera fricción en el sistema, el rotor giraría a una velocidad sincrónica, pero no produciría un torque útil. Bajo esta condición no habría movimiento relativo entre las barras del rotor y el campo rotativo del estator, y no tampoco existiría inducción de corriente en ellas. En el momento en que se aplica una carga al motor, la velocidad se reduce,

lo que provoca que las barras del rotor corten las líneas magnéticas de fuerza del campo del estator y crean la fuerza de repulsión en el rotor. El campo magnético inducido en el rotor se mueve en la dirección opuesta a la rotación y la velocidad de este movimiento depende de la carga aplicada. Esto quiere decir que las RPM siempre serán inferiores a la velocidad sincrónica. La diferencia entre la velocidad del rotor y la velocidad sincrónica se llama el deslizamiento. Entre más grande es el deslizamiento, más grande es la corriente inducida en las barras del rotor, y más grande el torque. La corriente en los bobinados del estator también se incrementa para crear corrientes más grandes en las barras. Por estas razones la velocidad de un motor de inducción siempre dependerá de la carga.

1.5.3.9. FUENTES DE VIBRACIÓN

En un motor eléctrico, el doble de la frecuencia de línea (120 Hz) siempre es un componente de vibración que se puede medir. A esta frecuencia la atracción entre el rotor y el estator es variable y las dimensiones del hierro cambian ligeramente en presencia de un campo magnético variable debido a la constricción magnética.

1.5.3.9.1. VIBRACIÓN RELACIONADA CON EL DESLIZAMIENTO

Irregularidades en las barras del rotor causarán vibración a la frecuencia de deslizamiento multiplicado por el número de polos en el motor. Por ejemplo en el motor de dos polos cualquier barra de rotor estará alineada con el polo magnético giratorio, creado por el estator en dos ocasiones para cada ciclo de deslizamiento. El ciclo de deslizamiento es la velocidad sincrónica dividida entre la velocidad de deslizamiento.

Si una barra de rotor tiene más resistencia que las otras, debido a grietas o roturas, habrá menos corriente inducida en ella, cuando está alineada con los polos y esto producirá menos torque en este punto del ciclo de deslizamiento: de esa manera, el torque será modulado a la frecuencia de deslizamiento multiplicada por dos veces el número de polos. Esto se puede ver en un componente de vibración en la firma y también resulta en bandas laterales alrededor del componente de vibración $1x$ y alrededor de los armónicos de $1x$ a una distancia de $2S$ veces el número de polos (S es el deslizamiento).

Barras de rotor rotas, cuarteadas o corroídas, son causas comunes de fallas en motores a inducción, especialmente en motores que arrancan frecuentemente con carga. La corriente de arranque es muy superior a la corriente de funcionamiento y ejerce una tensión en las barras del rotor, lo que hace que se calienten. Barras con la resistencia más alta se calentarán más, provocando una distribución de temperatura desigual, alrededor del rotor y una expansión diferencial de las barras, lo que lleva a roturas y grietas en el lugar donde se unen con el anillo de cortocircuito.

Un motor a inducción con barras defectuosas producirá una firma de vibración que varía lentamente en amplitud, a dos veces la frecuencia de deslizamiento. Este fenómeno se llama batido y muchas veces se puede oír y también medir. La amplitud y la frecuencia de los batidos dependen de la carga del motor.

1.5.3.9.2. FRECUENCIA DE PASO DE RANURAS

Otro componente de vibraciones en motores eléctricos es la llamada frecuencia de paso de ranuras. Esta frecuencia es el número de ranuras en el estator multiplicado por la velocidad de giro. Las ranuras del estator contienen los bobinados conductivos y su

número finito produce una falta de uniformidad en el campo magnético rotativo, lo que causa un componente de vibración. Las barras del rotor también están en ranuras y la frecuencia de paso de las barras del rotor también a veces se llama frecuencia de paso de ranuras y es diferente de la frecuencia de paso de ranuras del estator.

1.5.3.9.3. LÁMINAS EN CORTO

El rotor y el estator de motores CA están hechos de láminas delgadas aisladas unas de otras. Esto impide que las corrientes inducidas magnéticamente circulen en el hierro y provoquen calentamiento. Si a las láminas se les coloca cortocircuito, en algunos lugares ocurrirá un calentamiento local, y una distorsión termal resultará. Las láminas en corto también causarán niveles de vibración más altos a 120 Hz.

1.5.3.10. FUENTES MECÁNICAS DE VIBRACIÓN EN MOTORES

1.5.3.10.1. FLEXIÓN TÉRMICA DEL ROTOR

Un calentamiento desigual del rotor, debido a una distribución de corriente desigual por la barra del rotor desalineada, causa una distorsión o una flexión en el rotor. La flexión del rotor resulta en una condición de desbalanceo con todos sus síntomas usuales. Se puede detectar por el hecho que desaparece cuando el motor está frío. El calentamiento local puede ser tan extremo que la barra defectuosa puede fundirse y penetrar en el entrehierro.

1.5.3.10.2. EXCENRICIDAD EN EL ENTREHIERRO

Si el entrehierro no es uniforme, las fuerzas en el rotor no son balanceadas y esto resulta en una alta vibración inducida magnéticamente a 120 Hz. La atracción magnética es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el estator y el rotor, y por eso, una pequeña excentricidad causará una vibración relativamente importante.

1.5.3.10.3. HOLGURA EN EL ROTOR

A veces el rotor puede deslizarse en la flecha, por lo general de manera intermitente dependiendo de la temperatura, lo que causará una fuerte vibración en 1x y armónicos. Cambios abruptos en carga y voltaje de línea pueden iniciar esto.

1.5.3.10.4. ROTOR EXCÉNTRICO

Si la sección del rotor no es completamente circular, causará una excitación en 1x y fuerzas magnéticas desbalanceadas que causan una vibración a la frecuencia de deslizamiento, multiplicado por el número de polos. Este componente desaparecerá inmediatamente, cuando desaparece la corriente, y eso sirve de prueba de confirmación.

1.5.3.10.5. HOLGURA EN LOS BOBINADOS

Si los bobinados eléctricos del estator del motor presentan aunque sea una holgura ligera, se incrementará el nivel de vibración a 120 Hz. Esta situación es altamente destructiva, ya que está desgastando el aislamiento del alambre, lo que provoca vueltas en

cortocircuito y al final, cortocircuitos hacia la tierra y falla del estator. En algunas máquinas, como generadores CA, la holgura en los enrollamientos generará armónicos de media orden de la frecuencia de excitación de 120 Hz.

1.5.3.11. PROBLEMAS DE BARRAS DEL ROTOR

Una falla importante en los motores eléctricos grandes, es el agrietamiento, el calentamiento y la rotura de barras de rotor, especialmente en motores que arrancan con frecuencia bajo carga. La condición de arranque pone la tensión más alta sobre las barras del rotor, ya que ellas tienen la corriente más alta y el rotor gira a una velocidad mucho mas baja que la velocidad sincrónica.

Las altas corrientes causan un calentamiento y una expansión de las barras con relación al rotor y debido a las diferencias en la resistencia eléctrica de las barras individuales, el calentamiento y la expansión serán desiguales. Esto lleva a un agrietamiento de las juntas, donde las barras están soldadas al anillo de cortocircuito. Tan rápido como aparezca una grieta, la resistencia de la barra se incrementa, lo que incrementa el calentamiento y empeora la grieta. Al mismo tiempo, las barras del rotor vecinas recibirán corrientes incrementadas debido a la corriente reducida en la barra rota. Esta secuencia resulta en el calentamiento del rotor.

1.5.3.12. MOTORES CD.

Una vibración excesiva en motores CD, puede ser causada por segmentos de conmutadores mal formados o picados, o un contacto incorrecto de las escobillas con el conmutador. La frecuencia estará a la frecuencia de paso de segmentos, lo que equivale al número de segmentos del conmutador multiplicado por la velocidad de giro.

Los sistemas de control de velocidad electrónicos para grandes motores CD, por lo general usan rectificadores controlados de silicio (SCRs) para convertir una corriente trifásica en una corriente directa, y pueden generar grandes cantidades de interferencia eléctrica en armónicos de la frecuencia de línea de CA, especialmente 360 Hz, lo que es 6 veces la frecuencia de línea. Cuando estos componentes se introducen en los bobinados del motor, causarán vibraciones a esas frecuencias.

Si el pico en 360 Hz en el espectro de vibración se incrementa de manera significativa, las causas más probables son bobinados con circuitos abiertos, holgura en conexiones eléctricas o SCRs funcionando de manera incorrecta.

1.5.4. TURBINAS

Las turbinas a gas y a vapor esencialmente son similares mecánicamente. Las turbinas a gas tienen la complicación adicional de una cámara de combustión. Las firmas de vibración de turbinas a gas por lo general contienen un componente de vibración de banda ancha, causado por el ruido de la combustión.

1.5.4.1. DIAGNÓSTICOS DE TURBINA

Las turbinas a veces muestran un componente fuerte a la llamada proporción de álabes, que es el número de álabes de la turbina por la velocidad del rotor. La magnitud de este componente depende de la geometría interna de la unidad. Si esto cambia, por ejemplo debido a una alabe agrietada, distorsionada o picada o a un juego cambiado, el componente de paso de alabes en la firma de vibración cambiará, por lo general empeorará. Si las alabes de la turbina se desgastan de manera uniforme, la frecuencia de paso de alabes se quedará bastante

uniforme, pero si una porción del rotor está dañada, como con un alabe rota, el paso de alabes será modulado por la velocidad del rotor.

1.5.5. BOMBAS

Hay muchos tipos de bombas en uso, y sus firmas de vibración varían en un amplio rango. Cuando se está monitoreando la vibración en bombas, es importante que las condiciones de operación sean idénticas de una operación a la siguiente, para asegurar firmas consistentes. La presión de succión, la presión de descarga y especialmente la inducción de aire y la cavitación afectarán la firma de vibración.

1.5.5.1. BOMBAS CENTRÍFUGAS

Bombas centrífugas siempre tienen un componente de vibración importante en la frecuencia de paso de alabes, que es igual al número de alabes de la impulsora por la velocidad. Si la amplitud se incrementa de manera significativa, por lo general quiere decir que hay un problema interno como una desalineación, o daño en los álabes. Los armónicos del paso de álabes también son comunes en estas bombas.

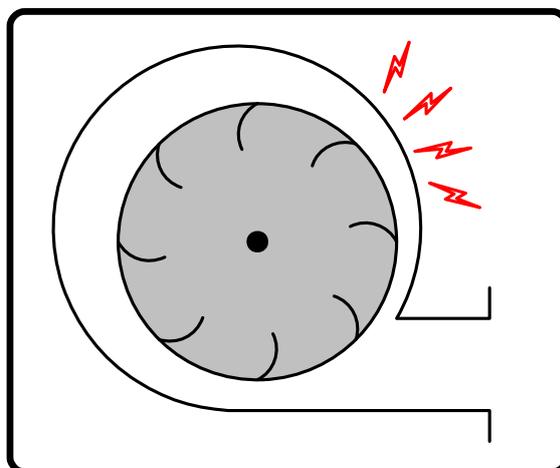


Figura 1.19. Bomba Centrífuga

1.5.5.2. BOMBAS CON ENGRANES

Las bombas con engranes se usan para bombear aceite de lubricación, y casi siempre tienen un componente de vibración fuerte en la frecuencia del engranaje, que es el número de dientes en el engrane por la velocidad. Este componente dependerá en gran medida de la presión de salida de la bomba. Si la frecuencia del engranaje se cambia de manera significativa, y hay una aparición de armónicos o de bandas laterales, en el espectro de vibración, este podría ser una indicación de un diente cuarteado o dañado de otra manera.

1.5.5.3. BOMBAS DE HÉLICE

El tipo de bomba de hélice puede generar un gran número de componentes de frecuencia en el espectro de vibración. Desgaste o daños en la rosca generalmente producirán fuertes armónicos en la proporción de la rosca que son el número de hilos por la velocidad.

1.5.6. ACOPLAMIENTOS

Los acoplamientos existen en muchos tipos y configuraciones y un defecto en un acoplamiento por lo general causa síntomas similares a la desalineación. Frecuentemente los problemas de acoplamiento producirán componentes de vibración 1x más fuertes que los que produce la desalineación. Si el acoplamiento no es verdadero, eso es si las caras de las bridas no son paralelas, se produce una vibración similar a la desalineación angular.

La desalineación de acoplamientos es un problema común y el resultado son componentes altos 1x y 2x radiales y tangenciales.

El desgaste en el acoplamiento puede producir todos los síntomas de desalineación y de holgura. Los acoplamientos de motor de tres mordazas, que contienen espaciadores de longitud incorrecta causarán fuertes componentes axiales y radiales a 3 veces las RPM de la flecha.

1.5.7. BANDAS DE ACTIVACIÓN

Las bandas son un tipo de transmisión de fuerza relativamente barato, pero están sujetas a muchos problemas. Hay muchas clases de bandas y todas están expuestas a desgaste y a daños. Las bandas deben ser revisadas frecuentemente para ver si tienen daños. Deben ser mantenidas a la tensión correcta y deben estar limpias.

1.5.7.1. BANDAS MAL EMPAREJADAS, DESGASTADAS O ESTIRADAS

Bandas mal emparejadas, estiradas o desgastadas, generarán vibración a la frecuencia fundamental de paso de banda y sus armónicos. Si es que hay dos poleas en el sistema, el segundo armónico estará dominante. La frecuencia fundamental de la banda (FFB) se muestra en la ecuación (1.7).

$$FFB = \pi \frac{D}{L} (RPM) \quad (1.7)$$

Donde:

D = Diámetro de la Polea

L = Longitud de la Banda

RPM = Velocidad de revolución de la polea.

1.5.7.2. POLEAS EXCÉNTRICAS, MOVIMIENTO EXCÉNTRICO DE POLEAS

Poleas excéntricas generarán fuertes componentes radiales $1x$, especialmente en la dirección paralela a las bandas. Esta situación es muy común e imita el desbalanceo. Eso se puede verificar removiendo las bandas y volviendo a medir. Una vibración $1x$ de una polea excéntrica o de una polea con movimiento excéntrico generalmente se manifestará en la otra polea.

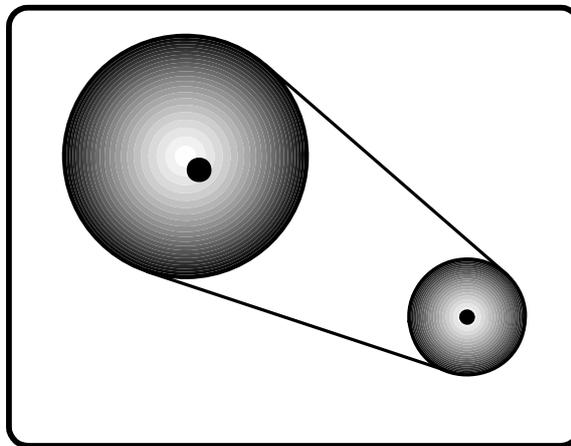


Figura 1.20. Polea Excéntrica

1.5.7.3. DESALINEACIÓN DE POLEAS

La desalineación de poleas generará fuertes componentes axiales $1x$ y armónicos axiales de la frecuencia fundamental de la banda.

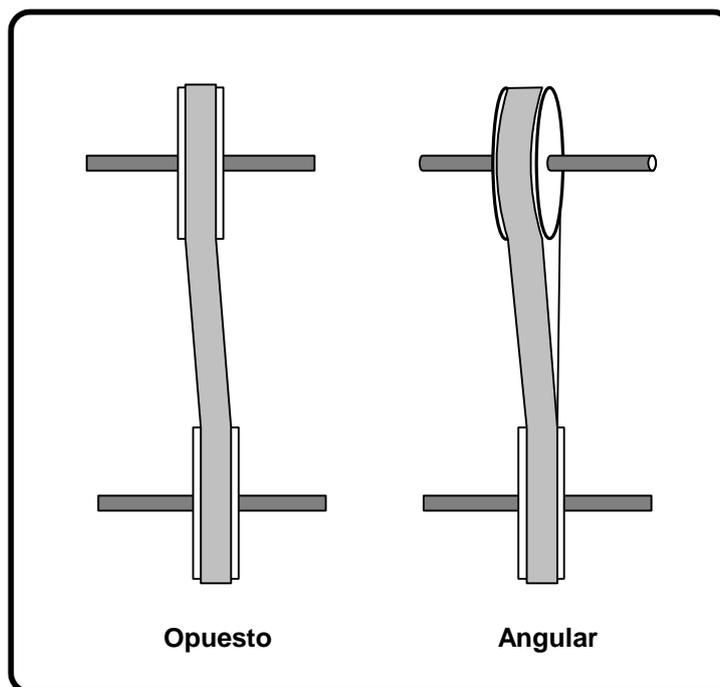


Figura 1.21. Desalineación de poleas

1.5.7.4. RESONANCIA DE BANDA O GOLPE DE BANDA

Una fuerte vibración con onda estática, de las bandas es una indicación de una tensión incorrecta. La frecuencia puede variar en un alto rango, y se puede medir con un pequeño estroboscopio portátil para verificar su posición en el espectro.

1.5.8. CAJAS DE ENGRANES

Cajas de engranes sanas generarán tonos bastante prominentes en la frecuencia del engranaje, que es el número de dientes de los engranes por la velocidad del engrane. En una caja nueva, a medida que se desgastan los dientes, el componente del engranaje disminuirá en nivel cuando los dientes se hacen más suaves y se adaptan. Después, a medida que va progresando el desgaste, el engranaje incrementará de nivel. El nivel del componente del engranaje depende también de la alineación de las flechas que cargan los engranes.

Si la caja tiene flechas múltiples, cada par de engranes generará sus propios componentes de engranaje. Los engranes con diferentes tipos de dientes generarán niveles diferentes de vibración. Los engranes rectos son los más ruidosos, seguidos por engranes cónicos, engranes hipoides, engranes helicoidales, engranes doble helicoides, y engranes helicoidales sin fin en orden descendente de nivel de vibración.

1.5.8.1. FRECUENCIA DE CAZA DE DIENTES

La llamada frecuencia de caza de dientes es la frecuencia con que un diente en un engrane se une con un diente particular en otro. Si la proporción de los engranes es un número entero como 1, 2 o 3, la frecuencia caza dientes será la velocidad del engrane más grande y los mismos dientes estarán en contacto una vez por revolución. Esto causará un desgaste desigual, ya que un defecto pequeño en un diente contactará de manera repetitiva el mismo diente en el otro engrane, causando un desgaste localizado en estos dientes.

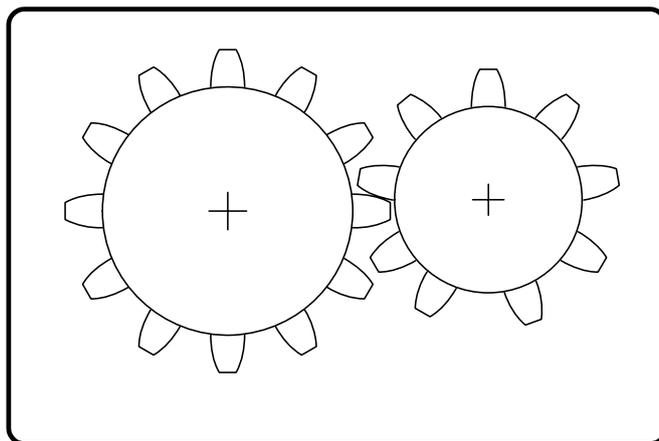


Figura 1.22. Engranes

Por esa razón, las cajas de engranes no se construyen con esas proporciones sencillas, a menos que sea absolutamente necesario. Idealmente, la frecuencia caza diente debería ser la más baja posible,

para distribuir de una manera igual el desgaste. Eso quiere decir que el número de dientes en cada engrane debe ser un número primo. La frecuencia caza dientes es la relación entre el mínimo común múltiplo del números de dientes y la frecuencia de engrane. El mínimo común múltiplo, muchas veces es solamente el producto de los números de dientes. En algunas cajas, la frecuencia caza dientes aparecerá en el espectro de vibraciones y si es así, se debería establecer una tendencia en el tiempo, ya que bajo esas circunstancias el desgaste es rápido.

1.5.8.2. DAÑOS A DIENTES DE ENGRANES

El daño localizado en un diente de un engrane resultará en componentes de frecuencia elevada del engranaje modulados por la velocidad del engrane. Esto causa bandas laterales a distancia de 1x alrededor del engranaje, y armónicos del engrane. En el caso que se producen bandas laterales, es fácil determinar existe un defecto, por la distancia de las bandas laterales.

1.5.8.3. ENGRANES EXCÉNTRICOS Y FLECHAS CON FLEXIÓN

La excentricidad del engrane generará una banda lateral a cada lado a una distancia igual a la velocidad de giro, en lugar de las bandas laterales múltiples que se encuentran con dientes individuales dañados.

1.5.9. COMPRESORES CENTRÍFUGOS

Los compresores centrífugos generan espectros similares a los ventiladores centrífugos en los que la frecuencia de paso de álabes es dominante. Los álabes dañados o con erosión causarán un incremento del paso de álabes, y también producirán bandas laterales 1x alrededor de

esta frecuencia. En compresores centrífugos la oscilación hidráulica es un problema de dinámica de fluidos que por lo general causa una vibración a una frecuencia de menos de 1x. Muchas veces está causada por una presión de salida incorrecta.

En la figura 1.23 se muestra el espectro de vibración típico de un compresor centrífugo con 6 álabes.

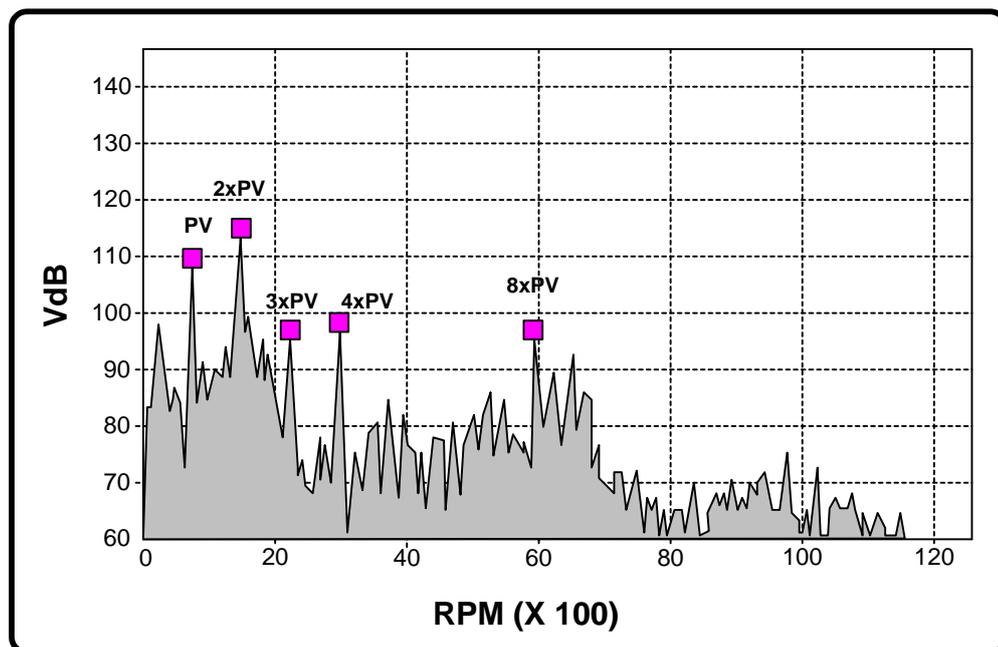


Figura 1.23. Armónicos del paso de álabes

1.5.10. MAQUINAS RECÍPROCAS

Los tipos más comunes de máquinas recíprocas son: bombas a pistón, compresores y motores a combustión interna. En todas estas máquinas el ritmo del pistón (por lo general 1x) es dominante, junto con el ritmo de ignición de los motores con 4 ciclos. No es difícil encontrar niveles de vibración tan altos como 125 VdB (7 pulgadas por segundo pico) en máquinas sanas como esas. Se debe juzgar el estado de la máquina comparando con niveles anteriores, en lugar de aplicar niveles de referencia absolutos.

Muchas máquinas recíprocas tienen turbo cargadores y esos se diagnostican como otras turbinas rotativas y compresores. Los problemas en engranes de árboles de levas también son comunes y se pueden ver examinando la frecuencia del engrane. Si el motor tiene un amortiguador torsional en la flecha, este puede fallar incrementando de manera importante la vibración en la frecuencia de vibración torsional del primer cigüeñal. Esta frecuencia se debe obtener del fabricante del motor.

Las bombas de pistón con desplazamiento variable son mucho más suaves que los compresores y se prestan bien al análisis de vibración. Si hay armónicos del ritmo del pistón presentes en niveles significativos eso indica por lo general un problema en la activación del pistón. Un tono muy prominente en la frecuencia fundamental del pistón puede ser indicativo de un desgaste de la placa de giro excéntrico.

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

2.1. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

2.1.1. PRINCIPIOS BÁSICOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

2.1.1.1. INTRODUCCIÓN

Son muchas las aplicaciones donde se hace indispensable el tratamiento de señales que nos proporcionen información sobre fenómenos físicos. En general, este tratamiento es necesario hacerlo sobre grandes cantidades de información y con una elevada velocidad de procesamiento; un computador es el encargado de realizar estas tareas debido a su excelente velocidad de procesamiento sobre cantidades elevadas de información. Comúnmente se utilizan las tarjetas de adquisición de datos, que son las que proporcionan al computador la capacidad de adquirir y generar señales, ya sean analógicas o digitales. Sin embargo, estas no son las únicas funciones de las tarjetas de adquisición; entre otras, también disponen de contadores y temporizadores.

Quando se desea obtener información sobre fenómenos físicos es necesario introducir un nuevo elemento en el sistema que nos suministre un parámetro eléctrico a partir de un parámetro físico, dicho

elemento es el transductor. El transductor es el primer elemento que forma un sistema general de adquisición de señales. Generalmente, las señales eléctricas generadas por los transductores no son adecuadas o no son compatibles con las características de entrada de una tarjeta de adquisición de datos. En estos casos se hace necesario el uso de dispositivos de acondicionamiento de señal que realizan un pre-tratamiento de la misma. Entre otras, las funciones más usuales de los acondicionadores son: amplificación, filtrado, aislamiento eléctrico incluso linealización y multiplexado. La figura 2.1 muestra una configuración general de un sistema basado en la adquisición de datos.

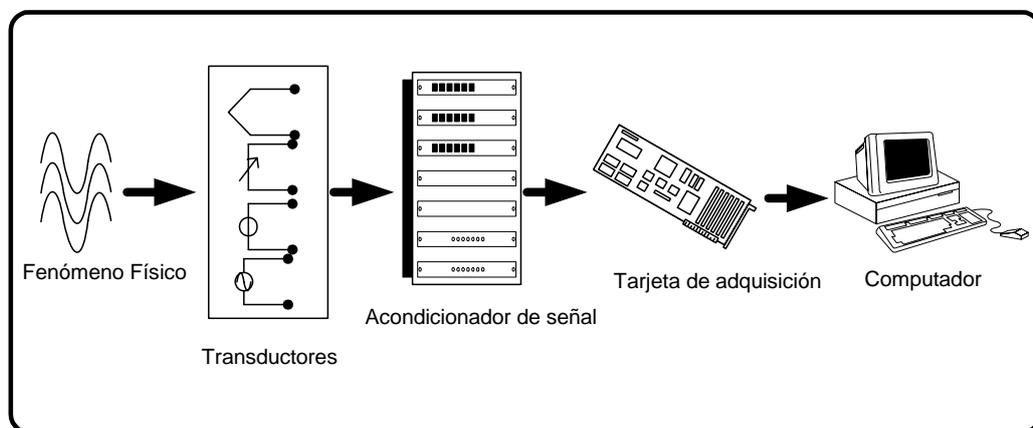


Figura 2.1. Sistema de adquisición de datos

2.1.2. HARDWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS³

El hardware de adquisición de datos puede ser interno, instalado directamente en una ranura de expansión dentro de la computadora o externo, conectado a la computadora a través de un cable de comunicación.

En el nivel más simple, el hardware de adquisición de datos se caracteriza por los *subsistemas* que posee. Un subsistema es un componente del

³ Data AcquisitionToolbox User's Guide – The MathWorks. Págs.: 1-7 a 1-9, 1-14.

hardware de adquisición de datos que ejecuta una tarea especializada. Los subsistemas comunes incluyen.

- ✓ Entrada analógica
- ✓ Salida analógica
- ✓ Entrada/salida digital
- ✓ Contador/temporizador

Los dispositivos de hardware que contienen múltiples subsistemas, se llaman *tarjetas multifunción*.

2.1.2.1. SENSORES

Un sensor convierte el fenómeno físico de interés en una señal que es ingresada al hardware de adquisición de datos. Hay dos tipos principales de sensores basados en el tipo de salida que producen: sensores digitales y sensores analógicos.

Los sensores digitales producen una señal de salida que es una representación digital de la señal de entrada y tiene valores discretos de magnitud medidos en tiempos discretos. Un sensor digital debe tener niveles lógicos de salida que sean compatibles con el receptor digital. Algunos niveles lógicos estándar son: lógica transistor-transistor (TTL) y lógica de emisor acoplado (ECL).

Los sensores analógicos producen una señal de salida que es directamente proporcional a la señal de entrada y es continua en magnitud y tiempo. La mayoría de variables físicas tales como temperatura, presión y aceleración son continuas por naturaleza y se miden fácilmente con un sensor analógico.

2.1.3. SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Independientemente del hardware utilizado, siempre es necesario enviar y recibir información hacia y desde el dispositivo de adquisición de datos. La información que se envía generalmente es de configuración, por ejemplo, la frecuencia de muestreo. La información que se recibe pueden ser datos, mensajes de estado o mensajes de error.

Hay dos tipos de software para adquisición de datos:

- ✓ Software de Control
- ✓ Software de Aplicación

La relación entre el usuario, el software de control y el software de aplicación se muestra en la figura 2.2.

