



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
ESPE – LATACUNGA  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E  
INSTRUMENTACIÓN

PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA E  
INSTRUMENTACIÓN

**“DIAGNOSTICO DE MOTORES ELECTRICOS DE  
INDUCCION JAULA DE ARDILLA MEDIANTE EL  
ANALISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES BAJO  
LABVIEW”**

*DIANA TOSCANO*

Latacunga-Ecuador  
2005

## **CERTIFICACION**

**Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por la Sra. Diana Toscano, bajo nuestra supervisión.**

**Ing. Galo Ávila**  
**DIRECTOR DE TESIS**

**Ing. Julio Acosta**  
**CODIRECTOR DE TESIS**

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento va dirigido principalmente a Dios ya que me dio el regalo máspreciado que es la vida y mi familia para disfrutarla a plenitud.

No puedo dejar de lado mi profunda gratitud a la prestigiosa Escuela Politécnica del Ejército Sede Latacunga especialmente a los señores profesores Ing. Galo Ávila e Ing. Julio Acosta.

Mi reconocimiento imperecedero a todas mis familiares y amigos que me supieron guiar y apoyar en todo el camino de mi carrera estudiantil, para aplicarlo en el diario vivir en beneficio de mi engrandecimiento y desarrollo.

Diana Toscano

## **DEDICATORIA**

Este modesto trabajo de investigación que sirvió como mi tesis de grado o previa mi graduación como Ingeniera en Ejecución y Electrónica dedico quienes me inspiraron para culminar mi carrera; mi esposo Blass, mi hijo Josué, mi hija Camila. Así como también a mis padres y hermanos que me acompañaron en los momentos trascendentales de mi carrera estudiantil, pero muy especialmente a mi hermana Geoconda ya que sin su sacrificio no hubiera podido llegar hasta aquí.

Diana Toscano

# INDICE GENERAL

CONTENIDO	Pag.
<b>INTRODUCCION</b>	
<b>CAPITULO I</b>	
<b>MOTORES DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA.</b>	
1.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN.... 2
1.2	FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN..... 4
1.3	RESUMEN DE ECUACIONES DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN..... 5
1.3.1	Potencia de pérdidas en el rotor..... 5
1.3.2	Potencia de pérdidas en el estator..... 5
1.3.3	Potencia mecánica en el eje del rotor..... 6
1.3.4	Par del motor de inducción..... 6
1.4	OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN..... 8
1.5	EL ARRANQUE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN..... 8
1.6	MOTOR DE INDUCCIÓN CON ROTOR JAULA DE ARDILLA..... 10
1.7	CLASIFICACIÓN DE MOTORES JAULA DE ARDILLA POR SUS PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS..... 14
1.8	CLASIFICACIÓN DE MOTORES JAULA DE ARDILLA DE ACUERDO CON EL ENFRIAMIENTO Y EL AMBIENTE DE TRABAJO..... 16
1.9	CONTROL DE VELOCIDAD..... 17
1.10	ANÁLISIS ESPECTRAL: FÓRMULAS Y DIAGRAMAS..... 19
1.10.1	Método de Kramer..... 19
1.10.2	Modelo de la máquina de inducción en fasores espaciales..... 20
1.10.3	Régimen permanente del motor de inducción en fasores espaciales..... 22
1.10.4	Transformación a variables de campo orientado..... 24
1.10.5	Control tensión-frecuencia de la máquina de inducción..... 27
1.10.6	Controladores de torque y velocidad por campo orientado..... 29
1.10.7	Armónicas temporales en la máquina de inducción..... 31

**CAPITULO II**  
**ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES PARA LAS TARJETAS DE**  
**ADQUISICION DE DATOS.**

2.1	COMPONENTE DE LOS SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	39
2.2	ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.....	40
2.2.1	Funciones generales del acondicionamiento de señal.....	40
2.2.2	Acondicionamiento de la señal de entrada al sistema.....	44
2.2.3	Acondicionamiento de la señal de salida.....	45
2.2.4	Acondicionamiento de Transductores.....	50
2.3	TÉCNICAS DE MEDICIÓN Y REFERENCIA A TIERRA.....	51
2.3.1	Entradas análogas.....	52
2.3.2	Salidas Análogas.....	52
2.3.3	Entradas y salidas digitales.....	53
2.3.4	Señales temporizadas.....	53
2.3.5	Entradas de función programable.....	53
2.3.6	Señales de entrada análoga.....	53
2.3.7	Fuentes de señal flotantes.....	54
2.3.8	Fuentes de señal referenciadas a tierra.....	54
2.3.9	Modos de conexión de entradas análogas.....	54
2.3.10	Conexión de salidas análogas.....	58
2.3.11	Conexión de Entradas – Salidas Digitales.....	58
2.4	CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS DAQ.....	59
2.4.1	Interfaces de E/S con el Proceso.....	59
2.4.2	Control y/o Adquisición de Datos.....	60
2.4.3	Interfaz del Usuario.....	60
2.5	TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	60
2.5.1	Tipos.....	60
2.5.2	Entradas analógicas.....	61
2.5.3	Diagrama de bloques general de una tarjeta de adquisición de datos...	62
2.6	HARDWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	62
2.6.1	Subsistemas de entradas analógicas.....	63
2.6.2	Subsistemas de salidas analógicas.....	64
2.6.3	Subsistemas de entrada/salida digital.....	64