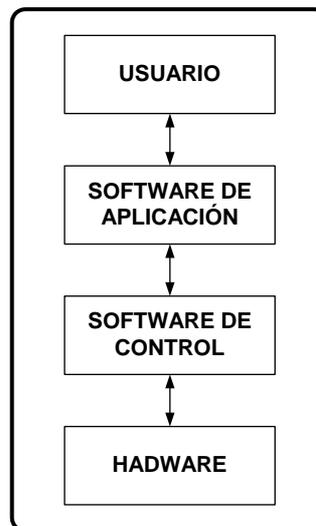


Figura 2.2. Relación entre el software de control y aplicación

2.1.3.1. SOFTWARE DE CONTROL

El software de control permite acceder y controlar las funciones del hardware de adquisición de datos. Entre otras cosas, un software de control básico permite:

- ✓ Enviar y recibir datos desde y hacia la tarjeta de adquisición de datos
- ✓ Controlar la frecuencia a la cual son adquiridos los datos
- ✓ Integrar el hardware con los recursos de la computadora tales como interrupciones del procesador, DMA y memoria
- ✓ Integrar el hardware de adquisición de datos con un hardware de acondicionamiento de señal.
- ✓ Acceder a subsistemas múltiples
- ✓ Acceder a múltiples tarjetas de adquisición de datos

2.1.3.2. SOFTWARE DE APLICACIÓN

El software de aplicación proporciona una conveniente interfase entre el usuario y el software de control. El software de aplicación permite:

- ✓ Reportar información relevante, por ejemplo, el número de muestras adquiridas
- ✓ Generar eventos
- ✓ Manejar los datos almacenados en la memoria de la computadora
- ✓ Acondicionar las señales adquiridas
- ✓ Graficar los datos adquiridos

2.1.4. PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES ⁴

2.1.4.1. SEÑALES Y SISTEMAS

Una **señal** es una descripción de como un parámetro varía con respecto a otro, por ejemplo, el cambio de voltaje en el tiempo en un

⁴ Steven W. Smith – The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Págs.: 35 a 39.

circuito electrónico o la variación de brillo de una imagen con la distancia. Un **sistema** es cualquier proceso que produce una *señal de salida* en respuesta a una señal de entrada.

Los sistemas continuos tienen entradas y salidas continuas, por ejemplo los circuitos electrónicos analógicos. Los sistemas discretos tienen entradas y salidas discretas, por ejemplo, los programas de computadora que manipulan los valores almacenados en la memoria.

2.1.4.2. MUESTREO

El muestreo toma un valor instantáneo de la señal del sensor en tiempos discretos. Para la mayoría de aplicaciones el intervalo entre muestras se mantiene constante (por ejemplo, una muestra cada milisegundo). Generalmente, el muestreo es realizado por un circuito de muestreo y retención (S/H). Un circuito S/H consiste en un amplificador de señal seguido de un interruptor electrónico conectado a un capacitor, la operación de este circuito sigue estos pasos:

- 1) En un instante de tiempo determinado, el interruptor conecta el amplificador y el capacitor a la entrada.
- 2) El capacitor se carga con el voltaje de entrada
- 3) La carga se retiene hasta que el conversor A/D convierte la señal.
- 4) Para canales múltiples conectados (multiplexados) a un convertidor A/D, se repiten los pasos anteriores para cada canal de entrada
- 5) El proceso completo se repite para la siguiente muestra.

2.1.4.3. CUANTIZACIÓN

La señal analógica muestreada debe ser convertida de un valor de voltaje a un número binario que pueda ser leído por la computadora. La conversión de una amplitud de precisión infinita a un número binario se

denomina cuantización. Durante la cuantización, el convertidor A/D usa un número finito de valores uniformemente espaciados para representar a la señal analógica. El número de valores diferentes está determinado por el número de bits usados en la conversión. La figura 2.3 muestra una señal de 1Hz cuantizada por un convertidor A/D de 3 bits.

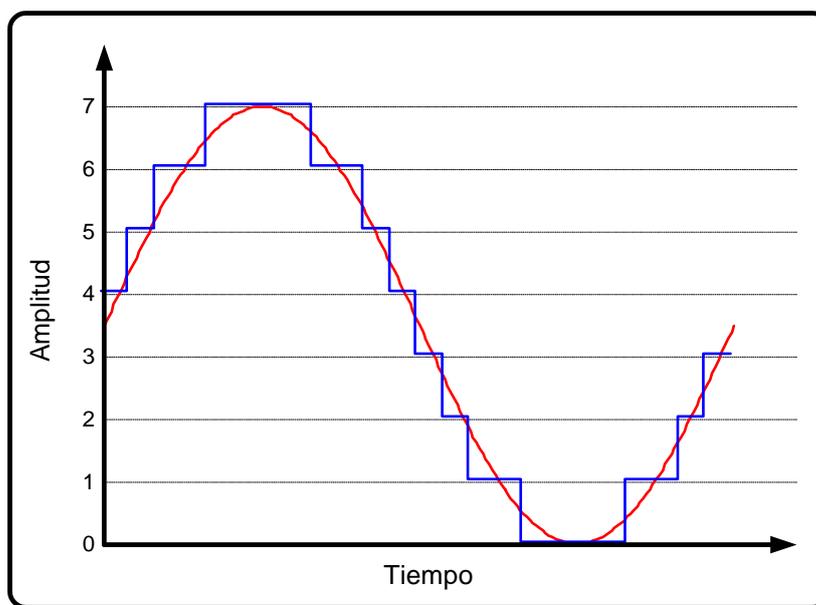


Figura 2.3. Cuantización de una señal con un conversor A/D de 3 bits

2.2. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

2.2.1. DOMINIO DE LA FRECUENCIA Vs. DOMINIO DEL TIEMPO

La forma tradicional de observar una señal es de hacerla en el dominio del tiempo, en el cual se observan registros de la variación de algún parámetro en función del tiempo. Hace aproximadamente un siglo Jean Baptiste Fourier demostró que cualquier forma de onda se puede generar mediante la suma de infinitas ondas senoidales de diferentes frecuencias. Este procedimiento permite hacer una representación alternativa a la del dominio del tiempo: el dominio de la frecuencia.

El hecho de utilizar una forma de representación o la otra depende de los fines que se persigan en el análisis; si se pretende detectar variaciones en la señal de muy pequeña amplitud, es decir, pequeños cambios que puedan aparecer superpuestos a la señal de comportamiento normal, es muy posible que el dominio del tiempo no permita diferenciarlos. Por el contrario un análisis de la señal en el dominio de la frecuencia permite separar las nuevas componentes de pequeña amplitud de aquellas de gran amplitud siempre presentes en la señal. Por este motivo, el análisis espectral o análisis en el dominio de la frecuencia es una de las técnicas más empleadas en el diagnóstico de máquinas, circuitos eléctricos, etc., cuando se pretende obtener una buena resolución para la identificación de anomalías que no alteran en forma considerable las variables en el dominio del tiempo.

En el caso de mantenimiento predictivo de maquinaria eléctrica rotativa los fallos deben ser detectados cuando todavía no presenten una variación significativa de los parámetros de funcionamiento de la máquina, ya que de no ser así, la avería habría alcanzado dimensiones catastróficas en el momento de su localización, retrocediendo, por tanto, al modelo de mantenimiento correctivo. Por este motivo el estudio de las variables en el dominio del tiempo no suele servir.

En la figura 2.4 se ve que algunos eventos que se traslapan y que son confusos en el dominio de tiempo están separados en sus componentes individuales en el dominio de la frecuencia. La forma de onda de vibración contiene una gran cantidad de información que no es aparente. Parte de la información está en las componentes de nivel muy bajo, la magnitud de los que puede ser menos ancho que la línea de la gráfica, de la forma de onda. Pero estos componentes de bajo nivel pueden ser importantes, si son una indicación de un problema que está creciendo, como por ejemplo una falla en un rodamiento. La esencia del mantenimiento predictivo es la detección temprana de faltas incipientes. Por eso hay que ser sensible a valores muy pequeños de señales de vibración. Se ha argumentado que la razón para

el uso generalizado del análisis de frecuencia es la gran disponibilidad del analizador FFT.

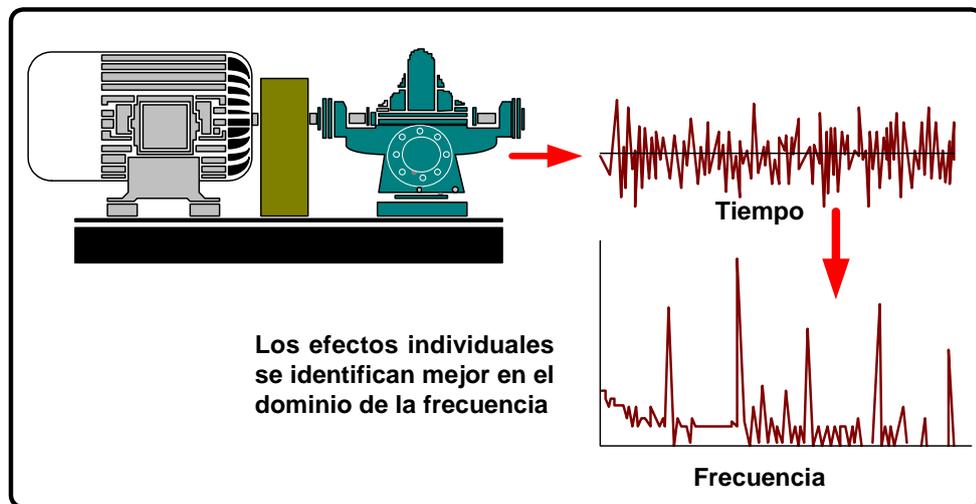


Figura 2.4. Tiempo Vs Frecuencia

Por otra parte, hay circunstancias, donde la forma de onda nos proporciona más información que el espectro, por ejemplo:

- ✓ *Impactos vs Ruido Aleatorio.*- Los impactos pueden ser causados en el caso de motores por rodamientos con elementos rodantes, donde las bolas encuentren una grieta o una pequeña astilla en un anillo de rodamiento. Si hay una gran cantidad de ruido externo, el espectro no tendrá un pico bien definido en la frecuencia del tono del rodamiento, lo que proporciona una mala apreciación del problema.
- ✓ *Truncado o aplastado de la señal.*- En muchos casos de holgura, como en el caso del soporte principal de un rodamiento que se eleva ligeramente durante una parte de la rotación, y después hace contacto con la base durante el resto del ciclo, la forma de onda será aplastada por un lado. Esto resultará en armónicos en el espectro, pero otros tipos de distorsión de la forma de onda también producirán armónicos. La forma de onda proporciona una identificación rápida de este tipo de holgura, donde el movimiento está limitado en una dirección.

- ✓ *Eventos de baja frecuencia.*- En algunos casos, la señal de vibración podrá tener una discontinuidad de vez en cuando. Cuando se transforma en el dominio de la frecuencia, su frecuencia será tan baja que no se podrá ver claramente en el espectro. Un ejemplo de eso es una caja de engranes de baja velocidad, que tiene un diente roto, o cuarteado en el engrane grande.

- ✓ *Pulsos.*- Los Pulsos que ocurren muchas veces en firmas de motores eléctricos y en firmas de vibración general de grupos de máquinas similares, que giran casi a la misma velocidad, se ven difícilmente en el dominio de la frecuencia, porque se necesita un espectro de alta resolución para resolver las dos frecuencias. Si se sospecha la existencia de pulsos, se debe realizar y examinar una larga grabación de la señal de tiempo. Los pulsos aparecerán inmediatamente, si están presentes.

2.2.2. TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

La transformación del dominio del tiempo al de la frecuencia se realiza mediante la transformada de Fourier y su inversa. Dichas transformaciones se pueden definir de la siguiente forma:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.1)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.2)$$

En la ecuación 2.1 se presenta la transformada directa de Fourier de una función en el dominio del tiempo $x(t)$, al dominio de la frecuencia $X(\omega)$, y en la ecuación 2.2 se presenta la transformada inversa. Las ecuaciones

anteriores son válidas tanto para funciones periódicas como para funciones que no lo sean.

La Transformada de Fourier no se presta fácilmente para cálculos en computadoras digitales. Para vencer este impedimento, se desarrolló la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Probablemente la primera persona que concibió la DFT fue Wilhelm Friedrich Gauss, el famoso matemático alemán, del siglo XIX, aunque por cierto él no tenía una computadora digital en la que podría implementarla. La DFT opera con una señal de muestras —o discreta— en el dominio del tiempo. A partir de esta se genera un espectro de muestras -o discreto- en el dominio de la frecuencia. El espectro que resulta es una aproximación de la Serie de Fourier, una aproximación en el sentido que se perdió la información entre las muestras de la forma de onda. La clave hacia la DFT es la existencia de una forma de onda de la que se tomaron muestras, esto es la posibilidad de representar la forma de onda como un conjunto de números.

Para generar este conjunto de números desde una señal analógica, se requiere un procedimiento de muestreo, y de conversión de analógico a digital. La señal de la que se tomaron muestras es una representación matemática del nivel de la señal instantánea a intervalos definidos con precisión. No contiene información acerca de la señal entre los tiempos en que se tomaron muestras.

Si la proporción de muestreo es lo suficientemente alta como para asegurar una representación razonable de la forma de la señal, la DFT produce un espectro que es muy similar a un espectro teóricamente verdadero. Este espectro también es discreto, y no hay información entre las muestras o "líneas" de espectro. En teoría, no hay límite al número de muestras que se puedan usar, o a la velocidad del muestreo, pero hay limitaciones prácticas que debemos observar. La mayoría de esas limitaciones son el resultado de usar una computadora digital como agente calculador.

La DFT se calcula con la siguiente expresión matemática.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j k \Omega n} \quad (2.3)$$

Donde, N es el número de muestras, $x[n]$ es la señal en el dominio del tiempo, $\Omega = \frac{2\pi}{N}$.

La evaluación directa de esta expresión requiere de N^2 multiplicaciones con números complejos.

2.2.3. FUNDAMENTOS DE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

La transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) es un algoritmo para el cálculo aproximado de la transformada discreta de Fourier. Antes del desarrollo de la FFT el tiempo necesario para el cálculo de la DFT era muy grande, especialmente en el caso de necesitar una elevada resolución, o lo que es lo mismo un elevado número de muestras. Por este motivo se diseñó la FFT, la cual empleando como suposición que el número de muestras N es una potencia de 2, permite aplicar ciertas propiedades de simetría que reducen considerablemente el número de operaciones matemáticas a realizar.

La mayoría de los analizadores FFT permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis FFT depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.

2.2.4. LIMITACIONES DE LA FFT

- ✓ El primer hecho que se debe tener en cuenta respecto al cálculo de la transformada de Fourier es el muestreo de la señal: una vez que se han convertido las señales inicialmente continuas en señales discretas, ya no se podrá realizar una representación completamente exacta en ninguno de los dos dominios. La solución a este problema consiste en obtener un número de muestras lo bastante elevado, así se definirá un registro de tiempo como N muestras consecutivas e igualmente espaciadas de la señal de entrada.

- ✓ La frecuencia de muestreo del convertidor analógico/digital (A/D) será crucial para poder obtener una transformada de Fourier correcta, quedando establecido un valor máximo para el tiempo de muestreo y retención de la señal por parte del conversor A/D. Por encima de ese tiempo se producen los fenómenos de *aliasing*. La mínima frecuencia de muestreo que debe utilizarse queda determinada por el *criterio de Nyquist*, según el cual es necesario tomar muestras con una frecuencia superior a dos veces la máxima frecuencia de la señal de entrada.

- ✓ Existe una característica adicional de la FFT que afecta a su utilización para el análisis de señales en el dominio de la frecuencia. El algoritmo de la FFT está basado en la presunción de que el registro de tiempo se repite fuera del tiempo representado en él. Si el registro de tiempo contiene un número de ciclos de la señal de entrada, la afirmación anterior es cierta. Se dice en este caso que la señal es *periódica en el tiempo de registro*. Si por el contrario la señal no cumple la condición anterior se estará suponiendo una representación que nada tiene que ver con la señal aplicada al equipo de medida. Este fenómeno se estudia profundamente en el apartado 2.2.5.

2.2.5. MÉTODOS DE VENTANEO⁵

La *fuga espectral* es un fenómeno en el cual la energía de una frecuencia aparece desplazada hacia otras frecuencias. En aplicaciones prácticas de señales muestreadas se puede obtener sólo un registro finito de la señal. Desafortunadamente, para los sistemas de tiempo discreto, un registro finito de muestras resulta en una forma de onda troncada con características espectrales diferentes a las de la señal en tiempo continuo. Estas discontinuidades producen una *fuga* de la información espectral, el resultado es un espectro en tiempo discreto que es una versión distorsionada de la señal original en tiempo continuo.

Cuando se utiliza la DFT/FFT para encontrar el contenido de frecuencia de una señal, se asume que los datos corresponden a un periodo de una forma de onda periódica, como se muestra en la figura 2.5. La forma de onda correspondiente al periodo muestreado se repite para obtener una forma de onda periódica

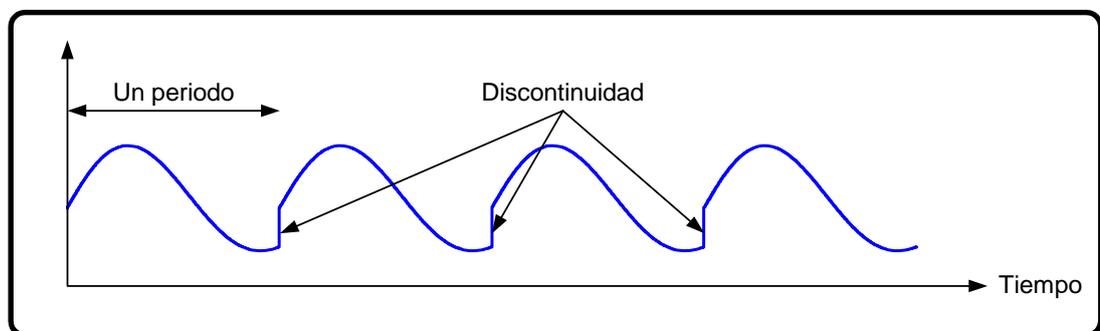


Figura 2.5 Forma de onda periódica creada de un periodo muestreado

La figura 2.6 muestra una onda senoidal y su correspondiente transformada de Fourier. En (a) se indica la forma de onda muestreada en el dominio del tiempo, en (b) se muestra la forma de onda periódica creada a partir de la forma de onda muestreada y en (c) se tiene la representación espectral. Debido a que la forma de onda en (a) no tiene discontinuidades, ya que se

⁵ LabVIEW Analysis Concepts – National Instruments – Abril del 2003. Págs.: 5-1 a 5-11.

ha muestreado un número entero de ciclos (1 ciclo), su espectro es una sola línea que señala la frecuencia de la onda senoidal.

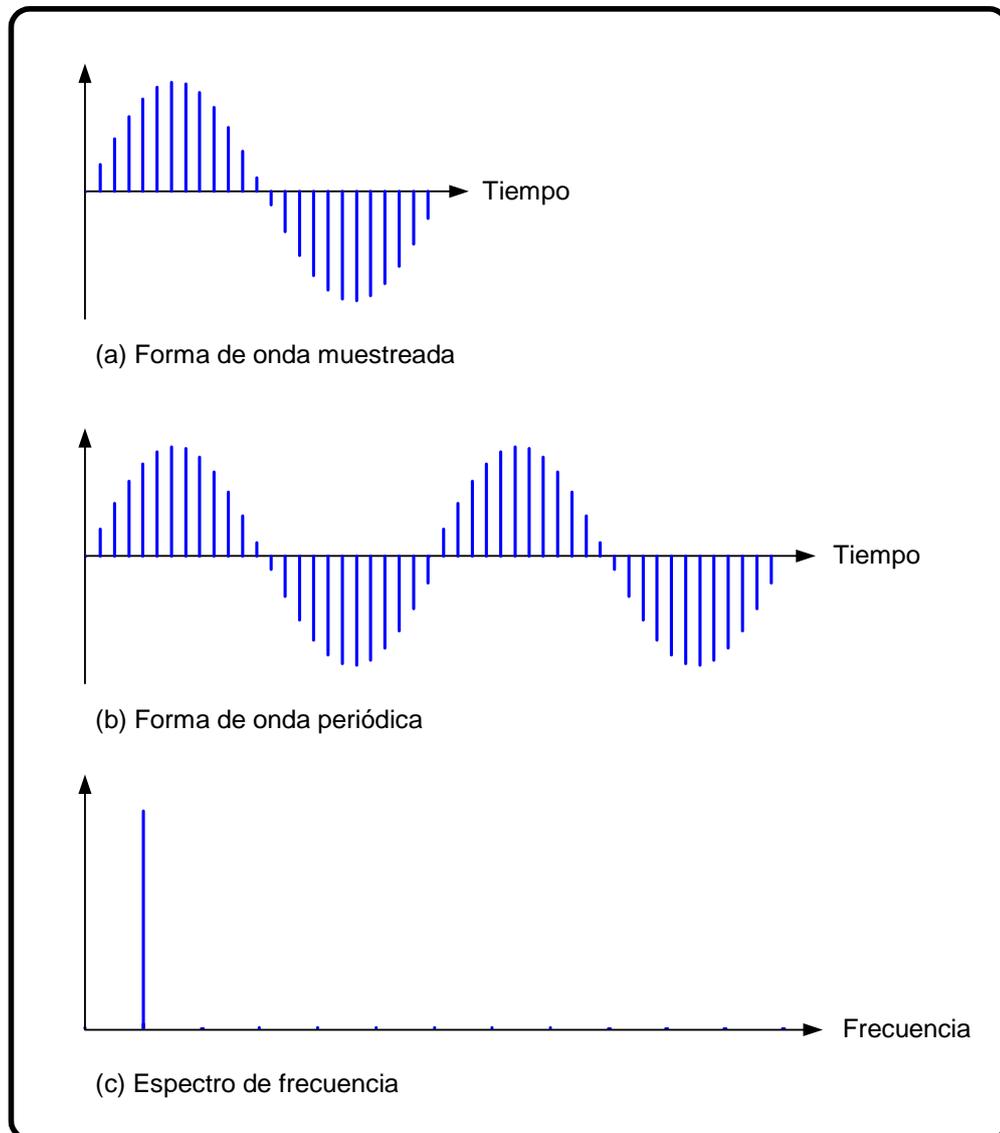


Figura 2.6. Onda senoidal y su representación espectral

Si no se muestrea un número entero de ciclos aparecen discontinuidades entre periodos sucesivos. Estas discontinuidades *artificiales* aparecen como altas frecuencias en el espectro de la señal, que no están presentes en la señal original. La energía de las componentes de frecuencia aparece desplazada hacia otras frecuencias. Este fenómeno se conoce como Fuga Espectral.

La figura 2.7 muestra la representación espectral cuando no se muestrea un número entero de ciclos. En (a) se tienen 1.25 ciclos de una onda senoidal. En (b) la forma de onda ha sido repetida periódicamente, como resultado la forma de onda periódica contiene discontinuidades. En (c) se muestra el espectro de frecuencia. Nótese que la energía está dispersa en todo el rango de frecuencias.

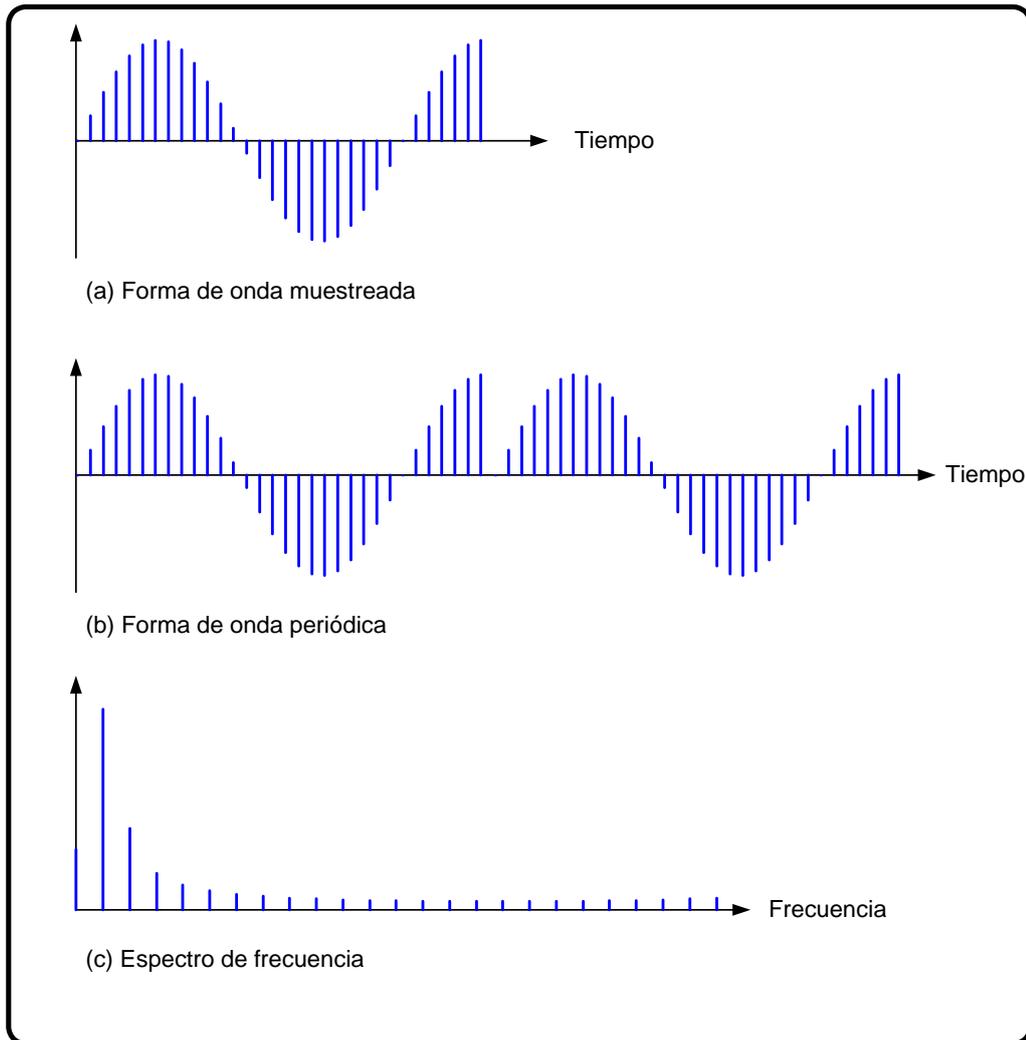


Figura 2.7. Representación espectral cuando se muestrea un número no integral de ciclos

La fuga espectral existe a causa de la característica finita del registro de tiempo de la señal de entrada. Una solución para superar este problema es tomar un registro de tiempo infinito, la FFT debería calcular una sola línea a la frecuencia correcta, sin embargo, en la práctica no es posible tomar un

registro de tiempo infinito. Para superar las limitaciones de un registro de tiempo finito se utiliza el ventaneo.

2.2.5.1. USO DE VENTANAS PARA PREVENIR LA FUGA ESPECTRAL

Una forma simple de mejorar las características espectrales de una señal muestreada es aplicar ventanas suavizadoras. Cuando se realiza un análisis espectral o de Fourier de datos de longitud finita, se pueden usar ventanas para minimizar los bordes de transición de formas de onda truncadas, así se reduce la fuga espectral.

La cantidad de fuga espectral depende de la amplitud de la discontinuidad. A mayor discontinuidad, mayor fuga y viceversa. Se puede usar el ventaneo para reducir la amplitud de las discontinuidades en los límites de cada periodo. El ventaneo consiste en multiplicar el registro de tiempo por una ventana de longitud finita cuya amplitud varía suave y gradualmente hasta cero en los bordes. En la figura 2.8, la señal original es ventaneada utilizando la ventana Hamming. Nótese que la forma de onda de la señal ventaneada se reduce gradualmente a cero en los extremos minimizando los bordes de transición. Por lo tanto, una función ventana aplicada a los datos, antes de que sea transformada al dominio de la frecuencia, reduce la fuga espectral.

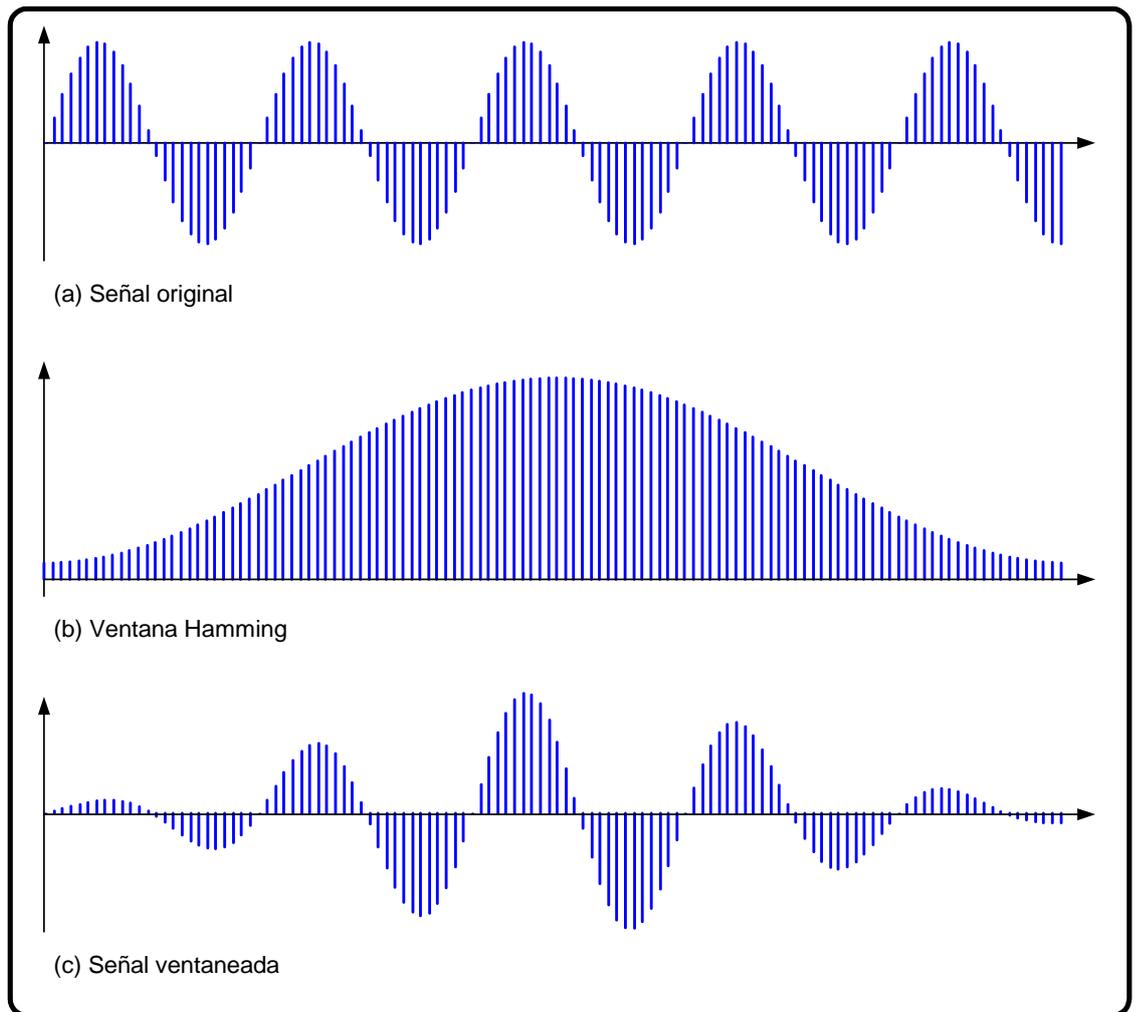


Figura 2.8. Señal en el tiempo ventaneada utilizando una ventana Hamming

2.2.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE FUNCIONES VENTANA

El ventaneo de una señal en el dominio del tiempo es equivalente a multiplicar la señal por la función ventana. La multiplicación en el dominio del tiempo es equivalente a la convolución en el dominio de la frecuencia. Es decir, el espectro de la señal ventaneada es la convolución entre el espectro de la señal original y el espectro de la ventana.

2.2.5.3. VENTANA RECTANGULAR

La ventana rectangular tiene un valor de uno en todos sus puntos. La siguiente ecuación define la ventana rectangular.

$$w[n] = 1.0 \quad (2.4)$$

Para $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

Donde N es la longitud de la ventana y w es la función ventana. Aplicar la ventana rectangular es equivalente a no usar ninguna ventana porque la función rectangular solo trunca la señal a un intervalo finito de tiempo. La ventana rectangular tiene la mayor cantidad de fuga espectral.

La figura 2.9 muestra una ventana rectangular para $N = 32$.

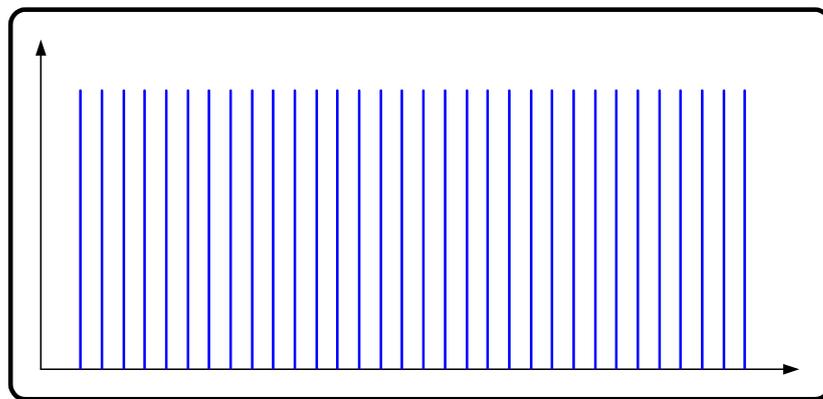


Figura 2.9. Ventana Rectangular

La ventana rectangular es útil para analizar transitorios que tienen una duración más corta que la ventana.

2.2.5.4. VENTANA HANNING

La ventana Hanning tiene una forma similar a la de un medio ciclo de una onda coseno. La siguiente ecuación define la ventana Hanning.

$$w[n] = 0.5 - 0.5 \cos \frac{2\pi n}{N} \quad (2.5)$$

Para $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

Donde N es la longitud de la ventana y w es la función ventana.

La figura 2.10. muestra una ventana Hanning con $N = 32$.

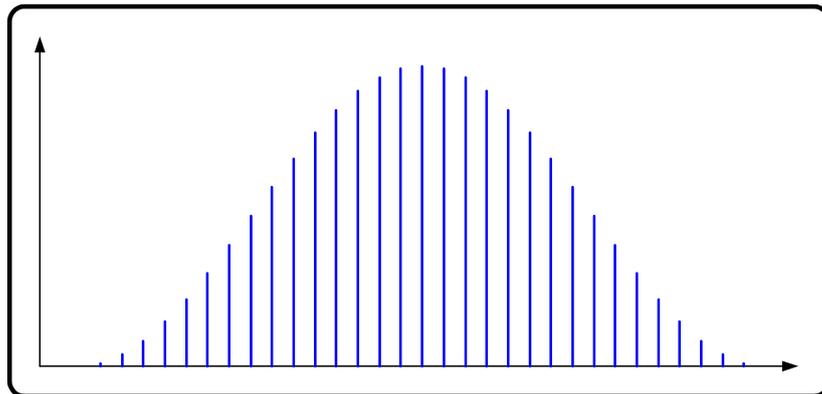


Figura 2.10. Ventana Hanning

La ventana Hanning es útil para analizar transitorios de duración mayor a la de la ventana y para aplicaciones de propósito general.

2.2.5.5. VENTANA HAMMING

La ventana Hamming es una versión modificada de la ventana Hanning.

La forma de la ventana Hamming es similar a una onda coseno. La siguiente ecuación define la ventana Hamming.

$$w[n] = 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi n}{N} \quad (2.6)$$

Para $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

Donde N es la longitud de la ventana y w es la función ventana.

La figura 2.11. muestra la ventana Hamming con $N = 32$

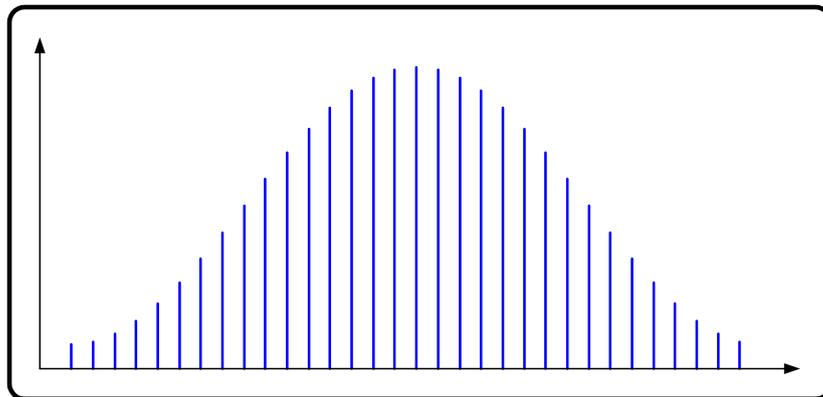


Figura 2.11. Ventana Hamming

2.2.5.6. VENTANA TRIANGULAR

La forma de una ventana triangular es la de un triángulo. La siguiente ecuación define la ventana triangular.

$$w[n] = 1 - \left| \frac{2n - N}{N} \right| \quad (2.7)$$

Para $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

Donde N es la longitud de la ventana y w es la función ventana.

La figura 2.12 muestra una ventana triangular con $N = 32$

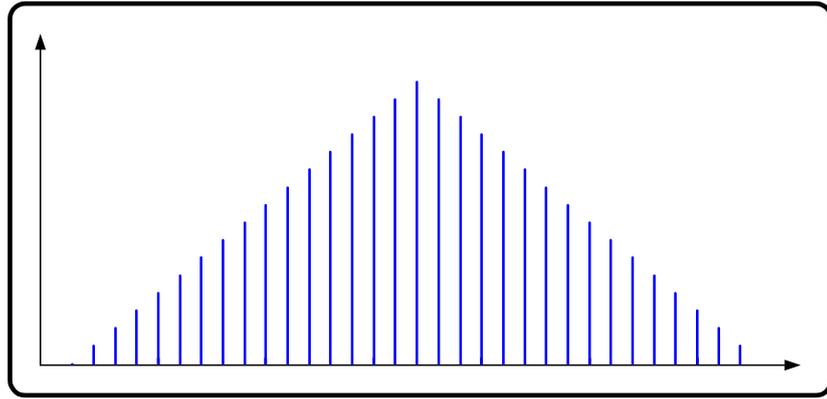


Figura 2.12. Ventana triangular

2.2.5.7. VENTANA FLAT TOP

La ventana flat top tiene la mejor exactitud de amplitud de todas las funciones ventana. Sin embargo ese incremento en la exactitud se logra a expensas de una reducción de la selectividad de frecuencia. La siguiente ecuación define la ventana flat top.

$$w[n] = \sum_{k=0}^4 (-1)^k a_k \cos k\omega \quad (2.8)$$

Donde

$$\omega = \frac{2\pi n}{N}$$

$$a_0 = 0.215578948$$

$$a_1 = 0.416631580$$

$$a_2 = 0.277263158$$

$$a_3 = 0.083578947$$

$$a_4 = 0.006947368$$

La figura 2.13. muestra una ventana flat top.

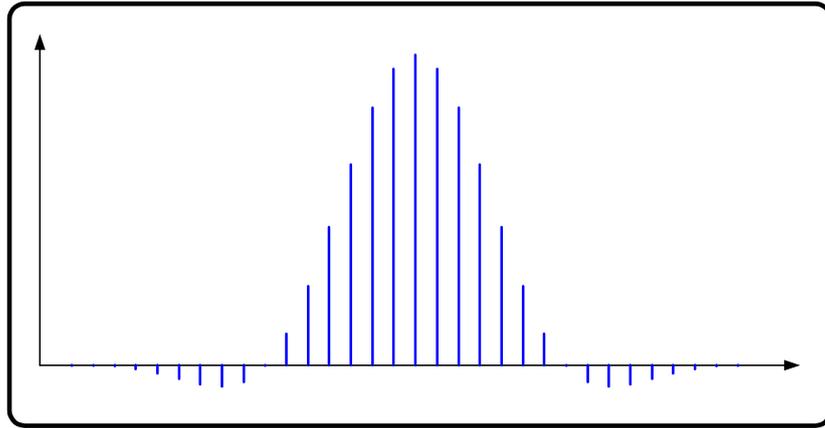


Figura 2.13. Ventana Flat Top

La ventana flat top es muy útil en mediciones exactas de amplitud en señales con poca energía espectral adyacente.

CAPÍTULO III

DISPOSITIVOS E INTERFASES PARA ADQUISICIÓN DE DATOS

3.1. EI PIC18F452⁶

3.1.1. ARQUITECTURA

3.1.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CPU

- ✓ Memoria de programa lineal, con capacidad de 32 Kbytes.
- ✓ Memoria de datos lineal
 - Memoria disponible para el usuario: 1.5 Kbytes.
 - Registros de función específica (SFRs): 128 bytes.
- ✓ Frecuencia del oscilador:
 - 0 – 40 MHz (operación normal)
 - 4 MHz – 10 MHz (con PLL activo)
- ✓ Instrucciones de 16 bits de longitud, 8 bits en el bus de datos.
- ✓ Niveles de prioridad para interrupciones.
- ✓ 18 fuentes de interrupción.
 - 3 interrupciones externas.
 - 1 interrupción por cambio en las líneas RB7:RB4.
 - 4 interrupciones por desbordamiento de temporizadores.
 - 1 interrupción por fin de conversión A/D
 - 1 interrupción por fin de escritura en la EEPROM de datos.
 - 2 interrupciones por evento CCP.
 - 1 interrupción por módulo MSSP.

⁶ PIC18FXX2 Data Sheet – 2002 Microchip Technology Inc. Págs.: 1, 3, 35-49, 117-119.

- 1 interrupción por colisión de bus I²C ó SPI.
 - 1 interrupción por módulo PSP (Puerto Esclavo Paralelo).
 - 2 interrupciones por módulo USART (transmisión y recepción).
 - 1 interrupción por detección de bajo voltaje.
- ✓ Hardware multiplicador 8×8 bits en un solo ciclo de instrucción.

3.1.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS PERIFÉRICOS

- ✓ Líneas de entrada/salida de alta corriente: 25mA por cada línea.
- ✓ Tres líneas para interrupción externa.
- ✓ Módulo Timer0: contador/temporizador de 8 bits/16 bits.
- ✓ Módulo Timer1: contador/temporizador de 16 bits.
- ✓ Módulo Timer2: contador/temporizador de 8 bits.
- ✓ Módulo Timer3: contador/temporizador de 16 bits.
- ✓ Dos módulos de Captura/Comparación/PWM (CCP)
- ✓ Puerto Serial Sincrónico Maestro (MSSP), soporta dos modos de operación: SPI de 3 hilos e I²C.
- ✓ Módulo USART, soporta: RS-485 y RS-232.
- ✓ Puerto Esclavo Paralelo (PSP).

3.1.1.3. CARACTERÍSTICAS ANALÓGICAS

- ✓ Conversor analógico a digital (A/D) de 10 bits:
 - Alta velocidad de muestreo.
 - Conversión disponible en modo de bajo consumo (SLEEP).
 - Linealidad $\leq 1\text{LSb}$
- ✓ Detección Programable de Bajo Voltaje (PLVD), con soporte de interrupción.
- ✓ Reset por Bajo Voltaje programable (BOR).

3.1.1.4. CONFIGURACIONES DEL OSCILADOR

El PIC16F452 puede operar en ocho diferentes modos de oscilador:

- 1) LP Cristal de baja potencia.
- 2) XT Cristal Oscilador/Resonador.
- 3) HS Cristal Oscilador/Resonador de alta velocidad.
- 4) HS + PLL Cristal Oscilador/Resonador de alta velocidad con PLL habilitado.
- 5) RS Resistor/Capacitor externo.
- 6) RCIO Resistor/Capacitor interno con pin de entrada/salida habilitado.
- 7) EC Reloj externo.
- 8) ECIO Reloj externo con pin de entrada/salida habilitado.

3.1.1.5. DIAGRAMA DE PINES.

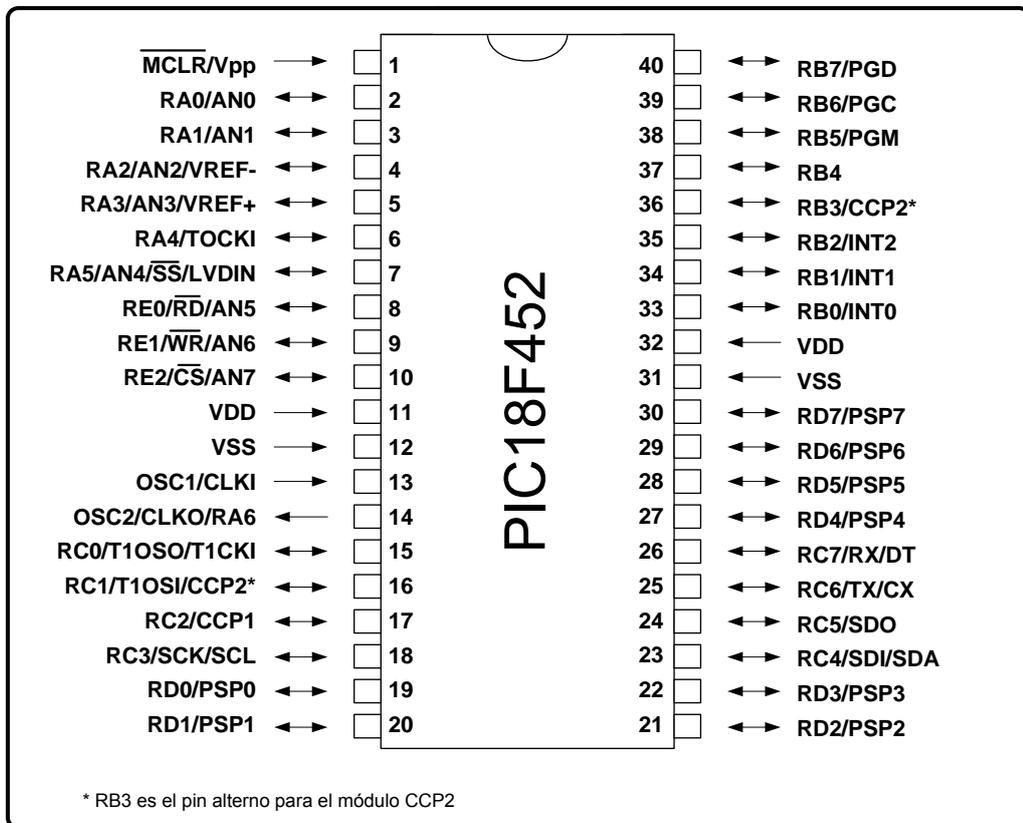


Figura 3.1. Diagrama de pines

3.1.2. ORGANIZACIÓN DE MEMORIA

En el PIC18F452 existen tres bloques de memoria:

- ✓ Memoria de Programa
- ✓ Memoria de Datos
- ✓ EEPROM de Datos

La memoria de Datos y de Programa utilizan buses separados (Arquitectura Harvard) que permiten acceder simultáneamente a cada bloque.

3.1.2.1. MEMORIA DE PROGRAMA

El contador de programa de 21 bits es capaz de direccionar 2 Mbyte de memoria de programa, sin embargo el PIC18F452 tiene 32 Kbytes de memoria FLASH de programa.

El vector de RESET está en la dirección 0000h y los vectores de interrupción están en las direcciones 0008h y 0018h. La *pila de dirección de retorno* permite una combinación de hasta 31 llamadas a subrutinas e interrupciones. El PC (Contador de Programa) es cargado en la pila cuando se ejecuta una instrucción CALL o RCALL, o cuando se produce una interrupción. El valor del PC se restablece con una instrucción RETURN, RETLW o RETFIE.

La figura 3.2 muestra el Mapa de Memoria de Programa y la Pila de Retorno.

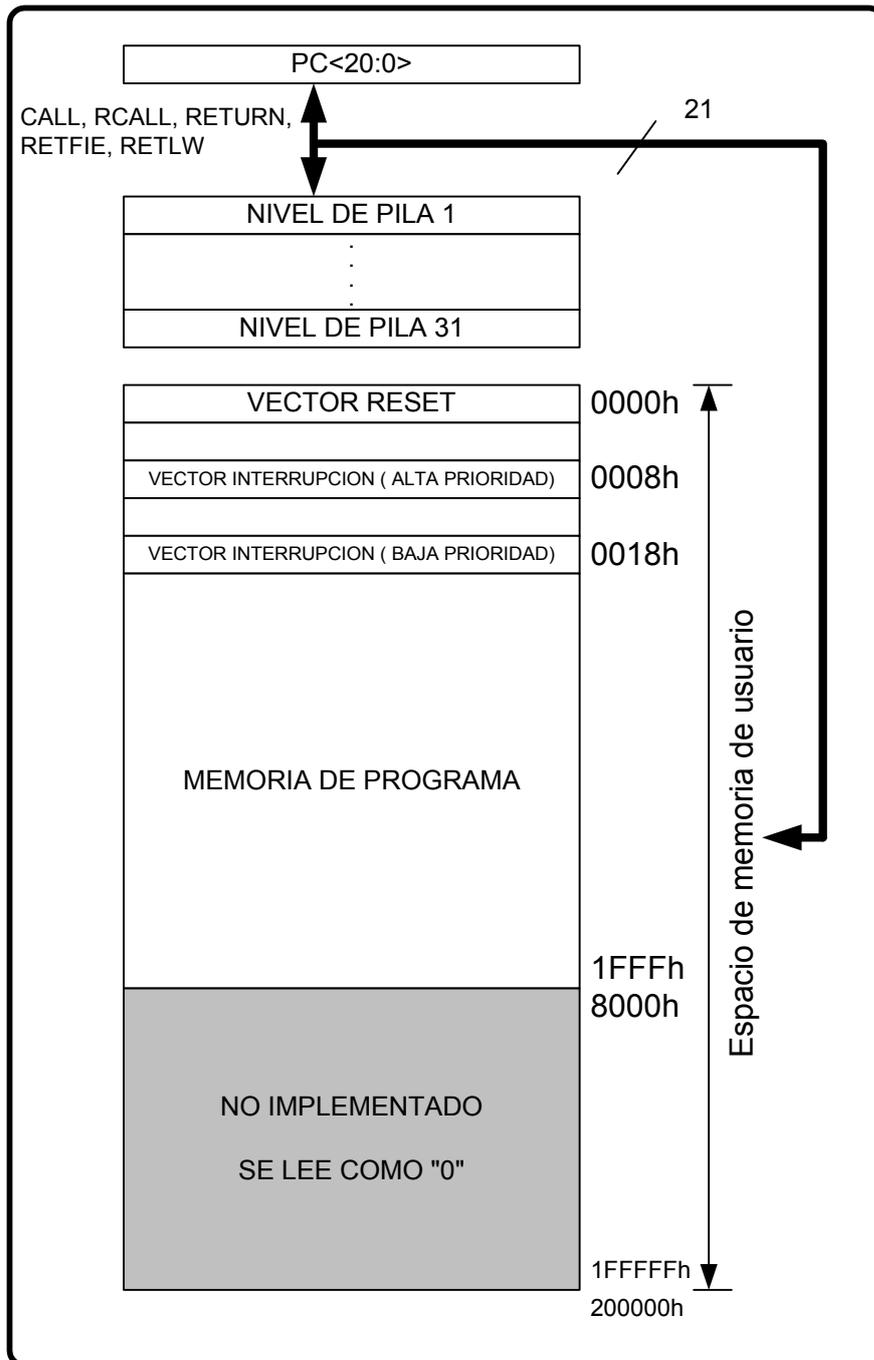


Figura 3.2. Mapa de memoria de programa del PIC18F452

3.1.2.2. MEMORIA DE DATOS

La memoria de datos está implementada como RAM estática. Cada registro tiene una dirección de 12 bits que permite hasta 4096 bytes de memoria de datos.

La memoria de datos se divide en 16 bancos que contienen 256 bytes cada uno. Los 4 bits menos significativos del registro BSR se utilizan para seleccionar el banco, los 4 bits más significativos no están implementados

La memoria de datos contiene Registros de Función Especial (SFR) y Registros de Propósito General (GPR). Los SFRs se utilizan para el control del procesador y de las funciones periféricas, mientras que los GPRs se utilizan para almacenar datos y realizar operaciones en el programa de aplicación del usuario. Los SFRs se ubican en el banco 15 en las localidades F80h – FFFh.

Se puede acceder a cualquier localidad de la memoria de datos mediante direccionamiento directo o indirecto. El direccionamiento directo requiere del registro BSR. El direccionamiento indirecto requiere del registro FSRn y su correspondiente operando indirecto INDFn. Cada FSR contiene una dirección de 12 bits que se utiliza para acceder a cualquier localidad en la memoria de datos sin utilizar los bancos.

Para asegurar el acceso, en un solo ciclo de máquina, a los registros más comunes (SFRs y determinados GPRs) sin importar el valor del registro BSR, se ha implementado un Banco de Acceso conformado por un segmento del Banco 0 y un segmento del Banco 15.

3.1.2.3. MEMORIA EEPROM DE DATOS

La EEPROM de datos es de lectura y escritura durante la operación normal del microcontrolador. Esta memoria no está implementada directamente en el espacio de los registros, por esta razón se accede con direccionamiento indirecto utilizando Registros de Función Específica (SFRs).

Hay cuatro registros utilizados para leer y escribir la memoria de programa y la EEPROM de datos:

- ✓ EECON1
- ✓ EECON2
- ✓ EEDATA
- ✓ EEADR

El registro EEDATA contiene el dato de 8 bits y EEADR contiene la dirección de la EEPROM a la que se quiere acceder. El PIC18F452 tiene 256 bytes de memoria EEPROM con un rango de direcciones desde 00h hasta FFh.

3.1.3. PUERTOS DE ENTRADA/SALIDA

El PIC18F452 tiene cinco puertos de entrada/salida. Algunas líneas de los puertos están multiplexadas con una función alterna de los periféricos del dispositivo. Cuando un periférico está habilitado no puede usarse esa línea para propósito general.

Cada puerto tiene tres registros para su operación. Estos registros son:

TRIS: registro de dirección de datos

PORT: registro que lee los niveles de los pines del dispositivo

LAT: registro de salida.

3.1.3.1. EL PUERTO A

El registro PORTA es un puerto bidireccional de 7 bits de longitud. TRISA es el registro de dirección de datos. Al fijar en "1" un bit del registro TRISA el pin correspondiente de PORTA se configura como entrada (el driver de salida se pone en estado de alta impedancia), al fijar en "0" un bit del

registro TRISA el pin correspondiente de PORTA se configura como salida. El registro LATA se utiliza para leer y escribir los valores de salida del registro PORTA.

El pin RA4 está multiplexado con la entrada de reloj del módulo Timer0, por eso se denomina como RA4/T0CKI. Este pin es una entrada Schmitt Trigger y una salida a drenador abierto. Todos los demás pines RA tienen niveles de entrada TTL y drivers de salida CMOS, además están multiplexados con las entradas analógicas y las entradas de referencia VREF+ y VREF- del módulo ADC.

Nombre	Bit#	Buffer	Función
RA0/AN0	bit0	TTL	Pin de entrada/salida ó entrada analógica
RA1/AN1	bit1	TTL	Pin de entrada/salida ó entrada analógica
RA2/AN2/VREF-	bit2	TTL	Pin de entrada/salida, entrada analógica ó entrada de VREF-.
RA3/AN3/VREF+	bit3	TTL	Pin de entrada/salida, entrada analógica ó entrada de VREF+
RA4/T0CKI	bit4	ST	Pin de entrada/salida ó entrada de reloj externo para el Timer0, salida a drenador abierto.
$\overline{\text{RA5/SS}}$ /AN4/LVDIN	bit5	TTL	Pin de entrada/salida, entrada para selección de esclavo para el puerto serial sincrónico, entrada analógica ó entrada para detección de bajo voltaje
OSC2/CLKO/RA6	bit6	TTL	OSC2 o entrada de reloj ó pin de entrada/salida

TTL = entrada TTL, ST = entrada Schmitt Trigger

Tabla 3.1. Funciones del Puerto A

3.1.3.2. EL PUERTO B

El registro PORTB es un puerto bidireccional de 8 bits de longitud. Los registros TRISB y LATB tienen las mismas funciones que los registros TRISA y LATA del puerto A, respectivamente.

Todos los pines del Puerto B tienen una ligera polarización (pull-up) que puede ser activada fijando en "0" el bit $\overline{\text{RBPU}}$ (INTCON<7>). Los pull-up se desactivan automáticamente si el pin se configura como salida.

Cuatro pines del Puerto B, RB7:RB4, tienen la característica de interrupción por cambio. Los valores de los pines RB7:RB4 son comparados con el valor anterior almacenado en la última lectura al puerto, cualquier diferencia genera la Interrupción por Cambio en el Puerto B y fijan el bit bandera RBIF (INTCON<7>). Sólo los pines configurados como entradas pueden provocar esta interrupción.

Nombre	Bit#	Buffer	Funciones
RB0/INT0	bit0	TTL/ST	Pin de entrada/salida ó entrada de Interrupción Externa 0, pull-up programable
RB1/INT1	bit1	TTL/ST	Pin de entrada/salida ó entrada de Interrupción Externa 1, pull-up programable
RB2/INT2	bit2	TTL/ST	Pin de entrada/salida ó entrada de Interrupción Externa 2, pull-up programable
RB3/CCP2	bit3	TTL/ST	Pin de entrada/salida, entrada Captura2, salida Comparación2 ó salida PWM, pull-up programable
RB4	bit4	TTL	Pin de entrada/salida (con interrupción por cambio), pull-up programable
RB5/PGM	bit5	TTL/ST	Pin de entrada/salida (con interrupción por cambio), pull-up programable, habilitación de programación ICSP de bajo voltaje
RB6/PGC	bit6	TTL/ST	Pin de entrada/salida (con interrupción por cambio), pull-up programable, reloj de programación serie.
RB7/PGD	bit7	TTL/ST	Pin de entrada/salida (con interrupción por cambio), pull-up programable, línea de datos de programación serie.

TTL = entrada TTL, ST = entrada Schmitt Trigger

Tabla 3.2. Funciones del Puerto B

3.1.3.3. EL PUERTO C

El registro PORTC es un puerto bidireccional de 8 bits de longitud, TRISC y LATBC tienen las mismas funciones que los registros correspondientes de los puertos A y B.

El puerto C está multiplexado con varias funciones periféricas y tiene entradas Schmitt Trigger. Cuando se habilitan las funciones periféricas se debe tener cuidado en la definición de los bits del registro TRISC para cada pin del puerto C. Algunos periféricos anulan los bits del TRISC para configurar los pines como entradas o salidas, según corresponda.

Nombre	Bit#	Buffer	Funciones
RC0/T1OSO/T1CKI	bit0	ST	Pin de entrada/salida, salida de oscilador Timer1, entrada de reloj Timer1.
RC1/T1OSI/CCP2	bit1	ST	Pin de entrada/salida, entrada de oscilador Timer1, entrada Captura1, salida Comparación1 ó salida PWM1.
RC2/CCP1	bit2	ST	Pin de entrada/salida ó entrada de Interrupción Externa 2, pull-up programable
RC3/SCK/SCL	bit3	ST	Pin de entrada/salida, reloj sincrónico para los modos I ² C y SPI.
RC4/SDI/SDA	bit4	ST	Pin de entrada/salida, entrada de datos modo SPI, E/S de datos modo I ² C.
RC5/SDO	bit5	ST	Pin de entrada/salida, salida de datos del puerto serial sincrónico.
RC6/TX/CK	bit6	ST	Pin de entrada/salida, salida de datos transmisión asincrónica, reloj de transmisión sincrónica.
RC7/RX/DT	bit7	ST	Pin de entrada/salida, entrada de datos transmisión asincrónica, datos de transmisión sincrónica.

ST = entrada Schmitt Trigger

Tabla 3.3. Funciones del Puerto C

3.1.3.4. EL PUERTO D

El registro PORTD es un puerto bidireccional de 8 bits de longitud. Puede ser configurado como un puerto de microprocesador de 8 bits de longitud (Puerto Esclavo Paralelo) fijando en "1" el bit de control PSPMODE (TRISE<4>).

Nombre	Bit#	Buffer	Funciones
RD0/PSP0	bit0	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó bit0 del Puerto Esclavo Paralelo
RD1/PSP1	bit1	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó bit1 del Puerto Esclavo Paralelo
RD2/PSP2	bit2	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó bit2 del Puerto Esclavo Paralelo
RD3/PSP3	bit3	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó bit3 del Puerto Esclavo Paralelo
RD4/PSP4	bit4	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó bit4 del Puerto Esclavo Paralelo
RD5/PSP5	bit5	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó bit5 del Puerto Esclavo Paralelo
RD6/PSP6	bit6	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó bit6 del Puerto Esclavo Paralelo
RD7/PSP7	bit7	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó bit7 del Puerto Esclavo Paralelo

TTL = entrada TTL, ST = entrada Schmitt Trigger

Tabla 3.4. Funciones del Puerto D

3.1.3.5. EL PUERTO E

El registro PORTE es un puerto bidireccional de 3 bits de longitud. Los pines del puerto E están multiplexados con entradas analógicas del conversor A/D.

Nombre	Bit#	Buffer	Funciones
$\overline{\text{RE0}}/\text{RD}/\text{AN5}$	bit0	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó control de lectura en el Puerto Esclavo Paralelo.
$\overline{\text{RE1}}/\text{WR}/\text{AN6}$	bit1	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó control de escritura en el Puerto Esclavo Paralelo.
$\overline{\text{RE2}}/\text{CS}/\text{AN7}$	bit2	ST/TTL	Pin de entrada/salida ó selección de dispositivo en el Puerto Esclavo Paralelo.

TTL = entrada TTL, ST = entrada Schmitt Trigger

Tabla 3.5. Funciones del Puerto E

3.1.4. MÓDULOS ESPECIALES

3.1.4.1. MÓDULO TIMER1

El módulo contador/temporizador Timer1 tiene las siguientes funciones:

- ✓ Contador/temporizador de 16 bits (dos registro de 8 bits; TMR1H y TMR1L)
- ✓ Registros de lectura y escritura
- ✓ Reloj interno ó externo seleccionable
- ✓ Interrupción por desbordamiento de FFFFh a 0000h
- ✓ RESET desde el módulo CCP por disparo de evento especial.

T1CON: REGISTRO DE CONTROL DEL TIMER1							
RD16	—	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	$\overline{T1SYNC}$	TMR1CS	TMR1ON
bit 7							bit 0

bit 7 **RD16:** Bit de habilitación del modo de Lectura/Escritura de 16 bits

bit 6 **No implementado:** Se lee como "0"

bit 5-4 **T1CKPS1:T1CKPS0:** Bits de selección de pre escala del reloj de entrada

bit 3 **T1OSCEN:** Bit de habilitación de oscilador

bit 2 **T1SYNC:** Bit de selección de sincronización del reloj interno

bit 1 **TMR1CS:** Bit de selección de la fuente de reloj

bit 0 **TMR1ON:** Bit de activación del Timer1

Tabla 3.6. Registro de control del TIMER1

3.1.4.2. MÓDULO TIMER3

El módulo contador/temporizador Timer3 es similar al Timer1 y utiliza los registros TMR3H, TMR3L y T3CON:

T3CON: REGISTRO DE CONTROL DEL TIMER3							
RD16	T3CCP2	T3CKPS1	T3CKPS0	T3CCP0	$\overline{\text{T3SYNC}}$	TMR3CS	TMR3ON
bit 7						bit 0	
bit 7	RD16: Bit de habilitación del modo de Lectura/Escritura de 16 bits						
bit 6-3	T3CCP2:T3CCP1: Bits de habilitación del Timer3 y Timer1 para los módulos CCPx.						
bit 5-4	T3CKPS1:T3CKPS0: Bits de selección de pre escala del reloj de entrada						
bit 2	T3SYNC: Bit de selección de sincronización del reloj interno						
bit 1	TMR3CS: Bit de selección de la fuente de reloj						
bit 0	TMR3ON: Bit de activación del Timer3						

Tabla 3.7. Registro de control del TIMER3

3.1.4.3. MÓDULOS DE CAPTURA/COMPARACIÓN/PWM (CCP)

Cada módulo CCP contiene un registro de 16 bits el cual opera como: registro de captura de 16 bits, registro de comparación de 16 bits ó como registro Maestro/Esclavo de ciclo activo PWM.

La operación del CCP1 es idéntica a la del CCP2 con excepción del disparo por evento especial.

REGISTROS CCP1CON/CCP2CON							
—	—	DCxB1	DCxB0	CCPxM3	CCPxM2	CCPxM1	CCPxM0
bit 7						bit 0	
bit 7-6	No implementado: Se lee como "0".						
bit 5-4	DCxB1:DCxB0: bit 1 y bit 0 del ciclo activo PWM.						
bit 3-0	CCPxM3:CCPxM0: Bits de selección de modo.						

Tabla 3.8. Registros CCP1CON/CCP2CON

3.1.4.3.1. MODO CAPTURA

En este modo los registros CCPR1H:CCPR1L capturan el valor de 16 bits de los registros TMR1 o TMR3 cuando ocurre un evento en el pin RC2/CCP1, dichos eventos pueden producirse:

- ✓ Cada flanco descendente
- ✓ Cada flanco ascendente
- ✓ Cada 4 flancos ascendentes
- ✓ Cada 16 flancos ascendentes

El evento se selecciona con los bits de control CCP1M3:CCP1M0 (CCP1CON<3:0>). Cuando se realiza una captura el bit CCP1IF (PIR1<2>) se fija en "1".

En el modo captura el pin RC2/CCP1 debe estar configurado como entrada, fijando en "1" el bit TRISC<2>.

Los temporizadores utilizados con el módulo de captura (Timer1 y/o Timer3) deben funcionar en modo Temporizador o en modo de Contador Sincrónico. En el modo de contador Asincrónico la operación de captura no funciona. El temporizador que va a ser utilizado por cada módulo CCP se selecciona en el registro T3CON.

3.1.4.4. MÓDULO DE TRANSMISIÓN / RECEPCIÓN SINCRÓNICA / ASINCRÓNICA (USART)

El USART es uno de los dos módulos de entrada/salida serial que tiene el PIC18F452. El USART se puede configurar como un sistema full-duplex asincrónico para comunicarse con dispositivos periféricos, por ejemplo una PC, o como un sistema half-duplex sincrónico para comunicarse con dispositivos como conversores A/D o D/A, EEPROMs seriales, etc.

El módulo USART puede funcionar en los siguientes modos:

- ✓ Asincrónico (full-duplex)
- ✓ Sincrónico-Maestro (half-duplex)
- ✓ Sincrónico-Esclavo (half-duplex)

TXSTA: REGISTRO DE CONTROL Y ESTADO DE TRANSMISIÓN							
CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D
bit 7							bit 0
bit 7	CSRC: Bit de selección de la fuente de reloj Clock Source Select bit.						
bit 6	TX9: Bit de habilitación de transmisión de 9 bits.						
bit 5	TXEN: Bit de habilitación de transmisión.						
bit 4	SYNC: Bit de selección de modo USART.						
bit 3	No implementado: Se lee como "0".						
bit 2	BRGH: Bit de selección de velocidad de transmisión.						
bit 1	TRMT: Bit de estado del registro de desplazamiento de transmisión.						
bit 0	TX9D: Noveno bit del dato transmitido, puede usarse como bit de paridad.						

Tabla 3.9. Registro de control y estado de transmisión

RCSTA: REGISTRO DE CONTROL Y ESTADO DE RECEPCIÓN							
SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D
bit 7							bit 0
bit 7	SPEN: Bit de habilitación del puerto serial						
bit 6	RX9: Bit de habilitación de recepción de 9 bits.						
bit 5	SREN: Bit de habilitación de recepción única.						
bit 4	CREN: Bit de habilitación de recepción continua.						
bit 3	ADDEN: Bit de habilitación de detección de dirección.						
bit 2	FERR: Bit de error de Framing.						
bit 1	OERR: Bit de error de Overrun.						
bit 0	RX9D: Noveno bit del datos recibido.						

Tabla 3.10. Registro de control y estado de recepción

La velocidad de transmisión (baud rate), para el modo síncrono y asíncrono se controla por medio del *generador de baud rate* (BRG). La velocidad de transmisión depende del valor del registro SPBRG que controla el periodo de un temporizador de 8 bits. En el modo asíncrono la velocidad también depende del bit BRGH (TXSTA<2>), en el modo síncrono este bit se ignora. En la tabla 3.11 se muestran las fórmulas para calcular la velocidad de transmisión.

MODO	BRGH = 0 (baja velocidad)	BRGH = 1 (alta velocidad)
Asíncronico	$\text{Baud Rate} = \frac{F_{osc}}{64(X+1)}$	$\text{Baud Rate} = \frac{F_{osc}}{16(X+1)}$
Síncronico	$\text{Baud Rate} = \frac{F_{osc}}{4(X+1)}$	No aplicable

X es el valor del registro SPBRG y debe estar entre 0 y 255

Tabla 3.11. Fórmulas para calcular la velocidad de transmisión

3.2. EL INTERFASE EIA-232⁷

3.2.1. INTRODUCCIÓN

Cuando los computadores entraron en escena en los años sesenta, aprovecharon la tecnología ya madura de los dispositivos serie para la entrada/salida de datos. De todas formas, los computadores eran más restrictivos en las características eléctricas que los dispositivos conectados a ellos y fue necesario desarrollar un estándar de conexión serie para normalizar el caos que supondría la proliferación de equipos con diferentes tipos de conexiones.

⁷ W. Stallings – COMUNICACIONES Y REDES DE COMPUTADORES – Prentice-Hall (1997). Capítulo 5.

Fue la compañía telefónica BELL la primera en tomar cartas en el asunto, al comprobar que muchos de los dispositivos para comunicar datos a través de la línea telefónica (MÓDEMS) que se empezaban a utilizar en aquel entonces, podían interferir o dañar las líneas telefónicas que usaban y prohibió muchos de estos equipos.

En 1969 la EIA (Asociación de Industrias Electrónicas), los laboratorios BELL y los fabricantes de equipos de comunicaciones, formularon cooperativamente y emitieron el EIA RS-232, que casi inmediatamente experimentó revisiones menores convirtiéndose en la RS-232-C.

Un modelo similar, el V-24, fue aprobado por la organización internacional de modelos, comité consultivo internacional sobre telefonía y telegrafía (CCITT), con lo cual este modelo se hizo popular en todo el mundo para todos los dispositivos de comunicaciones de datos vía serie. Sin embargo, al no ser una norma de obligado cumplimiento muchos fabricantes hacen una interpretación bastante personal de ella, apartándose del standard y complicando la conexión de sus aparatos. El propósito de esta norma fue establecido formalmente por su título: "Conexión entre un Equipo Terminal de Datos (DTE) y un Equipo de Comunicación de Datos (DCE) empleando un intercambio de datos binarios en serie". En resumen especifica como conectar un terminal o computador (DTE), a un módem (DCE).

3.2.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA TRANSMISIÓN SERIE

3.2.2.1. TRANSMISIÓN SERIE/PARALELO

Conceptualmente una transmisión paralelo consiste en utilizar simultáneamente varios circuitos de transmisión serie. Dejando al margen problemas específicos de una transmisión en paralelo, como puede ser el efecto crosstalk o interferencia inducida de símbolos, la transmisión paralelo es el recurso lógico cuando un solo circuito no

proporciona un ancho de banda suficiente. Si en un diseño, un problema de transmisión puede resolverse (a coste similar) con una transmisión serie, esta opción es en principio deseable frente a una paralelo. Piénsese que en una transmisión con múltiples circuitos la probabilidad de fallo de línea y la necesidad de mantenimiento es proporcional al número de líneas utilizadas.

3.2.2.2. TRANSMISIÓN SÍNCRONA/ASÍNCRONA

Independientemente de si la transmisión es serie o paralelo, ésta puede ser síncrona o asíncrona.

Entre dos equipos, emisor y receptor, existe un problema básico en la identificación de los distintos símbolos (bits en este caso) que se transmiten por una línea de transmisión. Supongamos dos computadores A y B, y una línea de transmisión por la que se comunican. Supongamos que A envía datos a B 50 bits a una velocidad de 1000 bits/segundo. Esto quiere decir que cada bit estará en la línea de transmisión una milésima de segundo. La máquina B necesita conocer este dato y necesita un reloj, o base de tiempos, que le permita medir con precisión esa milésima de segundo para saber cuándo ésta en la línea el segundo bit, el tercer bit, etc.

La forma en que el equipo receptor decide si un bit es “0” o “1” es muestreando la línea de transmisión durante el intervalo del bit, preferiblemente a mitad del intervalo. Es evidente que si el reloj utilizado por el receptor no mide el tiempo con precisión y la secuencia de bits es lo suficientemente larga, entonces cometerá un error en el muestreo de la línea e identificará una secuencia de bits incorrecta. Si, por ejemplo, el reloj receptor se atrasa y cuando indica al sistema que ha pasado 1 mseg. en realidad ha pasado 1,1 mseg. (un error del 10%) entonces se producirá un primer error de muestreo en el 6º a 7º bits transmitido (se

asume que el primer bit lo muestreó correctamente en el centro del intervalo del bits). Ver figura 3.3.

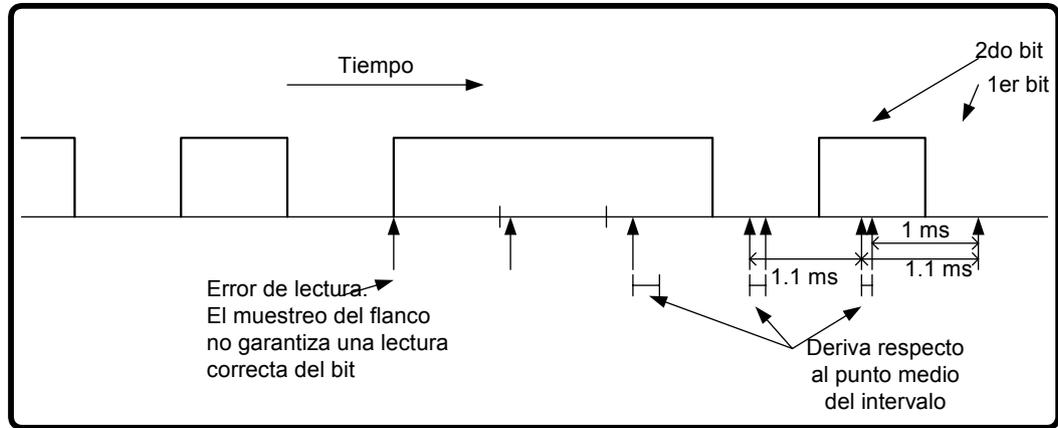


Figura 3.3. Error de muestreo

La figura muestra claramente cuál es el problema. Debe quedar claro que aunque el planteamiento del ejemplo hace culpable al reloj del receptor, en una situación real encontraremos que, de usar dos relojes, es imposible garantizar que ambos midan el tiempo exactamente igual. Y aunque el error entre ambos sea mucho menor, nótese que si la secuencia de bits es lo suficientemente larga, el error de muestreo terminará por ocurrir.

La transmisión síncrona (emisor y receptor comparten el mismo reloj) permite que el receptor pueda interpretar (muestrear) sin error de sincronismo una secuencia (bloque) arbitrariamente larga de bits. La transmisión asíncrona, a diferencia de la síncrona, esta orientada a la transmisión de caracteres (bloque mínimo de tan sólo siete u ocho bits).

En la transmisión síncrona, existen dos métodos para que ambos computadores usen un único reloj.

1. Si se utiliza el reloj de una de las dos máquinas (o un reloj tercero) se puede transmitir la señal de reloj por una línea auxiliar a la otra

máquina. La figura 3.4., muestra como a partir de la señal de reloj el muestreo es siempre exacto.

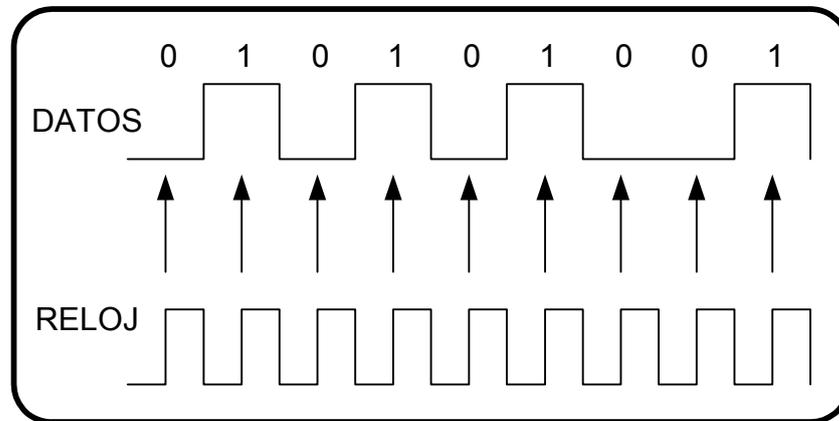
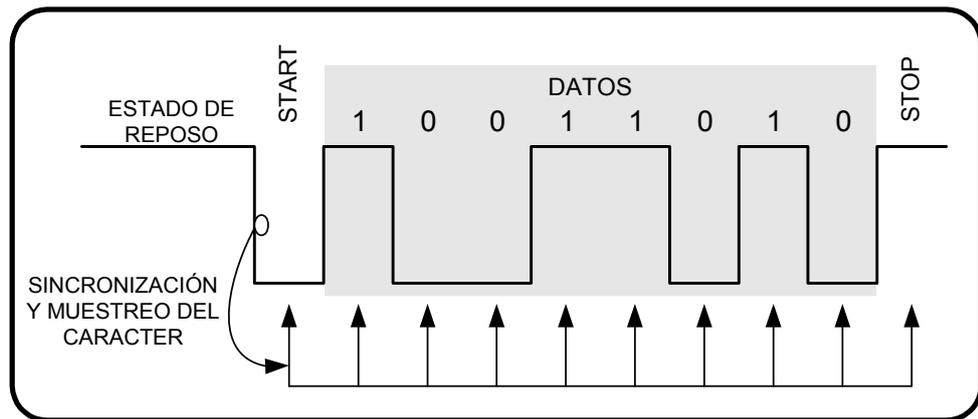


Figura 3.4. Señal de reloj

2. El emisor puede utilizar una codificación para los datos de las denominadas "auto-reloj", como por ejemplo el código Manchester (utilizado por ejemplo en redes locales Ethernet).

En la transmisión asíncrona, existe un método para sincronizar al principio de cada carácter, este es el siguiente:

Cuando el emisor no transmite, en el periodo entre caracteres, la línea se mantiene a "1" lógico. Cuando decide transmitir un carácter, primero transmite un "0" que se denomina bit de START y sirve para que el receptor sincronice (empieza a contar tiempos desde ese momento). El instante de sincronismo es el flanco de bajada de la señal (ver figura 3.5.). Tras el bit de START se transmiten los bits de datos y después es obligatorio al menos un bit de STOP a "1" lógico. La secuencia se repite tantas veces como caracteres se transmitan. Obsérvese que este mecanismo de sincronización con el bit de START impide que la deriva de muestreo por diferencias entre los relojes continúe en el siguiente carácter. Se asume que la deriva de muestreo no debe ser tan grande que provoque un error de muestreo en los bits de cada carácter.



Fi

gura 3.5. Transmisión de datos

3.2.3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

La norma de conexión RS-232-C establece que los conectores ha utilizar deben ser del tipo SUB-D 25 también denominado DB-25. Estos conectores tienen forma de "D", de ahí su nombre, y disponen de 25 terminales de conexión. Sin embargo, habitualmente se usan 8 conectores como máximo, siendo lo más normal utilizar 5 ó 3. Los conectores están distribuidos en dos filas paralelas, una con las 13 primeras patillas y la otra con las 12 últimas. La numeración es consecutiva y al llegar al final de una fila continúa al principio de la siguiente.

La norma recomienda que en los dispositivos terminales de datos -DTE- se dispongan conectores macho y en los dispositivos de comunicaciones de datos -DCE- recomienda utilizar conectores hembra. De todas formas, no debe uno fiarse de si el conector es macho o hembra para identificar el dispositivo, ya que son muchos los fabricantes que hacen caso omiso de esta recomendación.

Otro problema que tenemos con los conectores, es que aunque la norma define como conector standard el SUB-D 25, algunos ordenadores personales del tipo IBM-AT usan como salida serie el conector SUB-D 9 (o DB-9), de forma análoga al anterior pero con 9 patillas, 5 en una fila y 4 en otra. Esta sustitución es posible porque en una conexión serie asíncrona

nunca se usan más de 9 líneas y los puertos serie de un PC solo pueden realizar transmisiones asíncronas (nunca síncronas a no ser que se adquiriera una tarjeta de comunicación serie síncrona) y por lo tanto el resto de las líneas de conector SUB-D-25 no se utilizan. Esto suele causar molestias a los usuarios de este tipo de ordenadores, ya que han de modificar los conectores de sus periféricos, o comprar adaptadores de 9 a 25 pines.

DB-9	DB-25	Nombre	Descripción
1	8	DCD	Detección portadora
2	3	RX	Recepción de datos
3	2	TX	Emisión de datos
4	20	DTR	Terminal preparada
5	7	GND	Masa Común
6	6	DSR	Datos preparados
7	4	RTS	Preguntar para enviar
8	5	CTS	Borrar para enviar
9	22	RI	Timbre

Tabla 3.12. Distribución de pines de los conectores DB-9 y DB-25

3.2.3.1. TIPOS DE DISPOSITIVOS: DTE Y DCE

La conexión serie RS-232-C define dos únicos tipos de dispositivos, Data Terminal Equipment o DTE y Data Communication Equipment o DCE y esta distinción determina que patillas del conector son entradas, y cuales son salidas. Es equivalente al género del equipo. Las entradas y salidas son lo primero a determinar cuando se va a diseñar un cable de comunicaciones, ya que lo lógico es conectar las salidas de un dispositivo con las entradas del otro.

Para determinar el género de un dispositivo basta con encenderlo y medir las tensiones entre las patillas 2-7 y 3-7. Una de las dos ha de ser negativa y en un rango de -8 a -15, mientras que la otra será prácticamente 0. Una vez medidas estas tensiones tenemos dos posibilidades que nos

determinarán inequívocamente el tipo del equipo. Si V2-7 es negativa y V3-7 es cero entonces el equipo es DTE, pero si V2-7 es cero y V3-7 es negativa entonces el equipo es DCE. Si no es ninguno de los dos casos anteriores, entonces la conexión no es RS.232-C.

La razón es que los equipos DTE transmiten por la patilla 2 y la norma exige que la patilla de transmisión ha de estar negativa cuando no se transmite por ella. Por su parte, los equipos DCE transmiten por la patilla 3 y entonces ésta es la patilla que han de tener negativa.

Una definición más general de éstos dispositivos la tenemos al traducir su nombre. Un dispositivo Data Terminal Equipment (DTE) es un equipo terminal de datos, es decir, es el equipo final destinatario de los datos. Por ejemplo, una impresora es un DTE, ya que le llegan los datos y ella no los transmite a otro dispositivo. Un DCE es un Data Communication Equipment, o sea un equipo de comunicaciones de datos, al que le llegan los datos, pero no son para él, sino que los transmite a otro dispositivo. Su misión es la de puente entre los equipos DTE. Un ejemplo de equipo DCE es el módem. Sin embargo, esta última regla no debe usarse nunca, ya que como hemos dicho anteriormente a los fabricantes pueden saltarse estas normas. El único medio infalible para determinar el tipo de un equipo, es medir las tensiones V2-7 y V3-7. Desde el punto de vista del usuario, el hecho de que un equipo sea DTE o DCE sólo afecta a la hora de hacer el cable. Mientras que en una conexión DTE-DCE se pueden conectar directamente las líneas, ya que las salidas de un DTE se corresponden con las entradas de un DCE, cuando lo que hay que conectar son equipos del mismo género (DTE-DTE o DCE-DCE) se debe hacer un cruce en las líneas.

3.2.4. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

3.2.4.1. TENSIÓN EN LAS LÍNEAS

La conexión serie RS-232-C utiliza líneas de entradas y salida para realizar la comunicación y no existen líneas bidireccionales.

Las líneas que son entradas tienen una tensión prácticamente cero frente la patilla de tierra, aunque no todas las líneas que tengan tensión cero son entradas, ya que las líneas no utilizadas (sin conectar) también tienen tensión cero. Las líneas de salida pueden ser de dos tipos, bien de transmisión o bien de control de la comunicación. Ambas se caracterizan por tener tensión diferente de cero.

La línea de transmisión está normalmente a tensión negativa, cuando no transmite. Las líneas de control pueden estar tanto a tensión negativa como positiva.

Una característica muy tranquilizadora de la conexión serie RS-232-C, es que poseen protección contra cortocircuito.

3.2.4.2. NIVELES LÓGICOS

La señal es bipolar con lógica invertida, utilizando los siguientes valores:

1 lógico = -3 a -15 voltios

0 lógico = + 3 a +15 voltios

La ausencia de señal (0 voltios) queda diferenciada del 0 y 1 lógicos

Así pues, la norma de conexión RS-232-C es bastante tolerante frente a variaciones de voltaje y ello es debido a la elección del rango de tensiones de -15 a +15 voltios, en vez del habitual de +5 a 0 voltios, que habría dado menos margen de tolerancia.

Las señales de control son líneas auxiliares que utiliza la conexión RS-232-C para controlar la comunicación. Por ejemplo, si un dispositivo no está preparado para recibir, puede poner una línea a un determinado valor, de modo que el otro dispositivo lo detecte y espere hasta que la línea se ponga en estado de permitir la recepción.

El valor lógico que corresponde a una línea habilitada es el "0" o lo que es lo mismo +15 V., es decir, que si queremos indicar que nos pueden mandar datos pondríamos en la línea correspondiente el valor "0". Por el contrario si se quiere deshabilitar una línea, hay que ponerla a "1" o lo que es lo mismo a -15v.

3.2.4.3. MARGEN DE RUIDO

Se conoce como margen de ruido a la amplitud máxima de la perturbación que puede producirse en la salida de una señal sin que afecte en la entrada del siguiente circuito. Para medir este parámetro se toma el caso más desfavorable.

En la conexión serie RS-232-C, el caso más desfavorable se daría cuando la salida está emitiendo con el valor más crítico, que es 5 voltios (un "0"). Como la entrada lee un "0" hasta 3 voltios, entonces el margen de ruido para esta conexión es de 2 voltios. Esto quiere decir que es inmune a ruidos de 2 voltios, e incluso mayores en los casos más normales de utilización. Esta característica es extremadamente valiosa cuando los cables han de pasar cerca de dispositivos que generan interferencias eléctricas: líneas de alta tensión, motores eléctricos, alumbrado fluorescente etc.

Además, el margen de ruido también da un margen de seguridad frente a caídas de voltaje por la resistencia óhmica del cable, aunque éstas en general no suelen ser significativas.

3.2.4.4. ORDEN DE LOS BITS EN LA LÍNEA

El orden de transmisión de los bits por la línea es el siguiente: se comienza con el bit de inicio (start) que siempre es un "0", luego se transmite el bit menos significativo (el que está más a la derecha) y así sucesivamente hasta llegar al bit más significativo (el que está más a la izquierda). Después va el bit de paridad en el caso de que se utilice, y por último los bits de parada (stop), que pueden ser 1, 1.5 ó 2. El valor 1.5 indica que la línea toma el valor "1" durante un periodo y medio de un bit de tiempo. En la figura 3.6 se presenta la transmisión de la letra "w" cuyo código ASCII es 87 y en binario "01010111". Se utiliza paridad par y un bit de stop.

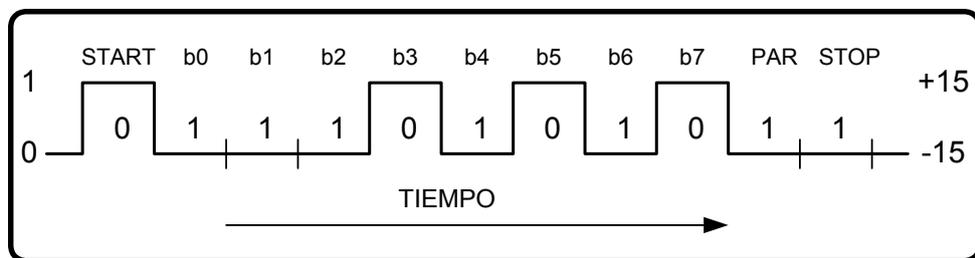


Figura 3.6. Transmisión de un carácter

3.2.5. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

La conexión serie RS-232-C utiliza conectores DB-25, que tienen disponibles 25 patillas de conexión, sin embargo, para la comunicación serie asíncrona solo define 9, dejando el resto libres para el uso particular de aplicaciones específicas o para aquellas capaces de realizar comunicaciones síncronas. Las 9 patillas fundamentales son suficientes para la mayoría de los casos, e incluso a veces basta con usar 3 ó 5.

Según el dispositivo sea DTE o DCE éstas líneas son entradas o salidas. Definiremos a continuación estas líneas e indicaremos su nombre normalizado.

La línea 7 (GRN) es la masa digital y siempre ha de conectarse. La línea 1 es la toma a tierra del dispositivo y está conectada a la carcasa. En el caso que ambos equipos estén conectados a tierra no se debe conectar esta patilla al apantallamiento del cable, sino se debe dejar sin conectar, ya que en vez de proteger al cable de ruido podrían provocar falsas señales.

Las líneas que son salidas en un DTE son la TXD, la RTS y la DTR. En un DCE son la RXD, la CTS, la DSR, la DCD y la RI. A continuación vamos a describir las funciones que la norma RS-232-C recomienda asignar a cada patilla, pero no debemos olvidar que los criterios de los fabricantes muchas veces no coinciden con los de la norma.

3.2.5.1. LÍNEAS DE COMUNICACIÓN

La línea TXD es la que utiliza un dispositivo DTE para transmitir los datos; es por tanto salida en un DTE. Si el equipo es DCE, es por donde recibe los datos y es entrada para él.

La línea RXD es la que utiliza un dispositivo DTE para recibir los datos. Si el equipo es DCE es por donde transmite los datos.

La línea GRN es la masa digital y siempre tiene que estar conectada.

Con estas tres líneas funcionaría una conexión serie básica y en la actualidad la tendencia es a usar las menos líneas posibles. Las conexiones a tres hilos son pues bastante comunes.

3.2.5.2. LÍNEAS DE CONTROL DE UN DTE

Las líneas de control son líneas accesorias de la comunicación, cuya misión es indicar al otro equipo el estado del equipo que está

transmitiendo. Un dispositivo DTE dispone de dos de estas líneas, la 20 (DTR) y la 4 (RTS), que para él son salidas.

La línea 20, llamada DTR (Data Terminal Ready), que significa dispositivo terminal de datos preparado, es una línea que el DTE suele poner a "0" (+15 V.) cuando está en funcionamiento y a "1" (-15 V.) cuando no está en condiciones de funcionamiento.

La línea 4, llamada RTS (Request To Send), tiene la misión de conmutar un módem semiduplex (DCE) entre los estados de transmisión y recepción. Activando la línea RTS a +15 V. ("0") el ordenador indica al módem que va a enviarle datos y que desea que se prepare para recibirlos y enviarlos luego a la línea telefónica. El módem tarda un pequeño lapso de tiempo en prepararse para recibir los datos del ordenador. Cuando esta preparado activara la línea CTS, Clear to Send. Cuando el ordenador desea recibir datos desactiva a -15 V. ("1") la línea RTS, el módem tarda un cierto tiempo en cambiar al otro estado, cuando lo consigue desactiva la línea CTS. En las conexiones full-duplex no es necesario realizar este tipo de conmutaciones. Por ello se deja permanentemente activada la línea 5.

3.2.5.3. LÍNEAS DE CONTROL DE UN DCE

Son las líneas que utiliza un dispositivo DCE para regular la transmisión, es decir, son las que indican en qué momento se puede transmitir y cómo se está desarrollando la transmisión. Para él son señales de salida y son las siguientes: la línea 6 (DSR), la línea 5 (CTS), la 8 (DCD) y la línea 22 (RI).

La línea 6, llamada DSR (Data Set Ready), que significa dispositivo de datos listo, la utiliza un equipo DCE para indicar que está en correcto funcionamiento. Para ello pondría +15 V. en esta línea ("0"). Por ejemplo, esta línea la podría usar un módem para indicar al ordenador que ha realizado un conjunto de operaciones: en primer lugar que se ha

conectado a una línea telefónica, esto es, que ha descolgado; posteriormente ha realizado las funciones necesarias para completar la llamada, por ejemplo en el caso origen, que ha marcado un número; por último que ha comenzado la transmisión de un tono respuesta. Todas estas operaciones la realiza el módem tras haber recibido la orden por la activación de la línea DTR del ordenador.

La línea 5, llamada CTS (Clear To Send), que significa despejado para enviar, la usa un equipo DCE para indicar que está en condiciones para que le envíen datos desde el DTE, tras la petición por la línea RTS de este. Si por alguna causa el DCE estuviese ocupado pondría esta línea a "1" (-15 V.) para que el DTE detuviese el flujo de datos hasta que esta línea se pusiese a "0" (+15 V.) de nuevo.

La línea 8, llamada DCD (Data Carrier Detect), que significa detección de portadora de datos, la usan los equipos DCE para indicar que se están recibiendo la señal portadora de otro DCE. Por ejemplo, un módem que está tratando de comunicar con otro a través de la línea de teléfono pondría esta línea a "0" (+15 V.) cuando recibe la portadora del otro y la mantiene a "0" mientras esta no desaparezca. En módems semi-duplex la señal DCD solo se activa en el módem que en cada momento actúa como receptor.

La línea 22, llamada RI (Ring Indicator), que significa indicador de llamada, la utilizan los equipos DCE para indicar que están recibiendo una llamada. Por ejemplo, un módem pondría esta línea a "0" (+15 V.) cuando suena el timbre del teléfono al que está conectado.

CAPÍTULO IV

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE DIAGNOSTICO DE MAQUINAS ROTATORIAS

4.1. DISEÑO DEL HARDWARE Y FIRMWARE

En este subcapítulo se describe el procedimiento de diseño de la tarjeta de y de adquisición de datos. En esta aplicación el hardware y el *firmware*⁸, al igual que en todas las aplicaciones que involucran microcontroladores, se desarrollan en forma simultánea. Esta consideración es necesaria para aprovechar eficientemente el microcontrolador sobre la base de los recursos disponibles, limitaciones y sobretodo de las consideraciones de diseño.

Se ha escogido el microcontrolador PIC18F452 como elemento principal de esta tarjeta, la alta velocidad de procesamiento y los recursos de hardware lo hacen idóneo para esta aplicación, además el software de desarrollo de aplicaciones (MPLAB IDE) y la documentación se pueden descargar de forma gratuita⁹.

4.1.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La tarjeta que se pretende construir debe satisfacer las siguientes necesidades:

- ✓ Debe ser capaz de adquirir simultáneamente las señales de ambos ejes de los dos acelerómetros utilizados, a una velocidad de muestreo de por lo menos 1000 muestras por segundo con una resolución mínima de 10 bits.

⁸ Se denomina *firmware* al programa de aplicación de un microcontrolador que, a diferencia del *software*, reside y se ejecuta en una memoria no volátil.

⁹ <http://www.microchip.com>

- ✓ La de transmisión de los datos adquiridos hacia la PC deberá hacerse por medio del puerto serial (RS-232) y a una velocidad lo suficientemente alta que permita observar cambios rápidos en las variables de interés.
- ✓ Debe poseer un módulo para medición de velocidad de fácil instalación, sin embargo no debe afectar al funcionamiento del resto del sistema y su utilización será opcional.

4.1.2. DISEÑO DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

El módulo ADXL202EB es una tarjeta de evaluación y aplicación para el acelerómetro ADXL202 que contiene los elementos mínimos para el funcionamiento del sensor. Solamente es necesario agregar tres elementos adicionales para ajustar ciertos parámetros de operación. La figura 4.1 muestra el diagrama esquemático y el aspecto físico de este módulo¹⁰; la tabla 4.1 indica la función de cada elemento.

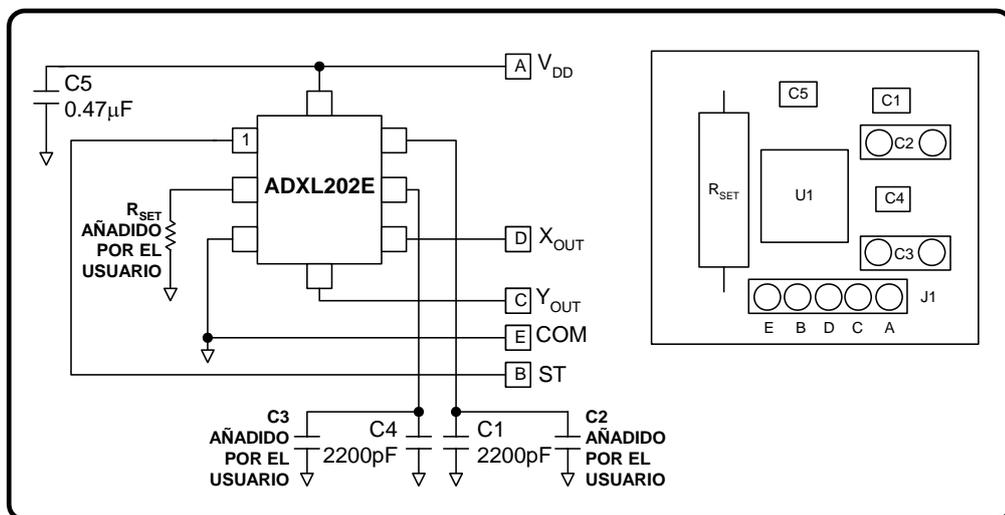


Figura 4.1. Diagrama esquemático y disposición física del módulo ADXL202EB.

¹⁰ ADXL202EB Data Sheet – Analog Devices. Págs.: 1, 2.

Referencia	Valor	Función
C1	2200 pF/25 V	X _{FILT.} . Fijan el valor del ancho de banda analógico del eje X.
C2	Añadido por el usuario	
C3	Añadido por el usuario	Y _{FILT.} . Fijan el valor del ancho de banda analógico del eje Y.
C4	2200 pF/25 V	
C5	0.47 μF	Filtro de la fuente de poder
J1	Conector	Todas las conexiones de poder y de señal se realizan a través de este conector.
R1	Añadido por el usuario	R _{SET} . Sets the PWM period (T2).
U1	ADXL202	Acelerómetro de dos ejes ±2 g.

Tabla 4.1. Lista y funciones de los elementos del módulo ADXL202EB.

Un aspecto a considerar es que los valores de aceleración medidos por el acelerómetro ADXL202 no se expresan como niveles de voltaje o corriente, sino que están moduladas en ancho de pulso (PWM), es decir, el ciclo activo de la señal es proporcional al valor medido. Esta característica debe tomarse muy en cuenta en el diseño del conversor A/D.

Los parámetros más importantes de la señal PWM generada por el sensor se detallan en la figura 4.3.

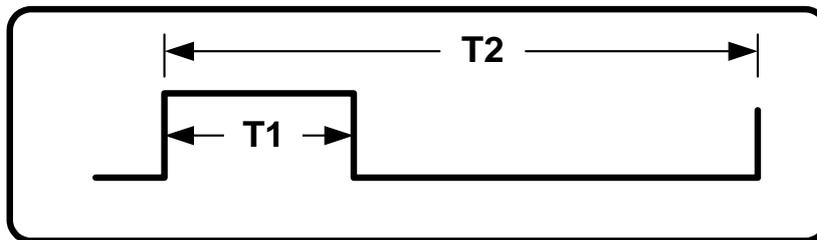


Figura 4.3. Señal PWM típica del acelerómetro ADXL202EB

Las ecuaciones 4.1 a 4.3 describen el comportamiento de esta señal, cabe indicar que el valor de la aceleración calculado está dado en g 's¹¹.

¹¹ ($1g$ = aceleración de la gravedad = 9.8 m/s^2)

$$A(g) = \frac{1}{12.5\%} \times \left(\frac{T1}{T2} - 0.5 \right) \quad (4.1)$$

$$0g = 50\% \text{ de ciclo activo} \quad (4.2)$$

$$T2(s) = \frac{R_{SET}(\Omega)}{125M\Omega} \quad (4.3)$$

El ancho de banda se ajusta por medio de los capacitores C1 y C2 (X_{FILT} y Y_{FILT}). La tabla 4.2 muestra estos valores, el ancho de banda y el nivel de ruido. Para lograr un mayor ancho de banda puede prescindirse de estos capacitores.

X_{FILT}, Y_{FILT} (μF)	Ancho de Banda (Hz)	Ruido RMS (mg)
0.01	500	12.7
0.047	100	7
0.1	50	4.2
0.47	10	2.3

Tabla 4.2. Valores de X_{FILT} y Y_{FILT} para distintos valores de ancho de banda

Aplicando la ecuación (4.3) se determinó un valor de R_{SET} de 113 K Ω con el que se obtiene un período PWM de aproximadamente 0.9 ms. El ancho de de banda posible debe ser el mayor posible, por esta razón no se utilizan los capacitores C1 y C2. En la figura 4.4 se muestra la fotografía del módulo ADXL202EB ensamblado y listo para funcionar según los requerimientos de diseño.

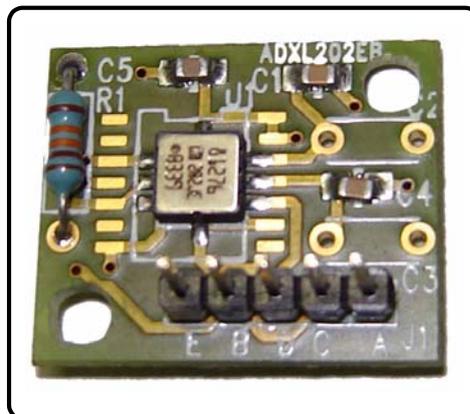


Figura 4.4. Fotografía del módulo ADXL202EB listo para ser utilizado

4.1.3. DISEÑO DE LA ETAPA DE CONVERSIÓN A/D Y TRANSMISIÓN SERIE

Como ya se explicó en el apartado anterior, el acelerómetro provee una señal PWM; por esta razón no será posible utilizar el conversor A/D disponible en el PIC18F452, ya que este módulo trabaja con niveles de voltaje. Para realizar esta conversión se ha utilizado dos interrupciones: una interrupción externa y una interrupción por módulo CCP (en modo captura), para cada eje del acelerómetro.

El proceso de conversión se detalla a continuación.

- ✓ Se detecta el flanco positivo de la señal PWM, proveniente del acelerómetro, por medio de una interrupción externa (INT1 para el eje X e INT2 para el eje Y).
- ✓ En la RSI (rutina de servicio de interrupción) de interrupción externa correspondiente se inicializan los contadores que contendrán, al final de la conversión, el valor equivalente al ancho del pulso.
- ✓ El flanco descendente se detecta por medio de la interrupción por módulo CCP en modo captura (CCP1 para el eje X y CCP2 para el eje Y).
- ✓ En la RSI del módulo CCP correspondiente se obtiene el valor del contador de ancho de pulso y se almacena los valores en una tabla de datos.
- ✓ Este proceso se repite hasta que la tabla de datos se llena, entonces se inicia la transmisión de datos hacia la PC.

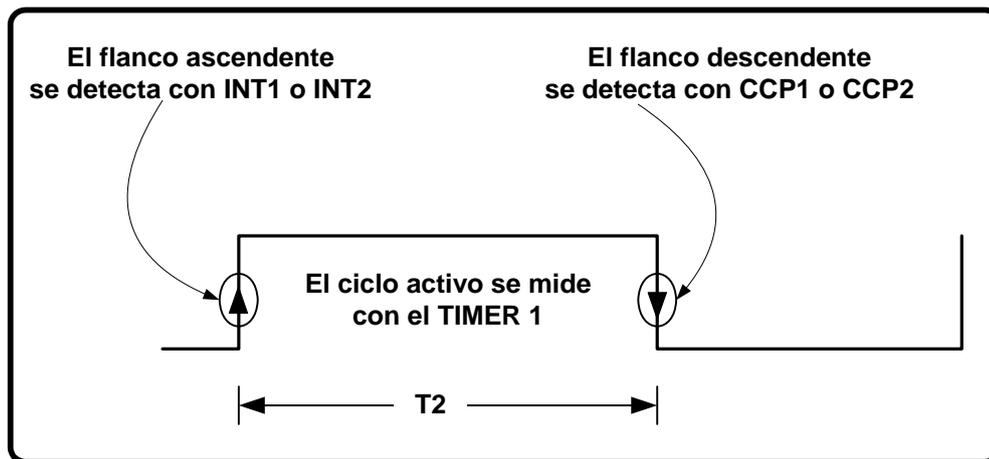


Figura 4.5. Proceso de conversión utilizando interrupciones.

Para garantizar una rápida respuesta a estos eventos, las interrupciones INT1, INT2, CCP1 y CCP2 se configuran con alta prioridad.

La transmisión y recepción de datos también se controlan con interrupciones. El proceso es el siguiente:

- ✓ Se envía un byte de datos desde la PC al microcontrolador. Este evento genera una interrupción.
- ✓ En la RSI de recepción USART se inicializan los punteros de datos de la tabla y se inicia el proceso de adquisición ya descrito.
- ✓ Cuando la adquisición de datos termina se inicia la transmisión, también se ejecuta a través de una interrupción que se produce cada vez que el microcontrolador envía un byte. La transmisión finaliza cuando se han enviado todos los datos de la tabla.

Las interrupciones de transmisión y recepción se configuran con baja prioridad ya que el microcontrolador tiene un hardware especializado que manipula este proceso de forma eficiente. La velocidad de transmisión es de 38400 bps y se ha determinado experimentalmente. Para lograr esta alta velocidad, la frecuencia de operación del PIC18F452 es de 40 MHz que se logra con un

oscilador de 10 MHz y un circuito interno que multiplica esta frecuencia por 4 (PLL x4).

A fin de lograr la mayor velocidad de transferencia, los datos se transmiten en formato binario y se ha incluido un campo para detección de errores (CRC). La trama de datos que transmite el microcontrolador es la siguiente:

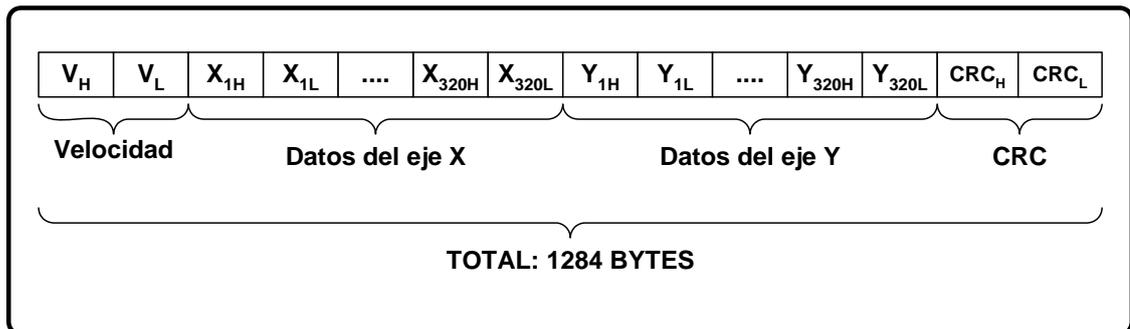


Figura 4.5. Trama de datos transmitidos por el microcontrolador.

El PIC18F452 opera con niveles de voltaje TTL para transmisión y recepción, por esta razón se utiliza el circuito integrado MAX232 que convierte los niveles TTL en niveles de RS-232, este dispositivo tiene una bomba de carga interna que genera voltajes de $-10V$ y $+10V$ a partir de un voltaje de operación de $5V$. En la figura 4.6 se ilustra el diagrama de pines y el circuito típico de aplicación del MAX232¹².

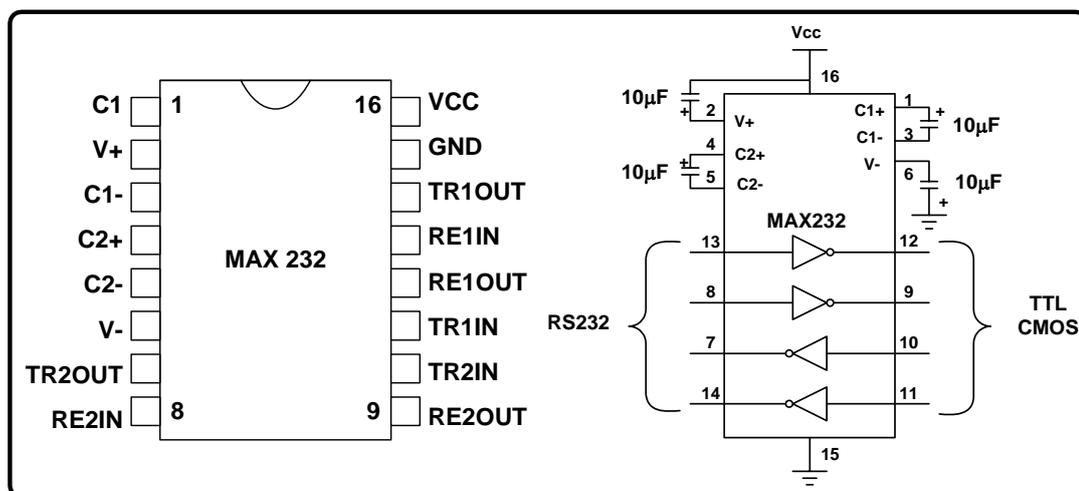


Figura 4.6. Diagrama de pines y circuito de aplicación del CI MAX232.

¹² <http://www.beyondlogic.org>

4.1.4. PROGRAMACIÓN DEL PIC18F452

Para la programación del microcontrolador se empleó el software de desarrollo MPLAB IDE 7.2. Esta fue la herramienta fundamental para el desarrollo del proyecto ya que en ella se pueden simular situaciones y eventos muy cercanos al comportamiento real del dispositivo, de esta forma resultó relativamente sencillo localizar y depurar los problemas que se presentaron. En la figura 4.7 se muestra el programa en proceso de simulación.

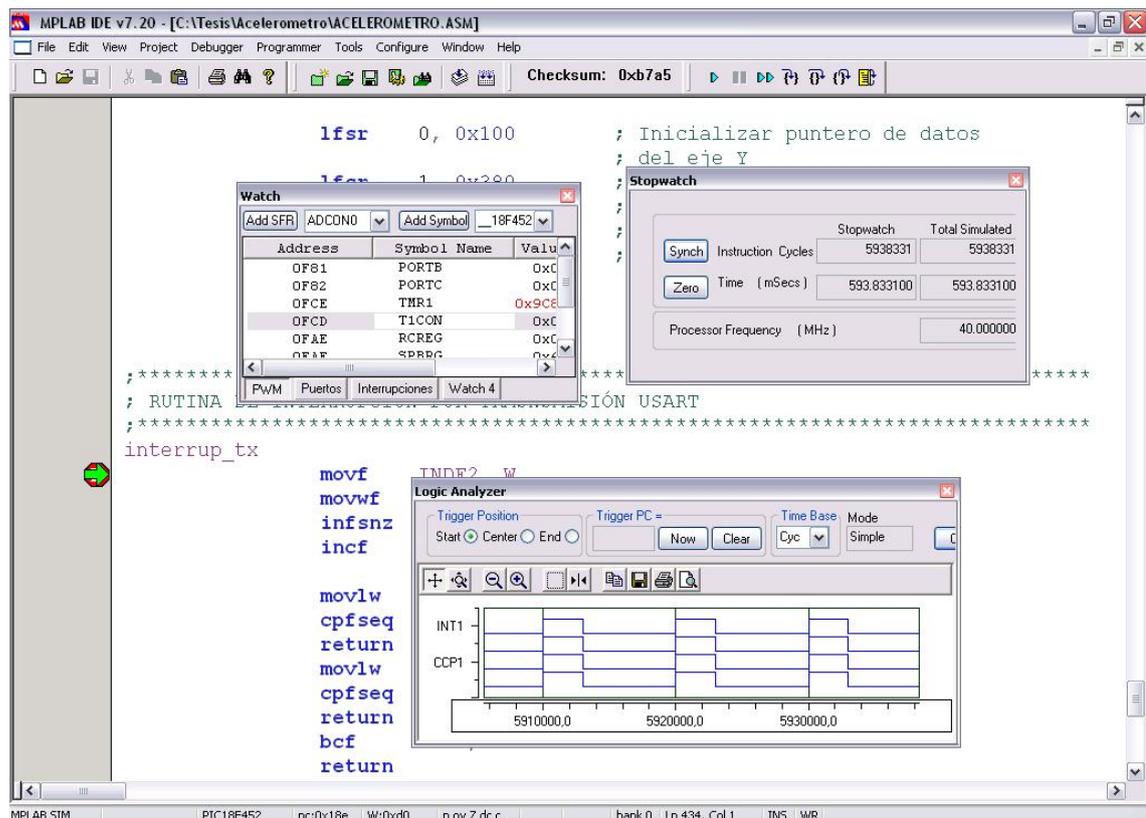


Figura 4.7. Ventana del programa MPLAB IDE durante el proceso de simulación

A continuación se detallan los registros más importantes y sus configuraciones iniciales. El programa completo, en lenguaje ensamblador, se detalla en la sección de Anexos.

PUERTOS

TRISB: F8h (dirección de datos del puerto B)

TRISC: BFh (dirección de datos del puerto C)

TEMPORIZADORES

T1CON: 01h

RD16	—	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	$\overline{\text{T1SYNC}}$	TMR1CS	TMR1ON
0	0	0	0	0	0	0	1

T3CON: 21h

RD16	T3CCP2	T3CKPS1	T3CKPS0	T3CCP0	$\overline{\text{T3SYNC}}$	TMR3CS	TMR3ON
0	0	1	0	0	0	0	1

MÓDULOS CCP

CCP1CON y CCP2CON: 04h

—	—	DCxB1	DCxB0	CCPxM3	CCPxM2	CCPxM1	CCPxM0
0	0	0	0	0	1	0	0

MÓDULO USART

SPBRG: 64d (control de velocidad de transmisión/recepción USART)

TXSTA: 24h

CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D
0	0	1	0	0	1	0	0

RCSTA: 90h

SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D
1	0	0	1	0	0	0	0

INTERRUPCIONES

INTCON: D0h

GIE/ GIEH	PEIE/ GIEL	T0IE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF
1	1	0	1	0	0	0	0

INTCON2: 30h

RBPUP	INTEDG0	INTEDG1	INTEDG2	—	TMR0IP	—	RBIP
0	0	1	1	0	0	0	0

INTCON3: C0h

INT2IP	INT1IP	—	INT2IE	INT1IE	—	INT2IF	INT1IF
1	1	0	0	0	0	0	0

PIE1: 20h

PSPIE	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE
0	0	1	0	0	0	0	0

PIE2: 02h

—	—	—	EEIE	BCLIE	LVDIE	TMR3IE	CCP2IE
0	0	0	0	0	0	1	0

IPR1: 04h

PSPIP	ADIP	RCIP	TXIP	SSPIP	CCP1IP	TMR2IP	TMR1IP
0	0	0	0	0	1	0	0

IPR2: 01h

—	—	—	EEIP	BCLIP	LVDIP	TMR3IP	CCP2IP
0	1						

RCON: 80h

IPEN	—	—	RI	TO	PD	POR	BOR
1	0						

4.1.5. IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE HARDWARE

Las pruebas de funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos se realizaron utilizando un software básico de comunicación (implementado en LabVIEW). Los resultados obtenidos fueron satisfactorios y se pueden apreciar en la figura 4.8.

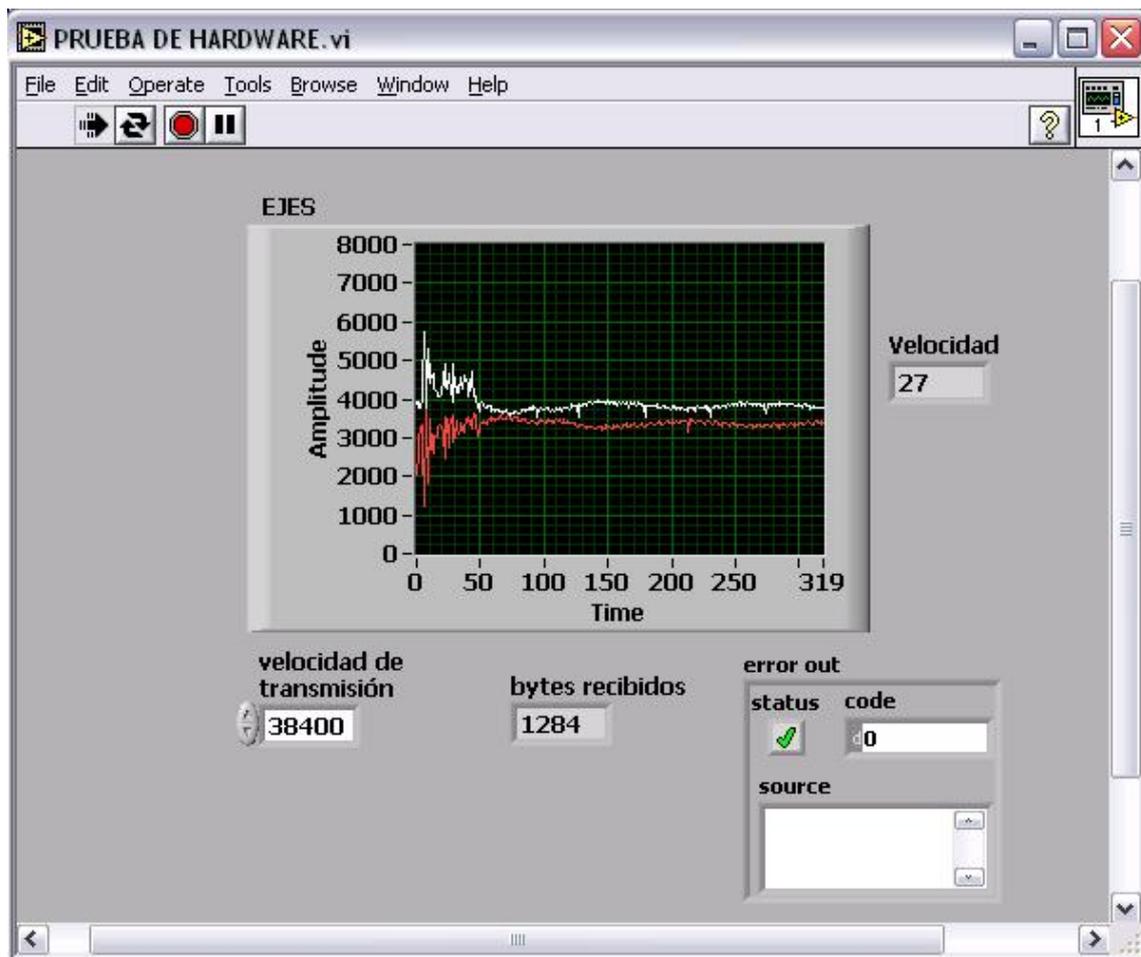


Figura 4.8. Programa para realizar pruebas de hardware.

En la figura 4.9 se puede apreciar el circuito completo de la tarjeta de adquisición de datos.

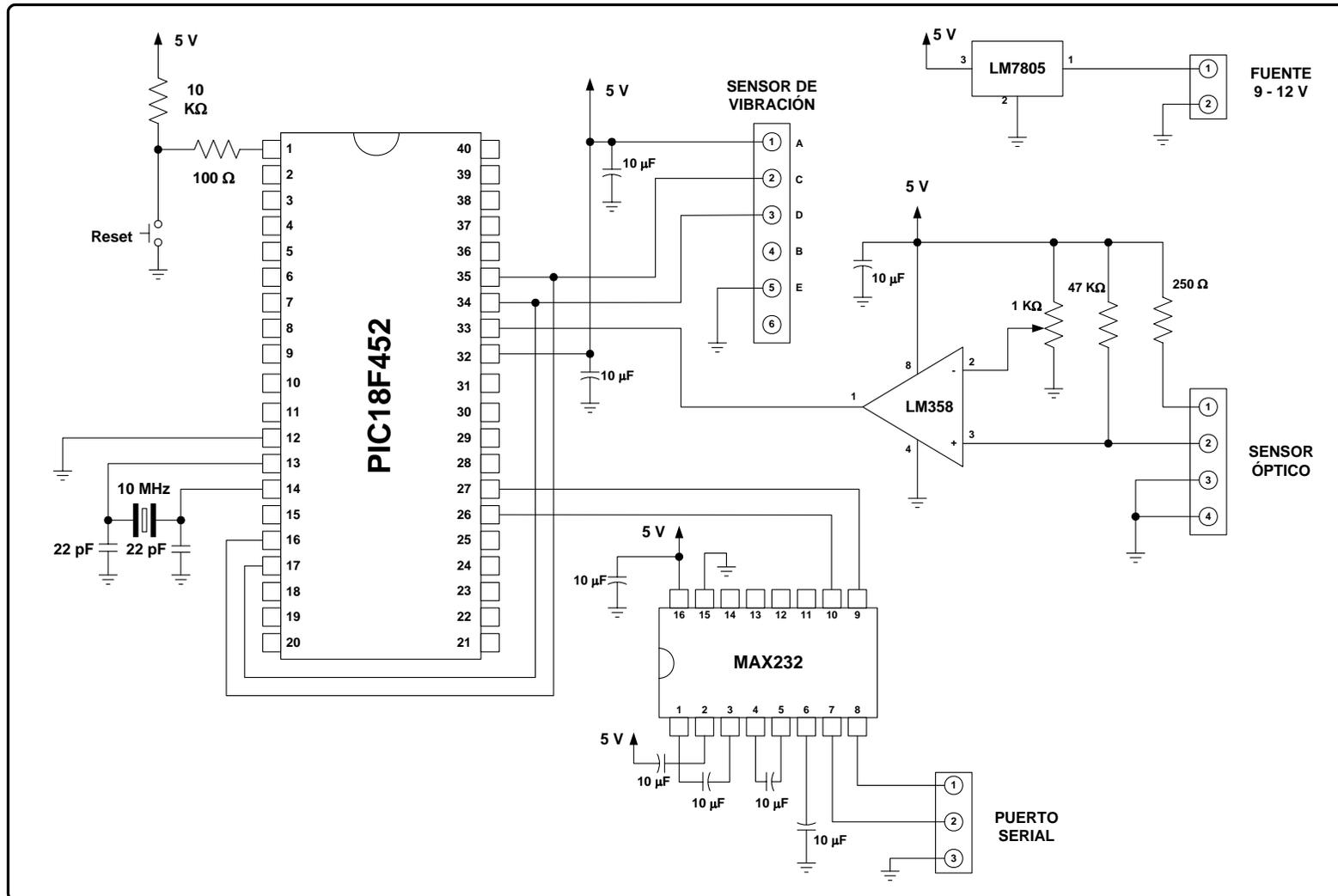


Figura 4.9. Circuito completo de la tarjeta de adquisición de datos

4.2. DISEÑO DEL SOFTWARE

El diseño del software de adquisición y procesamiento de datos se ha realizado completamente utilizando el lenguaje de programación gráfica LabVIEW. Se ha escogido este programa debido a su gran facilidad para el manejo de los recursos de la PC (especialmente el puerto serial RS-232) y a su excelente interfase gráfica. Estas características permitieron que el desarrollo del software se cumpla en un tiempo relativamente corto.

4.2.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

El software de adquisición, procesamiento y análisis de datos debe cumplir con las siguientes consideraciones de diseño.

- ✓ Debe ser completamente compatible con la tarjeta de adquisición de datos. Esto que implica que será capaz de detectar errores y posibles interrupciones en la transmisión.
- ✓ La interfase gráfica de usuario debe ser amigable, es decir, la visualización de parámetros se hará de la forma más clara posible y tendrá funciones de fácil acceso.
- ✓ Los procesos de transmisión/recepción y procesamiento de datos debe ejecutarse en forma eficiente para evitar pérdidas de datos.
- ✓ El sistema de diagnóstico proveerá de la información necesaria en caso de detectarse una falla, sin embargo es el usuario quién deberá corroborar la veracidad de esta información.
- ✓ Debe tener la capacidad de manejar archivos: abrir o guardar reportes, realizar análisis históricos, etc.

4.2.2. DISEÑO DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Como se explicó el apartado 4.1.3 (Diseño de la etapa de conversión A/D y transmisión serie), el microcontrolador inicia la conversión cuando recibe un byte de datos (sin importar su valor) desde la PC. Por lo tanto el primer paso consiste en enviar este byte a través del puerto serie. A continuación se reciben 1284 bytes de datos y se los separa de forma adecuada.

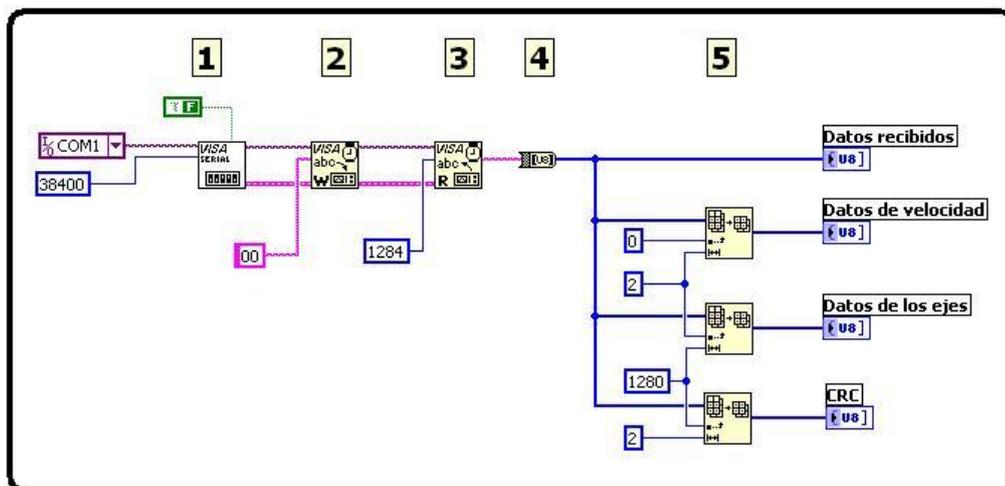


Figura 4.10. Software de adquisición de datos.

En la figura 4.10 se presenta el software simplificado de adquisición de datos dividido en 6 etapas que se describen a continuación.

- 1) **Configuración del puerto de comunicación.-** En esta etapa se abre el puerto de comunicación (COM1, COM2, etc.), se selecciona la velocidad y se configura el formato de los datos, en este caso: 38400 bps, 8 bits de datos, 1 bit de parada, sin bit de paridad y datos binarios.
- 2) **Inicio de conversión.-** Se envía un byte de datos por el puerto hacia el microcontrolador para iniciar el proceso de conversión y transmisión de datos.
- 3) **Recepción de datos.-** Se reciben 1284 bytes de datos que contienen los campos: velocidad, datos de los ejes y CRC.

- 4) **Conversión de tipo de dato.**- Los datos recibidos son de tipo *string* (cadena de caracteres) pero para su posterior procesamiento deben estar en un formato numérico (byte). Esta etapa se encarga de esta conversión.
- 5) **Separación de datos.**- Una vez que los datos fueron recibidos y convertidos se separan en función del tipo de información que contienen. A continuación los datos son acondicionados y procesados.

4.2.3. DISEÑO DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de datos consiste principalmente en aplicar la FFT a los datos de aceleración para obtener los espectros de frecuencia, que son la herramienta fundamental para el análisis de vibración.

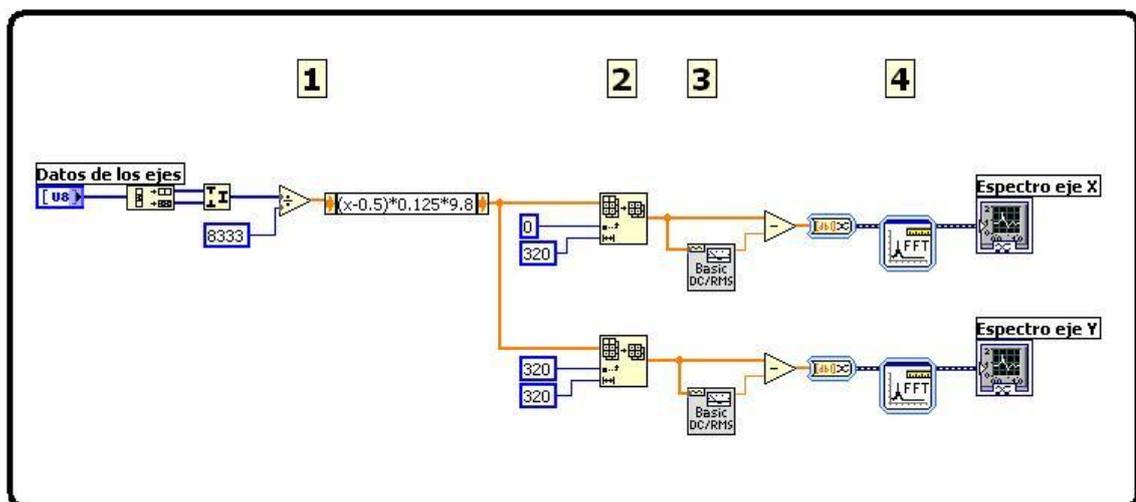


Figura 4.11. Software de procesamiento de datos

A continuación se explica el funcionamiento del software de procesamiento de datos de la figura 4.11.

- 1) **Acondicionamiento de señal.**- Previo al procesamiento, los datos de aceleración (ejes) deben ser acondicionados a fin de obtener una medida real en m/s^2 . El acondicionamiento se realiza empleando la ecuación (4.1).

- 2) **Separación de ejes.-** La señal acondicionada está compuesta por 640 muestras, cada contiene 320 puntos que deben separados para su procesamiento individual.
- 3) **Eliminación del valor medio.-** La componente de continua no aporta ninguna información en el análisis espectral de vibración y es conveniente eliminarlo.
- 4) **Cálculo de la FFT.-** Aquí se calculan los espectros de frecuencia de las señales. En la figura 4.12 se muestra el cuadro de configuración de la FFT, nótese que se utiliza la ventana Hanning por ser la más adecuada para este tipo de aplicación.

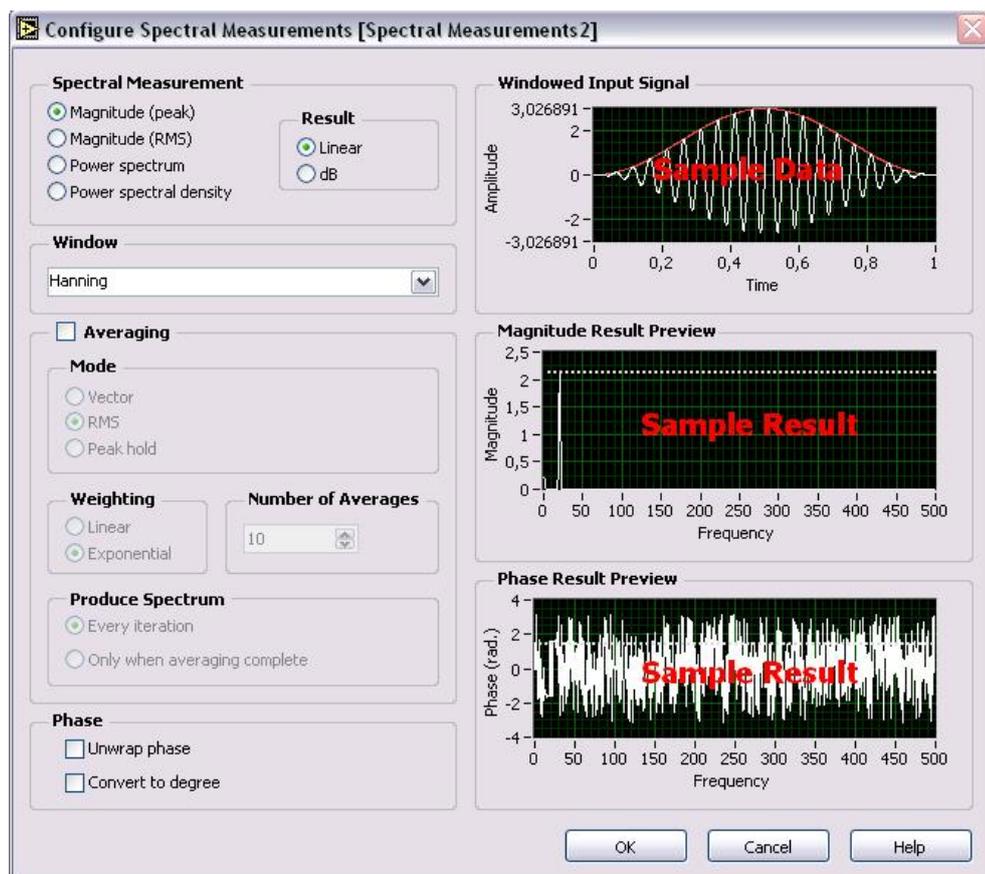


Figura 4.12. Cuadro de configuración de la FFT.

4.2.4. DISEÑO DEL SOFTWARE DE DIAGNÓSTICO

Un método efectivo para detectar los pequeños cambios de energía asociada con defectos en las máquinas o fallas eléctricas es la *alarma de envolvente*¹³. El método consiste en aplicar un envolvente patrón sobre el espectro registrado. Esta envolvente es matemáticamente creada al aplicar un factor multiplicador del 130 % al 150 % sobre el espectro registrado normal. En la figura 4.13 se genera el envolvente patrón a partir del espectro de un motor de inducción en buen estado.

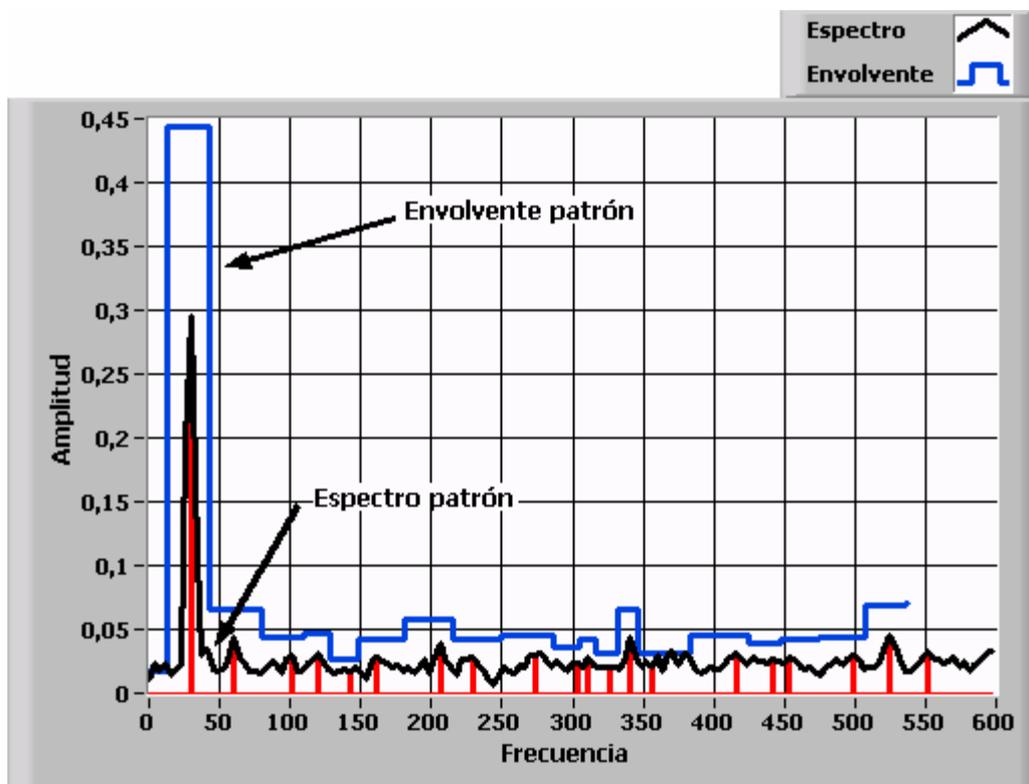


Figura 4.13. Generación del Envolvente Patrón.

Si algún cambio en la vibración se produjese en las mediciones posteriores que motivase que el espectro FFT traspase la frontera de la envolvente deben identificarse las frecuencias y amplitudes donde se produce este exceso. Estos parámetros, sometidos a análisis, indican el tipo y la severidad del problema.

El software de diagnóstico de la presente aplicación utiliza principalmente el método de la envolvente para la localización de fallas. Su funcionamiento

¹³ Curso de Análisis Vibracional Intermedio – ADEMINSa – Marzo 2003. Módulo 2

consiste principalmente en detectar los picos más significativos del espectro y luego compararlos con el envolvente patrón. Si el pico sobrepasa el valor correspondiente del envolvente se determina la frecuencia, la amplitud y el porcentaje de exceso.

El código fuente de este programa y del sistema completo se incluye en la sección de anexos.

En la figura 4.14 se muestra el análisis de un motor de inducción. El fuerte pico que sobrepasa la envolvente indica que existe una falla en el motor.

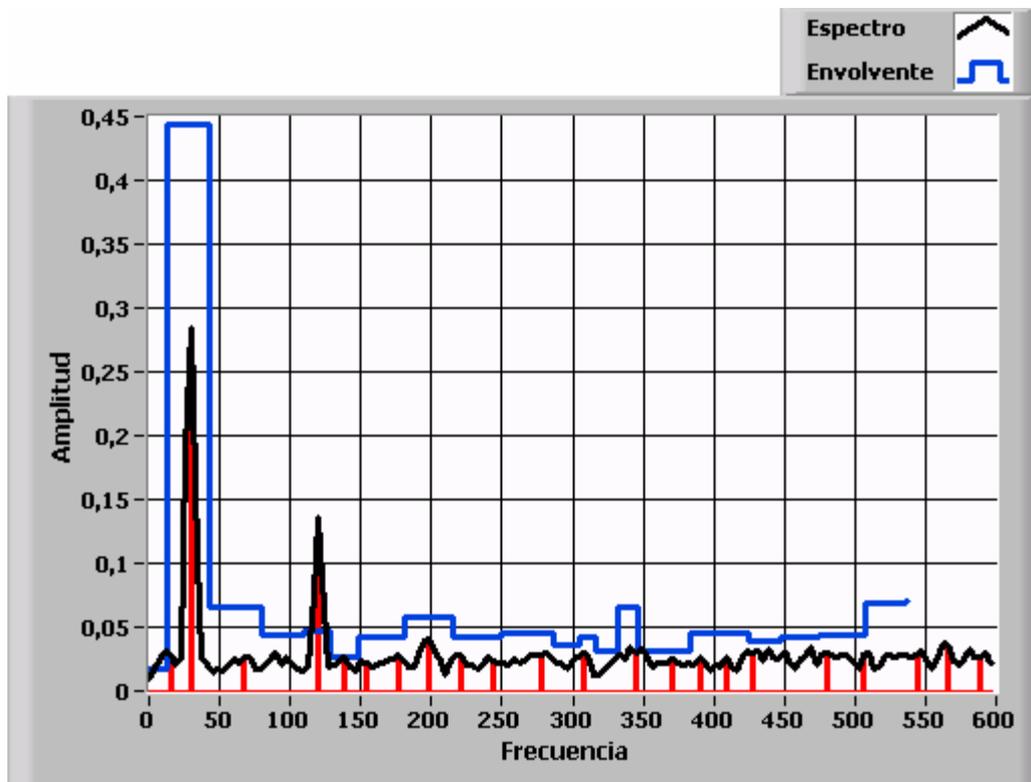


Figura 4.14. Análisis espectral de una máquina con el Método de Envolvente.

4.3. RECOPIACIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La recopilación de datos se las realizó motores de inducción trifásicos y monofásicos, y máquinas de corriente directa; en los cuales se simularon las fallas mecánicas y eléctricas más comunes, y que no resultaron perjudiciales para las máquinas. También se realizaron pruebas en motores con fallas reales.

MOTORES DE INDUCCIÓN DE ROTOR BOBINADO

Las pruebas se realizaron en dos motores de similares características: el primero es un motor en buen estado en el cual se simuló una falla y el segundo tiene una falla permanente. Para el análisis se tomó como base el espectro del primer motor en condiciones normales y se muestra en la figura 4.15.

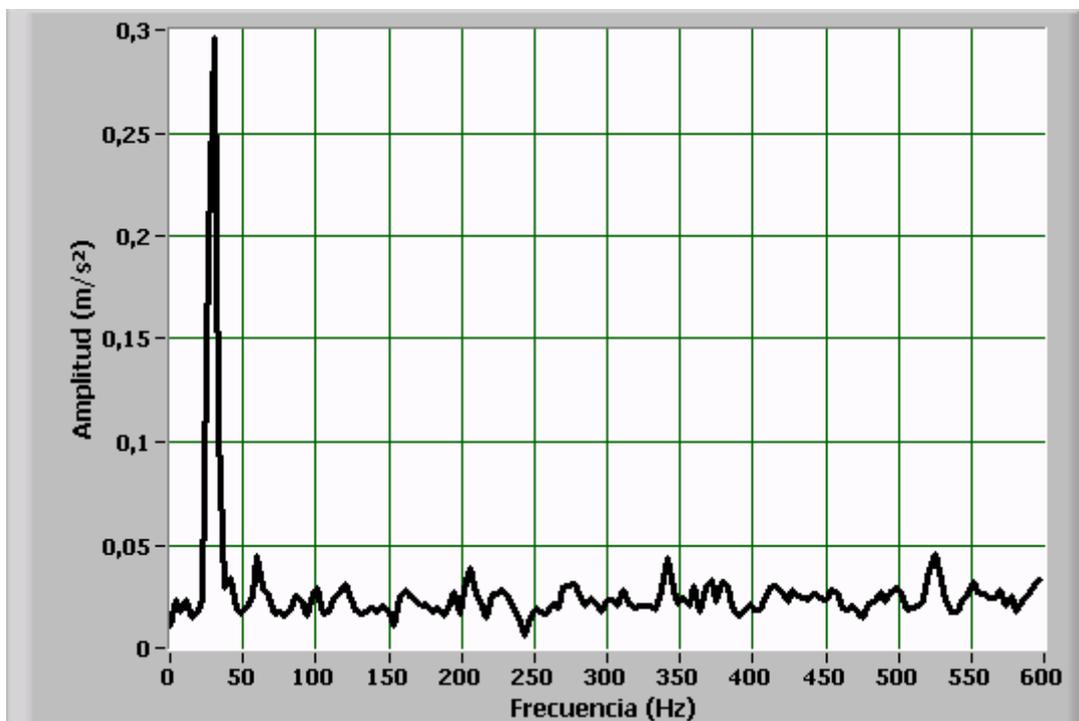


Figura 4.15. Espectro de un motor de inducción en buen estado.

PRIMERA PRUEBA

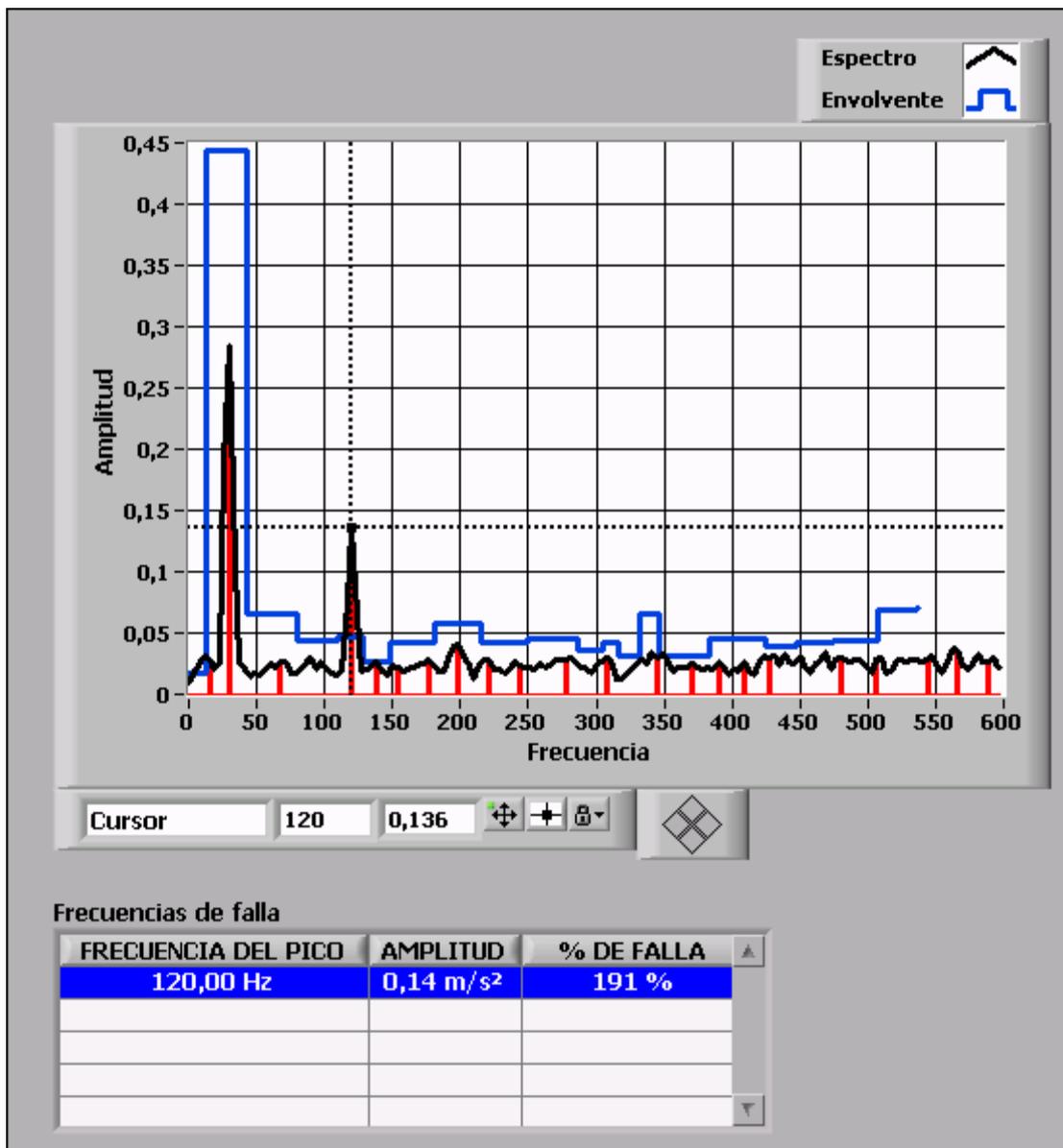


Figura 4.16. Análisis del espectro del motor de inducción de la primera prueba.

En el análisis espectral de la figura 4.16 se determina que existe un pico de que sobrepasa el nivel de la envolvente a una frecuencia de 120 Hz (el doble de la frecuencia de línea). Esto significa que la falla puede ser:

- ✓ Excentricidad en el estator.
- ✓ Laminados en cortocircuito.
- ✓ Holgura en los laminados del rotor o del estator.

SEGUNDA PRUEBA

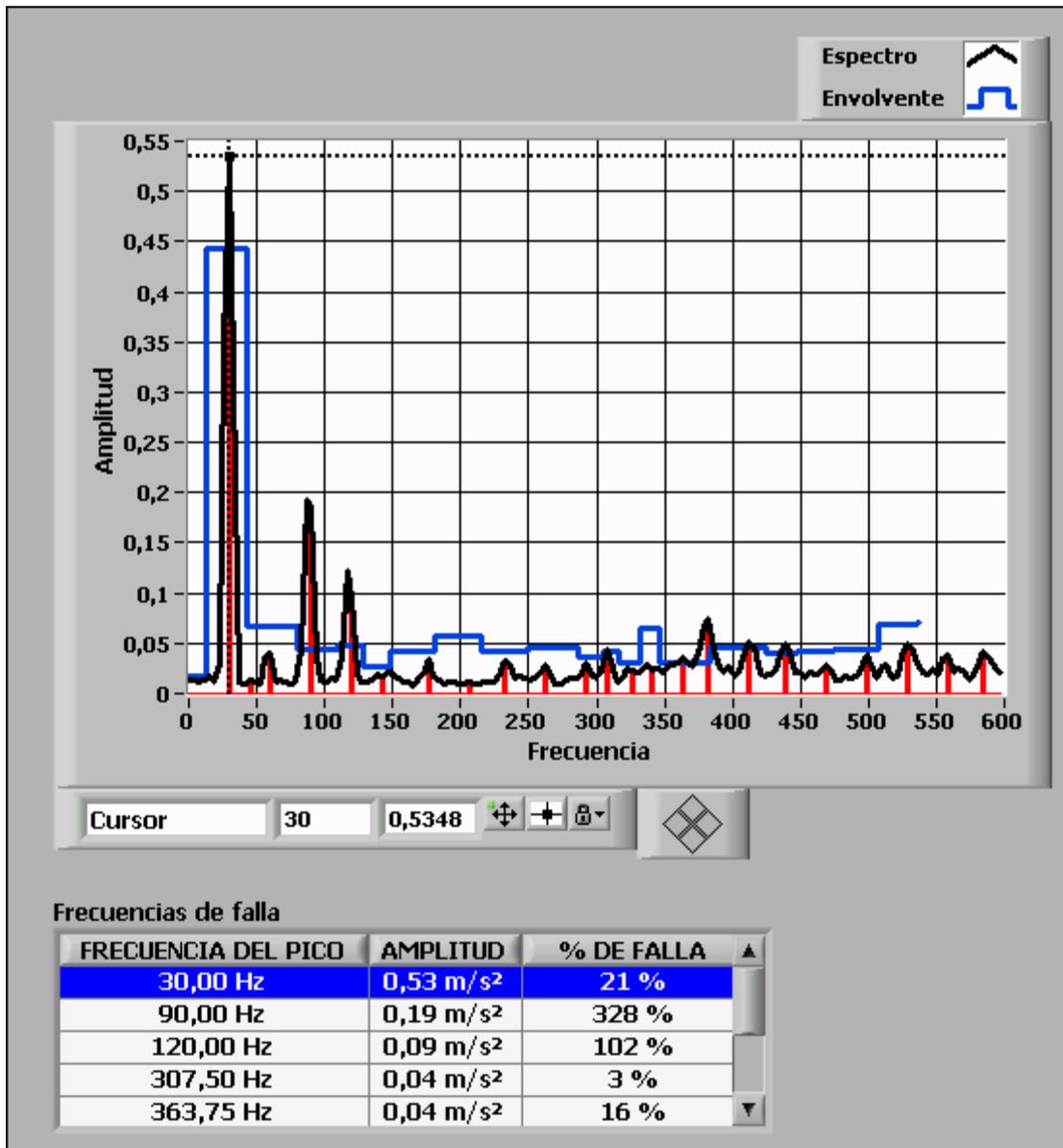


Figura 4.17. Análisis del espectro del motor de inducción de la segunda prueba.

En el análisis espectral (figura 4.17) se observa que sobresalen 3 picos a las frecuencias de 30, 90 y 120. El primer armónico indica que se trata de un problema de desbalance, los otros dos picos también pueden ser consecuencia del desbalance y no puede darse un diagnóstico. Se debe corregir el problema de desbalance y realizar un nuevo análisis para observar si estos picos siguen presentes.

MOTORES DE DC

Para esta prueba se tomaron datos de una máquina DC (funcionando como motor), el espectro se muestra (figura 4.18). La primera prueba consistió en simular una falla en uno de los diodos del puente rectificador y en la segunda se simuló un problema de desbalanceo.

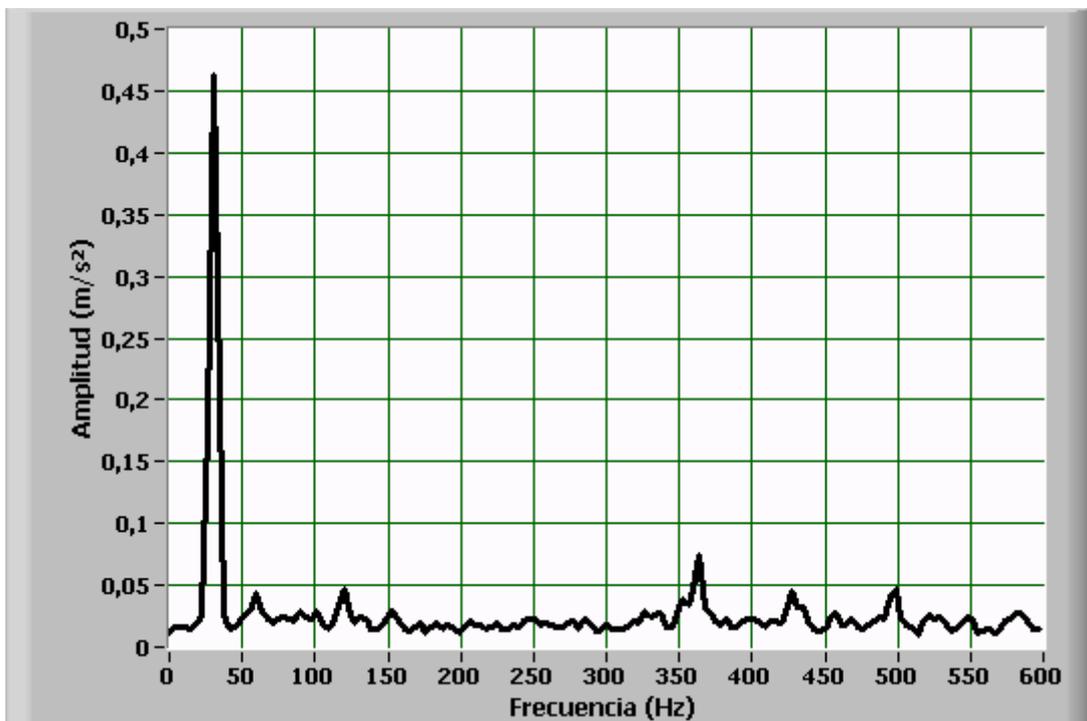


Figura 4.18. Espectro de un motor DC en buen estado.

PRIMERA PRUEBA

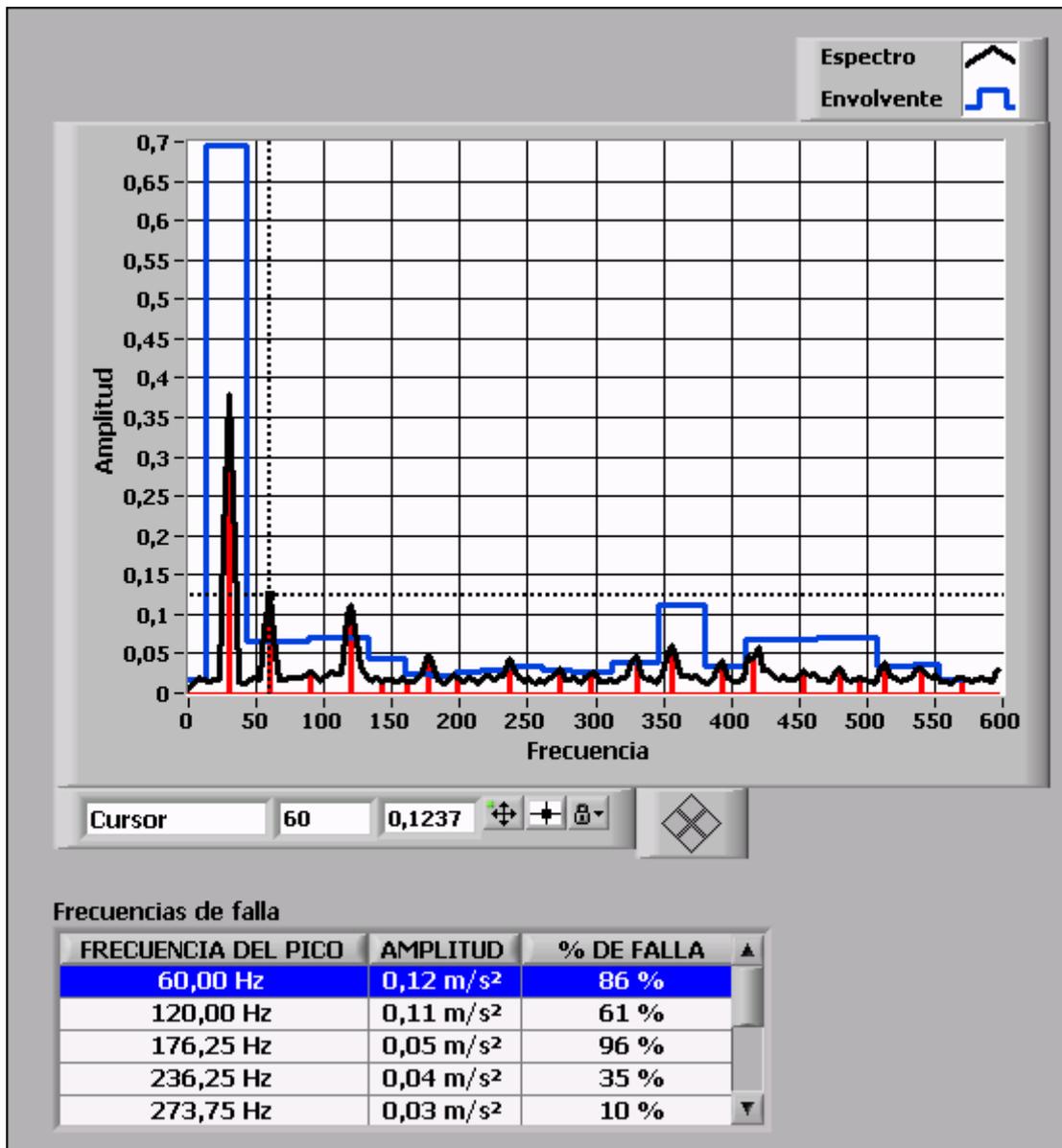


Figura 4.19. Análisis del espectro del motor DC de la primera prueba.

En el análisis (figura 4.19) se observa que se producen picos en 60 Hz y 120 Hz (la frecuencia de línea y su segundo armónico) que indican que la falla se debe a un diodo o SCR en mal estado.

SEGUNDA PRUEBA

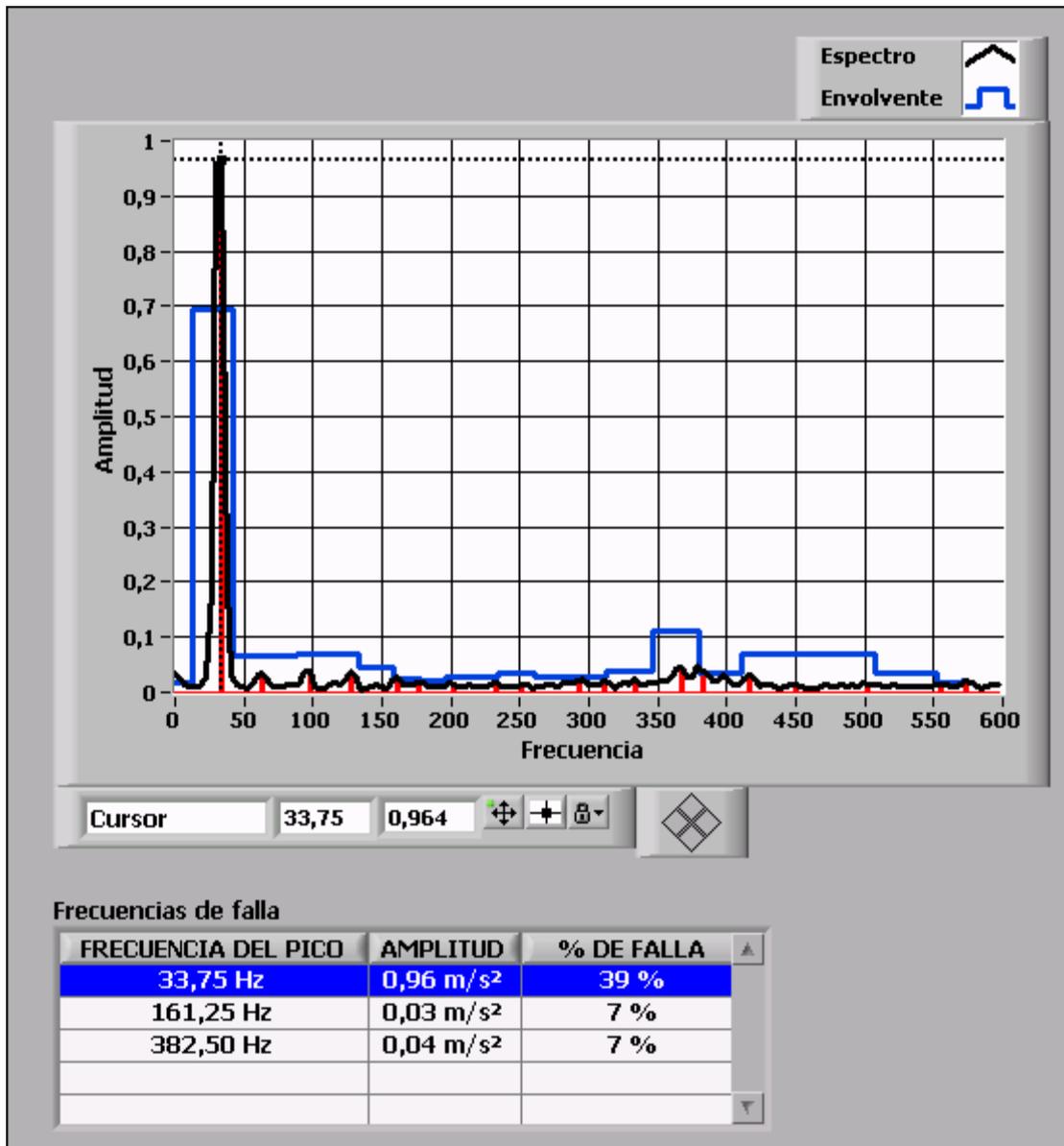


Figura 4.20. Análisis del espectro del motor DC de la segunda prueba.

El pico a la velocidad de giro del motor (figura 4.20) muestra un problema de desbalance.

MOTOR MONOFÁSICO

El espectro característico de un motor monofásico siempre presenta un pico el doble de la frecuencia de línea (120 Hz), como se muestra en la figura 4.21. Esta prueba consistió en provocar un desbalance en el eje.

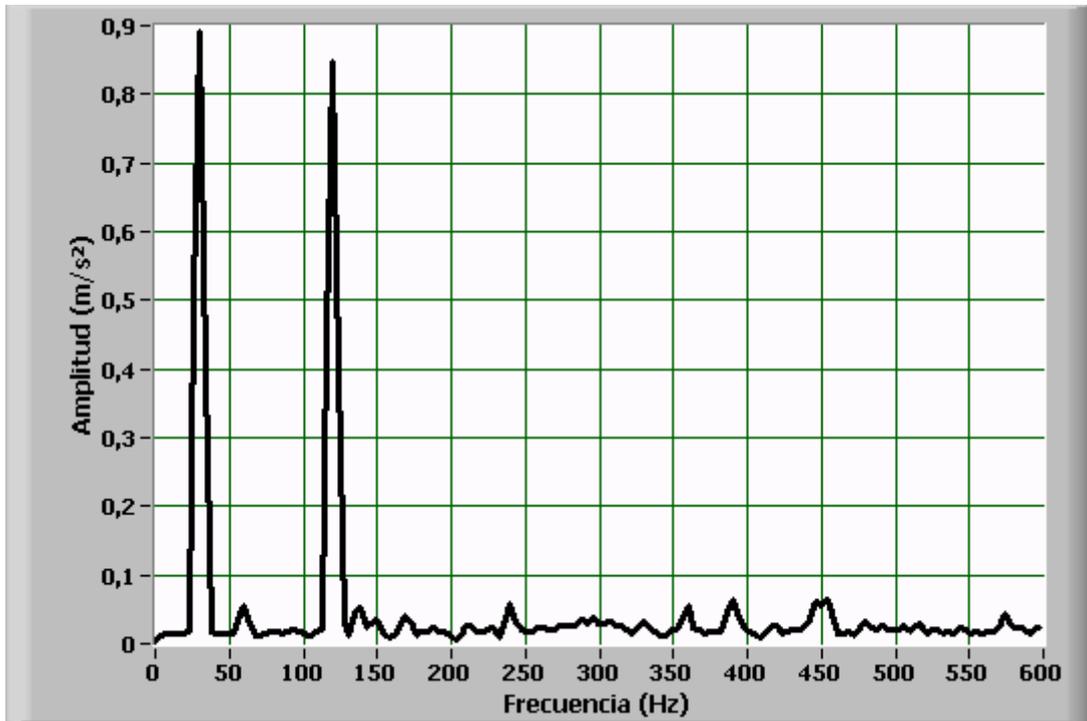


Figura 4.21. Espectro de un motor monofásico en buen estado.

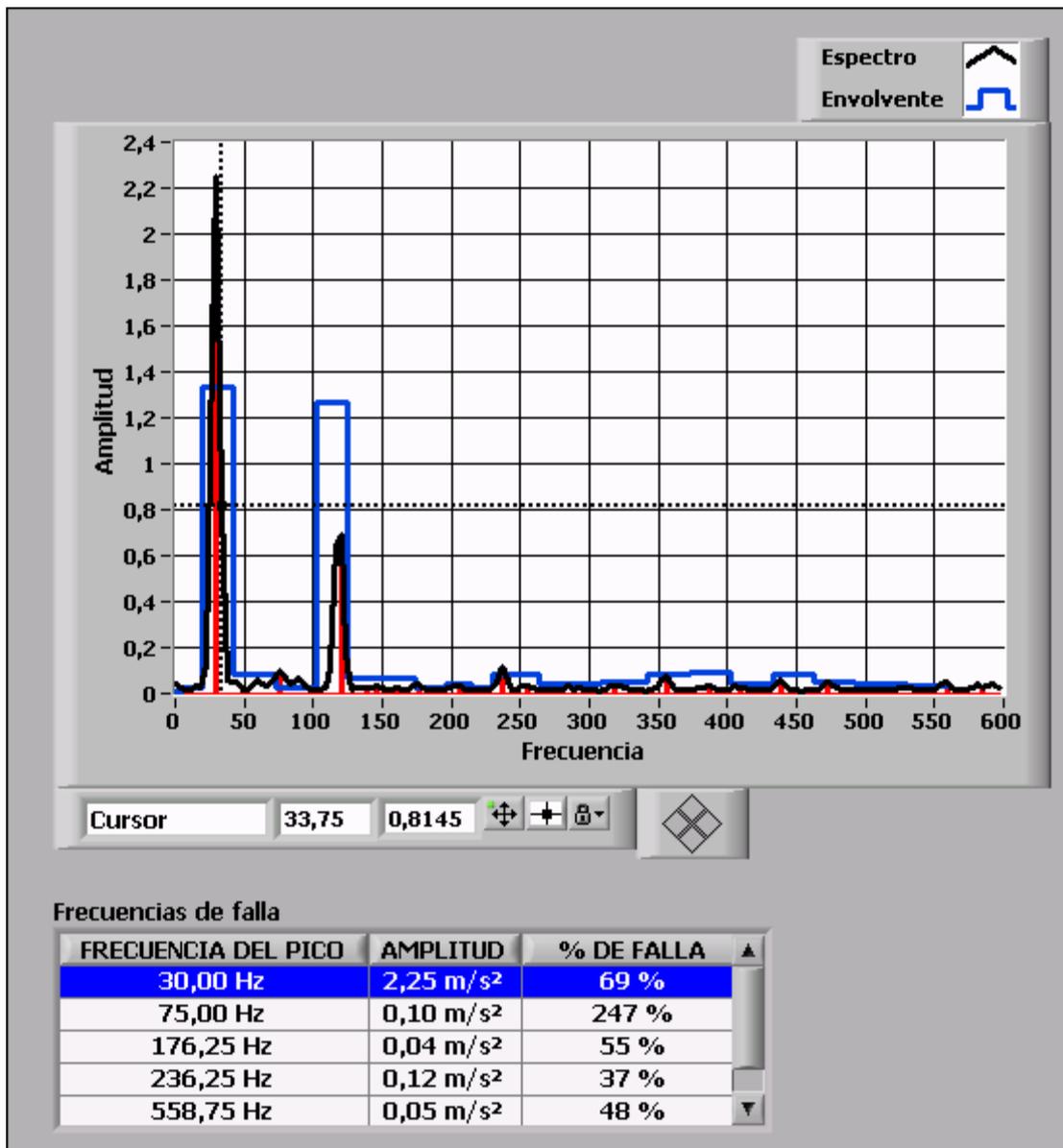


Figura 4.22. Análisis del espectro del motor monofásico con falla.

El pico a la velocidad de giro (figura 4.22) muestra un grave problema de desbalance.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- ✓ Como conclusión general, se puede decir que se ha diseñado e implementado un sistema de adquisición de datos de vibración y un software de análisis espectral, que permiten diagnosticar fallas relacionadas con máquinas rotatorias.
- ✓ Se ha construido un hardware para adquisición de datos eficiente y de bajo costo, empleando el microcontrolador PIC18F452 y los sensores de aceleración ADXL202EB que son elementos de fácil adquisición en el mercado local.
- ✓ El software de adquisición y procesamiento de datos se elaboró utilizando el lenguaje de programación LabVIEW. Esta herramienta cumplió satisfactoriamente con todos los requerimientos del proyecto gracias al potente manejo de los recursos del computador y a la excelente interfase gráfica.
- ✓ El análisis e interpretación de señales de vibración en el dominio del tiempo es un procedimiento sumamente complejo. Sin embargo, el análisis en el dominio de la frecuencia, mediante el uso de la Transformada Rápida de Fourier, permite que la información se presente en una forma clara y comprensible.

- ✓ Se realizaron dos tipos de análisis. El primero consiste en utilizar el espectro de una máquina en buen estado como patrón, este método se emplea principalmente en el análisis de grupos de máquinas con las mismas características funcionales. En el segundo se toman espectros periódicos de la misma máquina y se los compara con espectros anteriores, este método es muy útil para la detección temprana de fallas.
- ✓ El análisis espectral de vibraciones es un método muy eficaz para la detección e identificación de fallas en maquinaria rotatoria y puede ser de gran importancia en la industria si se complementa con un adecuado programa de mantenimiento.

RECOMENDACIONES

- ✓ Cuando un circuito electrónico opera junto a motores eléctricos está expuesto a altos niveles de ruido, para reducir este problema es recomendable colocar capacitores en cada circuito integrado.
- ✓ Para cada adquisición de datos de vibración, es muy importante situar el elemento sensor en la misma dirección y en un solo punto de la máquina rotatoria, de esta manera se obtienen datos más uniformes, sobretodo en espectros históricos.
- ✓ Cada vez que se realice la recopilación de datos para un análisis histórico, es importante que la máquina opere en las mismas condiciones de carga y velocidad.

- ✓ En máquinas que trabajen bajo condiciones críticas es recomendable realizar un control vibracional periódico, de ésta manera se puede detectar y corregir oportunamente posibles fallas.

- ✓ Al adquirir una nueva máquina es recomendable tomar el patrón de vibración, que será de mucha utilidad para realizar un diagnóstico de fallas durante su vida útil.

- ✓ Los errores de comunicación son muy comunes cuando se transmite a altas velocidades y se opera en ambientes ruidosos, por esta razón es necesario disponer de un método de detección de errores.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Curso de Análisis Vibracional Intermedio. ADEMINSA - Módulo 2.
- ✓ Manés Fernández Cabanas. Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas.
- ✓ ADXL202EB Data Sheet. Analog Devices.
- ✓ W. Stallings – Comunicaciones y Redes de Computadores.
- ✓ PIC 18FXX2 Data Sheet. Microchip Technology Inc.
- ✓ Sumit Mitra, Stan D'Souza, Russ Cooper. Asynchronous Communications with the PICmicro® USART. AN774, Microchip Technology Inc.
- ✓ Mike Garbutt. Using the Analog to Digital Converter. AN546, Microchip Technology Inc.
- ✓ Introduction to Data Acquisition. The MATHWORKS Inc.
- ✓ LabVIEW Analysis Concepts. National Instruments.
- ✓ Steven W. Smith. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.

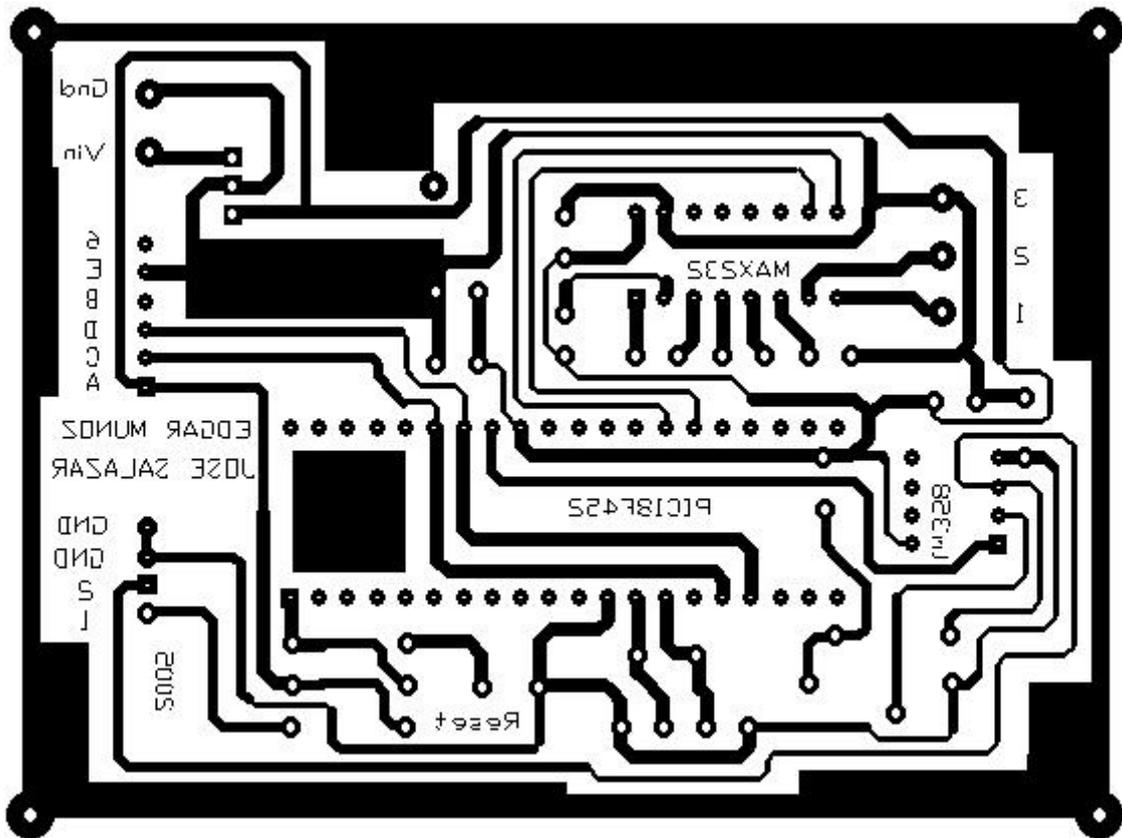
ENLACES

- ✓ <http://www.microchip.com>
- ✓ <http://www.beyondlogic.org>
- ✓ <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/glenn espanol-index.htm>
- ✓ <http://www.analog.com>

ANEXO A

CIRCUITO IMPRESO DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

CIRCUITO IMPRESO DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS



ANEXO B

CÓDIGO FUENTE DEL PIC18F452


```
CCPR1H_1, CCPR1L_1
CCPR2H_1, CCPR2L_1
```

```
ENDC
```

```
VelocidadH EQU 0xFE
VelocidadL EQU 0xFF
```

```
.*****
```

```
;
;Reset vector
; This code will start executing when a reset occurs.
```

```
ORG 0x0000
```

```
goto Main ;go to start of main code
```

```
.*****
```

```
;High priority interrupt vector
; This code will start executing when a high priority interrupt occurs or
; when any interrupt occurs if interrupt priorities are not enabled.
```

```
ORG 0x0008
```

```
bra HighInt ;go to high priority interrupt routine
```

```
.*****
```

```
;Low priority interrupt vector and routine
; This code will start executing when a low priority interrupt occurs.
; This code can be removed if low priority interrupts are not used.
```

```
ORG 0x0018
```

```
movff STATUS,STATUS_TEMP ;save STATUS register
movff WREG,WREG_TEMP ;save working register
movff BSR,BSR_TEMP ;save BSR register
```

```
; *** low priority interrupt code goes here ***
```

```
btfs PIE2, TMR3IE
bra $+6
btfs PIR2, TMR3IF
rcall interrup_t3
```

```
btfs PIE1, RCIE
bra $+6
btfs PIR1, RCIF
rcall interrup_rc
```

```
btfs PIE1, TXIE
bra $+6
btfs PIR1, TXIF
rcall interrup_tx
```

```
movff BSR_TEMP,BSR ;restore BSR register
movff WREG_TEMP,WREG ;restore working register
movff STATUS_TEMP,STATUS ;restore STATUS register
retfie
```

```

;*****
;
;High priority interrupt routine
; The high priority interrupt code is placed here to avoid conflicting with
; the low priority interrupt vector.

```

HighInt:

```

;      *** high priority interrupt code goes here ***
      btfss  INTCON, INT0IE
      bra    $+6
      btfsc  INTCON, INT0IF
      rcall  INTERRUP_INT0      ; Ir a rutina de interrupción
                                ; externa 0

      btfss  INTCON3, INT1IE
      bra    $+6
      btfsc  INTCON3, INT1IF
      rcall  INTERRUP_INT1      ; Ir a rutina de interrupción
                                ; externa 1

      btfss  INTCON3, INT2IE
      bra    $+6
      btfsc  INTCON3, INT2IF
      rcall  INTERRUP_INT2      ; Ir a rutina de interrupción
                                ; externa 2

      btfss  PIE1, CCP1IE
      bra    $+6
      btfsc  PIR1, CCP1IF
      rcall  INTERRUP_CCP1      ; Ir a rutina de interrupción
                                ; por módulo CCP1

      btfss  PIE2, CCP2IE
      bra    $+6
      btfsc  PIR2, CCP2IF
      rcall  INTERRUP_CCP2      ; Ir a rutina de interrupción
                                ; por módulo CCP2

      retfie FAST

```

```

;*****
;
;Start of main program
; The main program code is placed here.

```

Main:

```

;      *** main code goes here ***

```

```

;*****
;
; INICIALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE PUERTOS
;*****
;
      clrf  LATA
      clrf  LATB
      clrf  LATC
      clrf  LATD
      clrf  LATE
      movlw b'11111000'

```

```
movlw TRISB
movlw b'10111111'
movwf TRISC
```

```
*****
;
; CONFIGURACIÓN DEL PUERTO SERIAL
;
*****
```

```
movlw .64 ; Configuración del BRG para
movwf SPBRG ; 38400

movlw b'00100100' ; Configuración del módulo
movwf TXSTA ; de transmisión serie

movlw b'10010000' ; Habilitar puerto serie,
movwf RCSTA
```

```
*****
;
; CONFIGURACIÓN DEL TIMER1 y TIMER3
;
*****
```

```
movlw b'00100001'
movwf T3CON

movlw b'00000001'
movwf T1CON
```

```
*****
;
; CONFIGURACIÓN DE LOS MODULOS CCP1 Y CCP2
;
*****
```

```
movlw b'00000100'
movwf CCP1CON
movwf CCP2CON
```

```
*****
;
; CONFIGURACIÓN DE INTERRUPTOS
;
*****
```

```
movlw b'00110000' ; Configurar flancos de
movwf INTCON2 ; interrupción externa

movlw b'11000000' ; Configurar niveles de prioridad
movwf INTCON3 ; de interrupciones externas

movlw b'00000100' ; Configurar nivel de prioridad
movwf IPR1 ; de interrupción CCP1

movlw b'00000001' ; Configurar nivel de prioridad
movwf IPR2 ; de interrupción CCP2

bsf PIE1, RCIE ; Habilitar interrupción por recepción
; USART

bsf PIE2, TMR3IE ; Habilitar interrupción por recepción
; por Timer3

bsf RCON, IPEN ; Habilitar niveles de prioridad
; de interrupciones

movlw b'11010000' ; Habilitación General de Interrupciones,
movwf INTCON ; Interrupción por Timer0 e
; Interrupciones de periféricos
```

```

bra    $

;    *** main code goes here ***

.*****
;
.*****
;
; RUTINA DE INTERRUPCIÓN EXTERNA 0
.*****
;
INTERRUP_INT0
    infsnz  VueltasL, f
    incf    VueltasH, f

fin_int0
    bcf     INTCON, INT0IF
    return

.*****
;
; RUTINA DE INTERRUPCIÓN EXTERNA 1
.*****
;
INTERRUP_INT1
    bcf     PIR1, CCP1IF
    bsf     PIE1, CCP1IE
    bcf     INTCON3, INT1IF
    movff   TMR1L, CCPR1L_1
    movff   TMR1H, CCPR1H_1

    return

.*****
;
; RUTINA DE INTERRUPCIÓN POR MÓDULO CCP1
.*****
;
INTERRUP_CCP1
    movf    CCPR1L_1, W
    subwf  CCPR1L, f
    movf    CCPR1H_1, W
    subwfb CCPR1H, f

    movff   CCPR1H, INDF0      ; Almacenar el byte menos significativo
    infsnz  FSR0L, f          ; Incrementar puntero
    incf    FSR0H, f          ; de datos

    movff   CCPR1L, INDF0      ; Almacenar el byte menos significativo

    infsnz  FSR0L, f          ; Incrementar puntero
    incf    FSR0H, f          ; de datos

    movlw   0x03              ; Verificar si se han
    cpfseq  FSR0H             ; adquirido 160 muestras
    bra     FIN_CCP1
    movlw   0x80
    cpfseq  FSR0L
    bra     FIN_CCP1

    incf    Inicio_TX, f
    bcf     INTCON3, INT1IE    ; Deshabilitar interrupción

```

```

        bcf    PIE1, CCP1IE        ; externa 1

        movlw 0x02
        cpfseq Inicio_TX          ; Iniciar Transmisión de datos
        bra   FIN_CCP1

        bsf    PIE1, TXIE         ; Habilitar interrupción
                                       ; por transmisión USART

FIN_CCP1
        bcf    PIR1, CCP1IF
        return

```

```

;*****
;
; RUTINA DE INTERRUPCIÓN EXTERNA 2
;*****
;
; INTERRUPT_INT2
        bcf    PIR2, CCP2IF
        bsf    PIE2, CCP2IE
        bcf    INTCON3, INT2IF

        movff TMR1L, CCPR2L_1
        movff TMR1H, CCPR2H_1

        return

```

```

;*****
;
; RUTINA DE INTERRUPCIÓN POR MÓDULO CCP2
;*****
;
; INTERRUPT_CCP2
        movf  CCPR2L_1, W
        subwf CCPR2L, f
        movf  CCPR2H_1, W
        subwfb CCPR2H, f

        movff CCPR2H, INDF1
        infsnz FSR1L, f
        incf  FSR1H, f
        movff CCPR2L, INDF1
        infsnz FSR1L, f
        incf  FSR1H, f
        movlw 0x06
        cpfseq FSR1H
        bra   FIN_CCP2
        movlw 0x00
        cpfseq FSR1L
        bra   FIN_CCP2
        incf  Inicio_TX, f

        bcf    INTCON3, INT2IE
        bcf    PIE2, CCP2IE

        movlw 0x02
        cpfseq Inicio_TX
        bra   FIN_CCP2
        bsf    PIE1, TXIE        ; Habilitar interrupción
                                       ; por transmisión USART

```

```

FIN_CCP2

```

```
bcf    PIR2, CCP2IF
return
```

```
Timer3=-0xC34B      ; Valor de inicialización del Timer3
;*****
```

```
; RUTINA DE INTERRUPCIÓN POR TIMER0
;*****
```

```
interrup_t3
    nop
    nop
    movlw HIGH Timer3
    movwf TMR3H
    movlw LOW Timer3
    movwf TMR3L
    decfsz Cont_10ms, f
    bra    fin_t3
    movff  VueltasL, VelocidadL
    movff  VueltasH, VelocidadH

    clrf   VueltasL
    clrf   VueltasH

    movlw .50
    movwf Cont_10ms
```

```
fin_t3
    bcf    PIR2, TMR3IF
    return
```

```
;*****
; RUTINA DE INTERRUPCIÓN POR RECEPCIÓN USART
;*****
```

```
interrup_rc
    movf   RCREG, W

    bcf    INTCON3, INT1IF
    bcf    INTCON3, INT2IF
    bsf    INTCON3, INT1IE
    bsf    INTCON3, INT2IE

    clrf   Inicio_TX

    lfsr   0, 0x100      ; Inicializar puntero de datos
                        ; del eje Y
    lfsr   1, 0x380      ; Inicializar puntero de datos
                        ; del eje X
    lfsr   2, 0x0FE      ; Inicializar puntero de datos
                        ; de transmisión

    return
```

```
;*****
; RUTINA DE INTERRUPCIÓN POR TRANSMISIÓN USART
;*****
```

```
interrup_tx
    movf   INDF2, W
    movwf  TXREG
    infsnz FSR2L, f
    incf   FSR2H, f
```

```
movlw 0x06
cpfseq FSR2H
return
movlw 0x00
cpfseq FSR2L
return
bcf    PIE1, TXIE
return
```

```
.*****
;
;End of program
      END
```

ANEXO C

CÓDIGO FUENTE DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS

DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PANTALLA PRINCIPAL DE ANÁLISIS

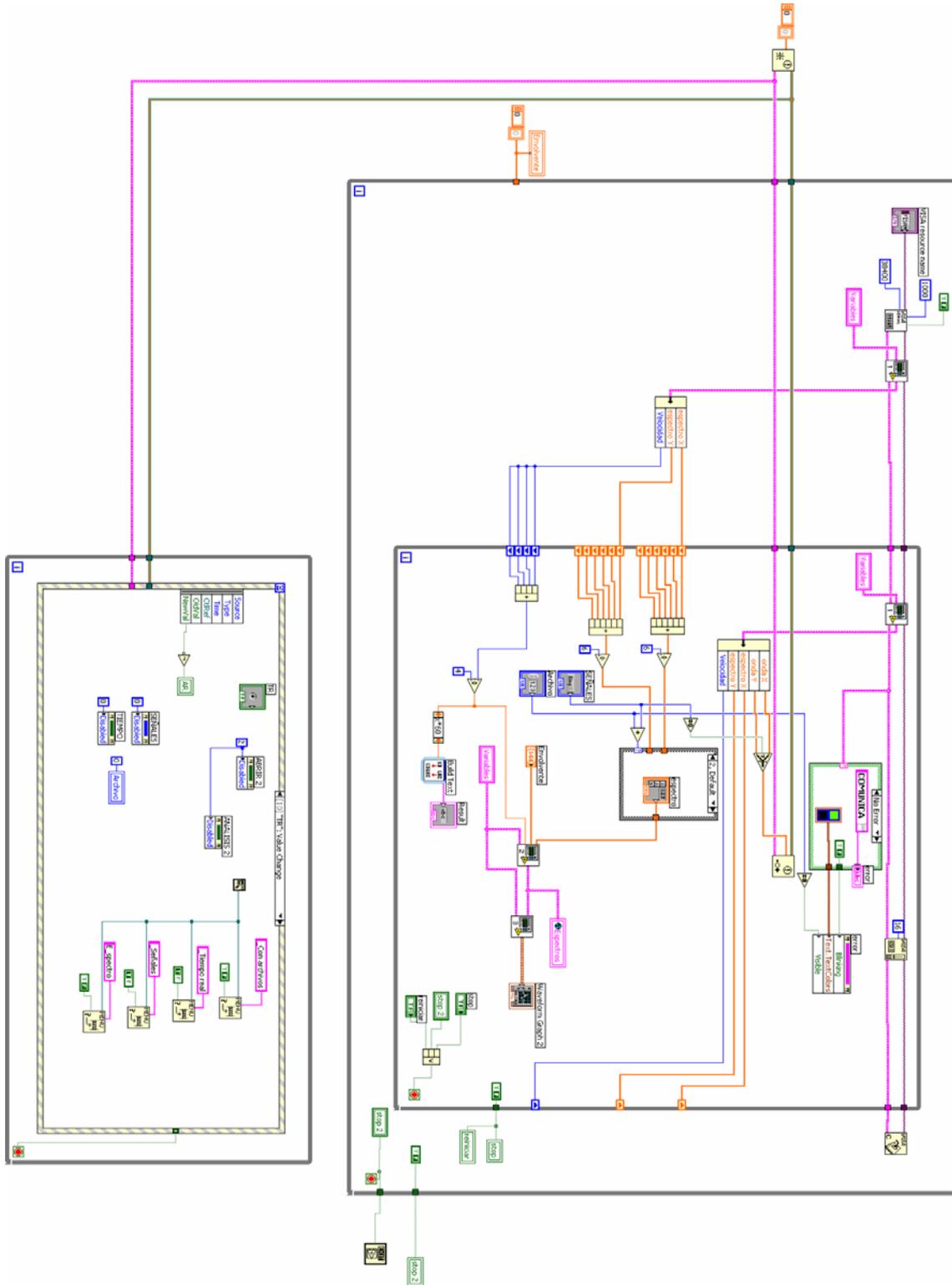


DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PANTALLA DE ANÁLISIS DE ENVOLVENTE

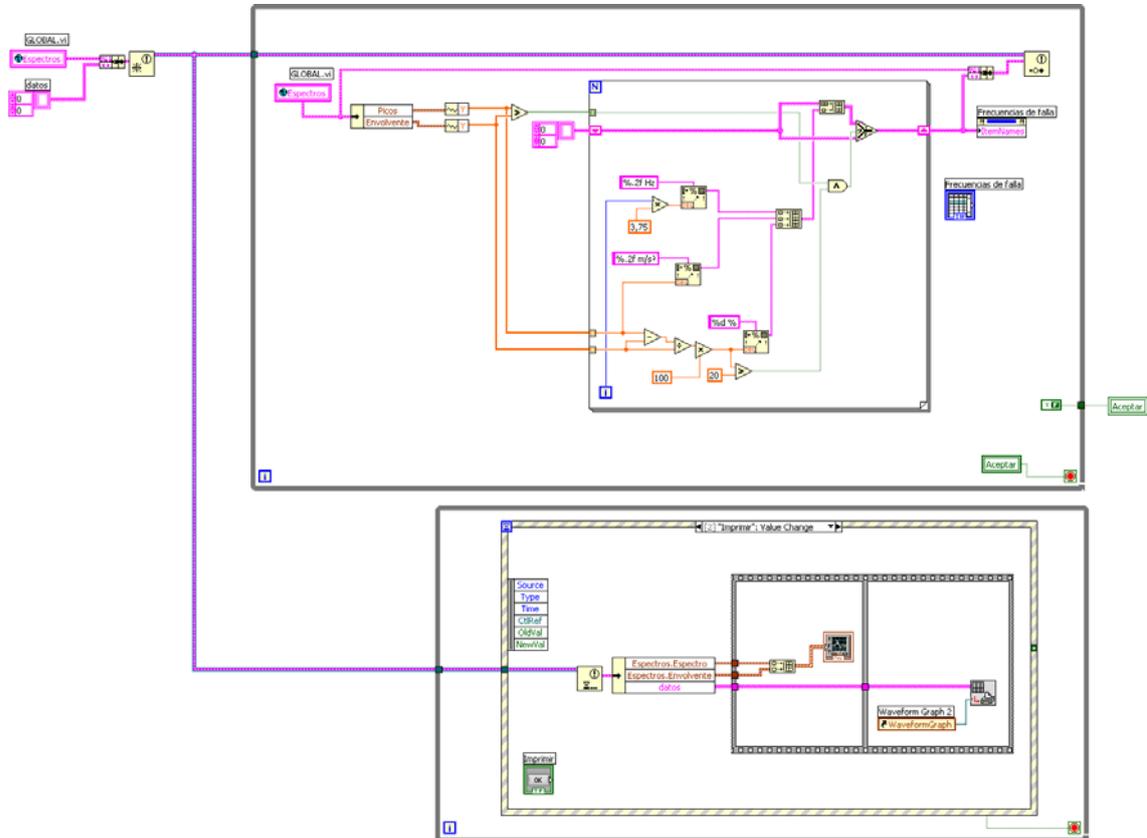


DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PANTALLA DE ANÁLISIS HISTÓRICO

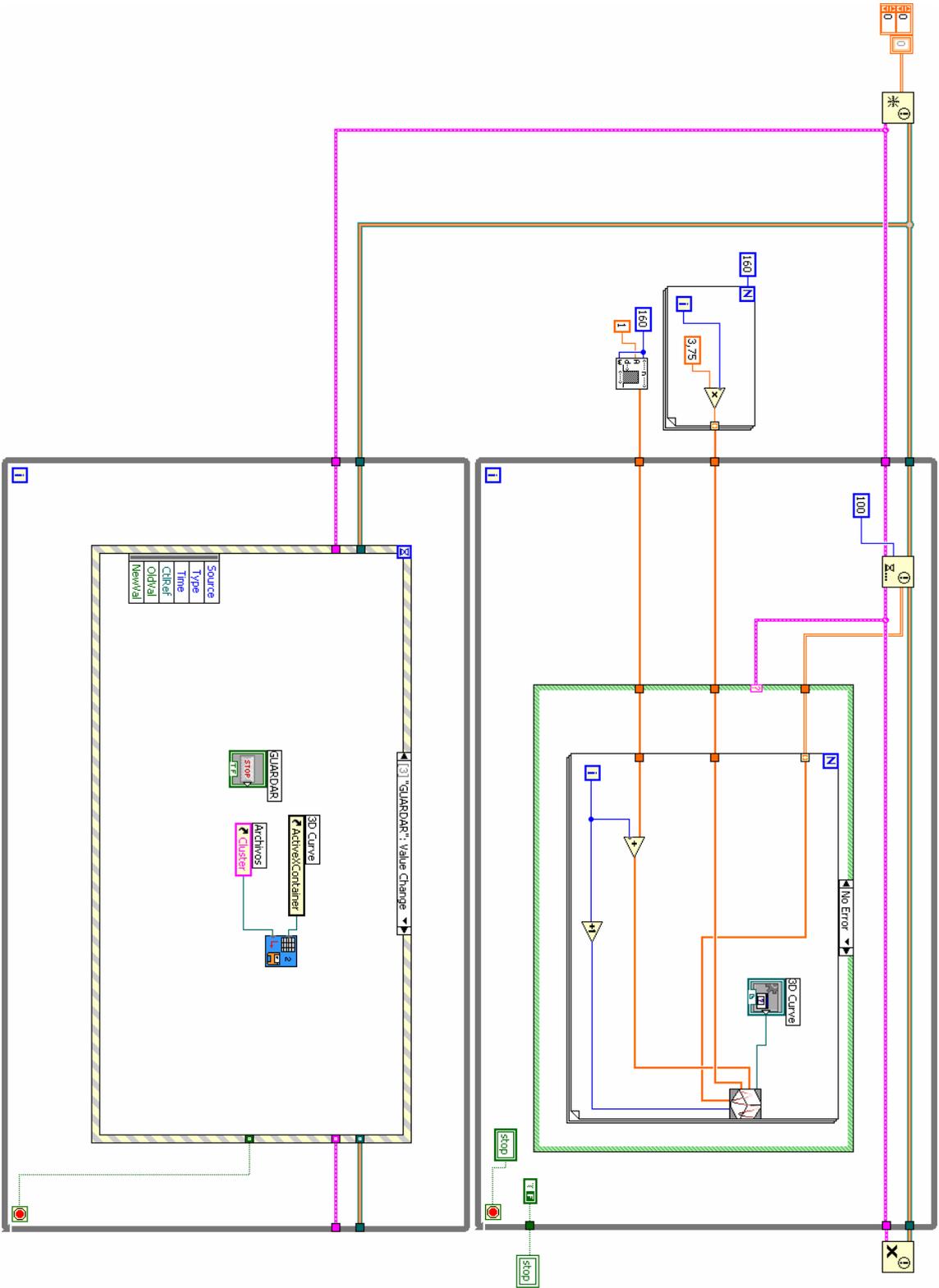
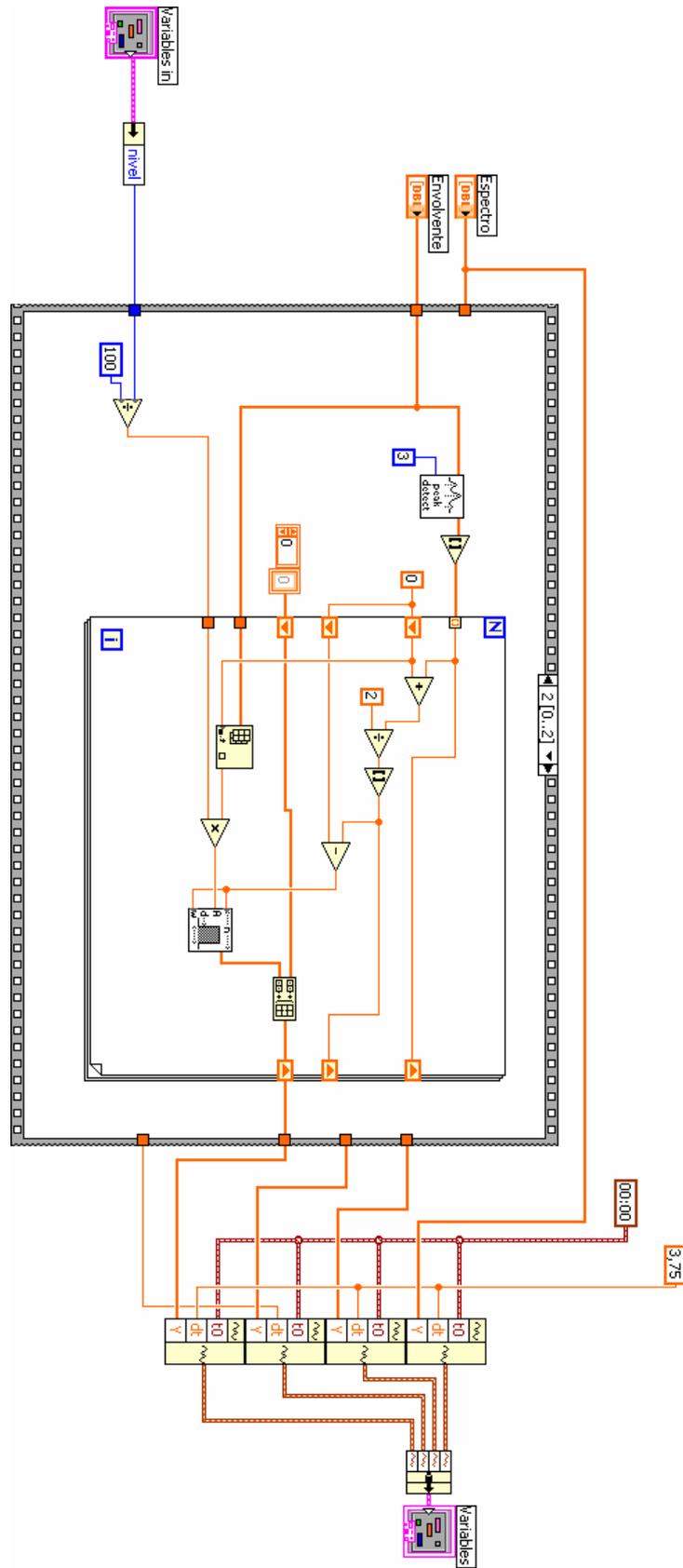


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SUB VI DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS



ANEXO D

MANUAL DE USUARIO

MANUAL DE USUARIO

1. HARDWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS

A continuación se detallan los pasos para conectar el hardware de adquisición de datos:

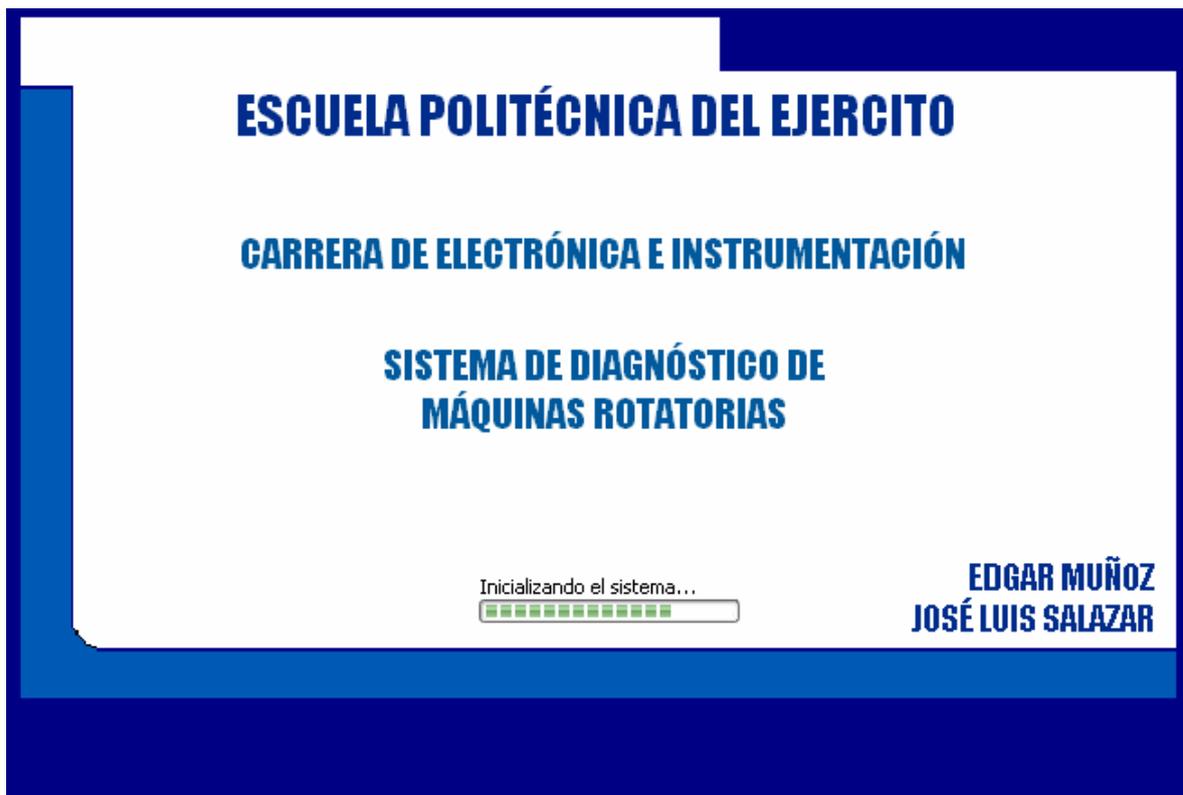
- 1) Conectar el acelerómetro. Asegúrese que los conectores estén en la posición correcta tanto en el acelerómetro como en la tarjeta de adquisición de datos.
- 2) Conectar el puerto serial en la tarjeta y en la PC. Algunas PCs tienen varios puertos seriales, en este caso se debe conocer la identificación de cada puerto (COM1, COM2, etc.).
- 3) Ejecute software de aplicación y en la *ventana de configuración* del seleccione el puerto de comunicación adecuado.
- 4) Aplique energía a la tarjeta y observe que en el software aparezca el mensaje *COMUNICACIÓN OK*.

2. SOFTWARE DE APLICACIÓN

La interfase con el usuario se describe a continuación.

1) PANTALLA DE PRESENTACIÓN

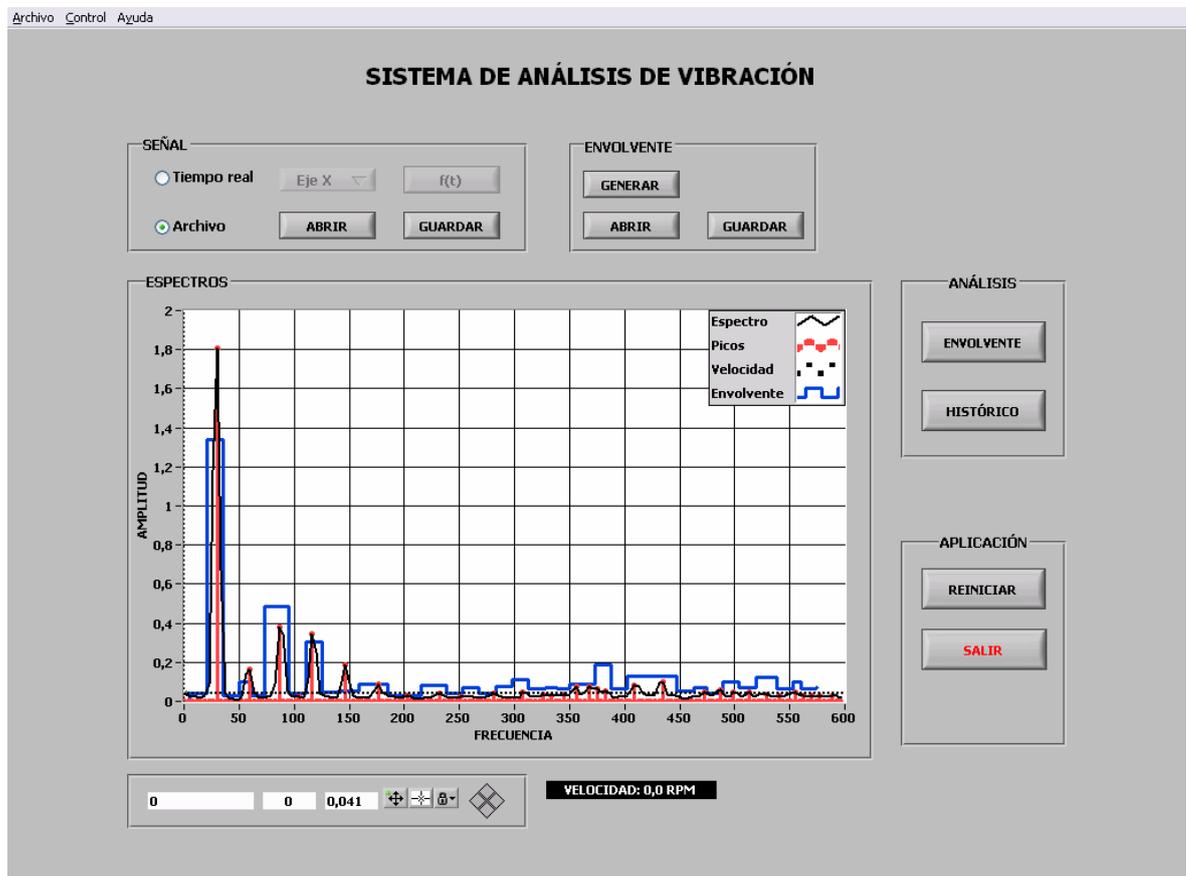
Muestra la información general del proyecto, busca los recursos disponibles e inicializa el sistema.



2) PANTALLA PRINCIPAL DE ANÁLISIS

Esta pantalla permite observar la firma de vibración. Dispone cuatro grupos de controles:

- ✓ SEÑAL
- ✓ ENVOLVENTE
- ✓ ANÁLISIS
- ✓ APLICACIÓN



GRUPO DE CONTROLES SEÑAL

<input checked="" type="radio"/> Tiempo real	
<input type="radio"/> Archivo	
Eje X ▾	Seleccionar el eje del acelerómetro
ABRIR	Abrir archivos de espectro previamente guardados.
GUARDAR	Guardar el espectro actual en un archivo.
f(t)	Mostrar pantalla de la señal en el dominio del tiempo.

GRUPO DE CONTROLES ENVOLVENTE

GENERAR	Generar el envolvente patrón a partir de las amplitudes pico del espectro actual.
ABRIR	Abrir archivos de envolvente previamente guardados.
GUARDAR	Guardar el envolvente actual en un archivo.

GRUPO DE CONTROLES ANÁLISIS

ENVOLVENTE	Abrir la ventana de análisis de envolvente.
HISTÓRICO	Abrir la ventana de análisis histórico.



Cierra la ventana y regresa a la pantalla principal.



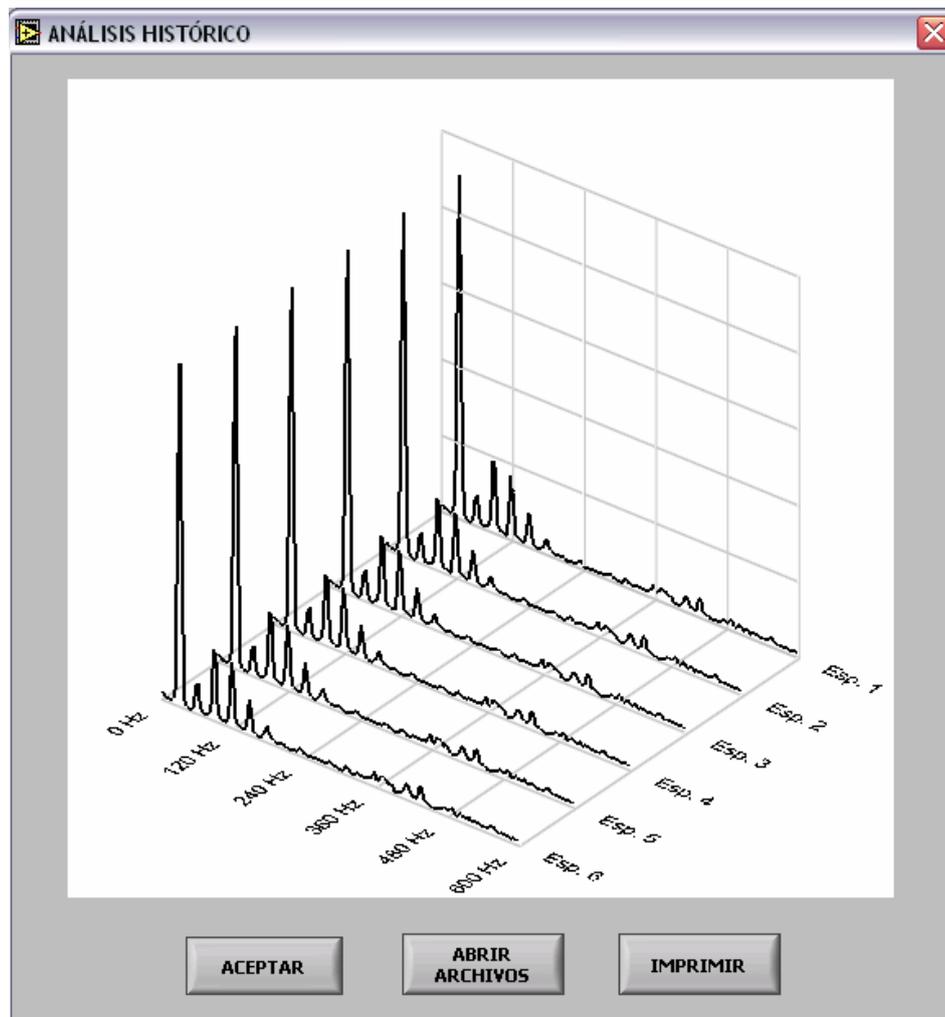
Guarda el reporte del análisis en un documento HTML.



Abre la ventana de opciones de impresión del reporte.

4) PANTALLA DE ANÁLISIS HISTÓRICO

Se pueden mostrar hasta 6 curvas en un gráfico 3D. Esta ventana es muy útil para detectar variaciones en los espectros, tomados en intervalos periódicos en la misma máquina.



BOTONES DE LA PANTALLA DE ANÁLISIS HISTÓRICO



Cierra la ventana y regresa a la pantalla principal.



Abre la ventana de selección de archivos de espectro.



Guarda el reporte del análisis en un documento HTML.



Abre la ventana de opciones de impresión del reporte.

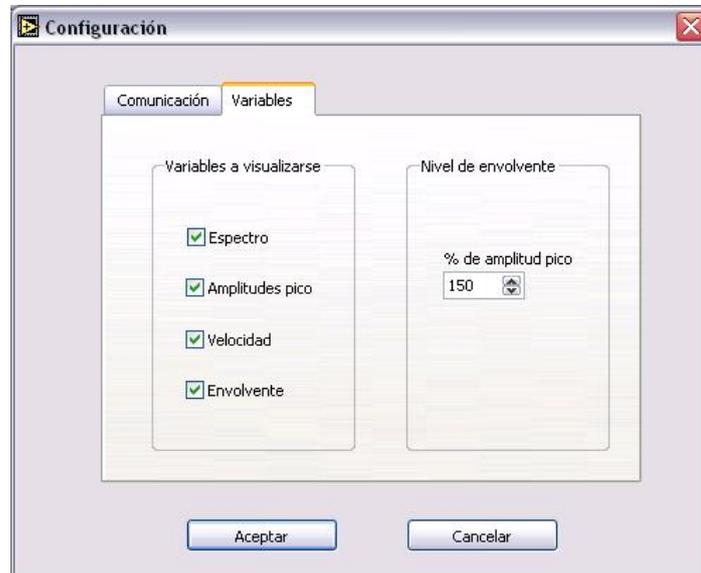
5) VENTANA DE CONFIGURACIÓN

Ingresando por el menú *Control>Configuración...*, se accede a la pantalla de configuración.

Comunicación. Aquí se puede seleccionar el puerto serial de comunicación también se habilita la detección de errores por medio del CRC.



Variables. En esta pestaña se seleccionan las variables: espectro, amplitudes pico, velocidad y envolvente que serán visualizadas en la pantalla de análisis y el porcentaje de tolerancia de la envolvente.



3. SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

PROBLEMA	POSIBLE SOLUCIÓN
1) Aparece todo el tiempo el mensaje <i>ERROR DE COMUNICACIÓN</i> .	<ul style="list-style-type: none">✓ Revisar el nivel de voltaje de la fuente de alimentación. Debe ser por lo menos de 7V.✓ Revisar el cable y los conectores del acelerómetro.✓ Revisar el cable de comunicación. Su longitud no debe exceder los 2m.✓ Comprobar, en la <i>ventana de configuración</i>, que el puerto seleccionado es el correcto.✓ Es posible que otra aplicación esté utilizando el puerto de comunicación. Cierre esta aplicación y presione el botón <i>REINICIAR</i>.
2) Aparecen los mensajes <i>ERROR DE COMUNICACIÓN</i> y <i>COMUNICACIÓN OK</i> alternadamente.	<ul style="list-style-type: none">✓ Siga las sugerencias del problema 1.✓ Este problema es común en ambientes muy ruidosos. Desactive la detección de errores en la <i>ventana de configuración</i>. Si bien el problema puede solucionarse, es posible que los datos recibidos sean incorrectos.
3) La pantalla principal no aparece completa.	<ul style="list-style-type: none">✓ Este programa ha sido diseñado para operar con una resolución de video de 1024x768 píxeles. Configurar el monitor para esta resolución.