2.6.4	Subsistemas contador/ temporizador.....	64
2.7	SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	64
2.8	TOOLBOX DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ).....	65
2.8.1	Funciones M.....	65
2.8.2	El motor de adquisición de datos.....	66
2.8.3	El adaptador del manejador del hardware.....	66

### CAPITULO III

#### PROGRAMACIÓN GRÁFICA ENTORNO A LabVIEW

3.1	ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS CON INSTRUMENTOS VIRTUALES.....	67
3.2	INTRODUCCIÓN A LABVIEW.....	68
3.3	CREACIÓN DE VIS.....	69
3.3.1	Construcción de un VI.....	69
3.3.2	Estructura de los VIs.....	70
3.3.3	SubVI.....	70
3.3.4	Panel frontal.....	71
3.3.5	El diagrama de bloque.....	72
3.4	JERARQUÍA DE UN VI.....	73
3.5	TIPOS DE DATOS.....	73
3.5.1	Boolean (verde claro).....	73
3.5.2	Numéricos Extend (naranja).....	74
3.5.3	Numéricos Double (naranja).....	74
3.5.4	Numéricos Single (naranja).....	74
3.5.5	Numéricos Long Integer (azul).....	74
3.5.6	Numéricos Word Integer (azul).....	74
3.5.7	Numéricos Byte Integer (azul).....	74
3.5.8	Numéricos Unsigned Long (azul).....	74
3.5.9	Numéricos Unsigned Word (azul).....	74
3.5.10	Numéricos Unsigned Byte (azul).....	75
3.5.11	Numéricos Complex Extend (naranja).....	75
3.5.12	Numéricos Complex Double (naranja).....	75

3.5.13	Numéricos Complex Single (naranja).....	75
3.5.14	Datos arrays.....	75
3.5.15	Strings (rosa).....	76
3.5.16	Handles.....	76
3.5.17	Paths (verde oscuro).....	76
3.5.18	Datos clusters.....	76
3.6	ICONO.....	77
3.7	EL CONECTOR.....	79
3.8	LOS CABLES.....	79
3.9	PALETA DE HERRAMIENTAS (TOOLS PALETTE).....	80
3.10	PALETA DE CONTROLES (CONTROLS PALETTE).....	81
3.11	PALETA DE FUNCIONES (FUNCTIONS PALETTE).....	81
3.12.	PROGRAMACIÓN ESTRUCTURADA.....	82
3.12.1	Lazos For loop.....	82
3.12.2	While loop.....	83
3.12.3	Estructura Case.....	84
3.12.4	Estructura de Sequence.....	85
3.12.5	Formula Node.....	85
3.13.	VARIABLES LOCALES Y GLOBALES.....	86
3.13.1	Registro de desplazamiento (Shift Registers).....	87
3.14	INDICADORES Y CONTROLADORES STRINGS.....	87
3.15.	INDICADORES CHART.....	88
3.15.1	Waveform Chart.....	88
3.15.2	Intensity chart.....	89
3.16	INDICADORES GRAPH.....	90
3.16.1	Waveform graph.....	90
3.16.2	XY Graph.....	92
3.16.3	Intensity Graph.....	93
3.17	I/O INPUT/OUTPUT.....	93
3.17.1	LabVIEW VISA.....	93
3.18	LabVIEW INSTRUMENTO DRIVER.....	94
3.18.1	Funciones GPIB en labVIEW.....	94
3.18.2	El puerto en serie para VI'S.....	94



3.19	ANÁLISIS Y ADQUISICIÓN DE DATOS EN LABVIEW.....	95
3.19.1	Librerías de adquisición de datos.....	95
3.19.2	Análisis en labVIEW.....	95
3.19.3	Generación de señal.....	96
3.19.4	Frecuencia normalizada.....	96
3.19.5	Transformada rápida de fourier (fft).....	96
3.19.6	Medida VI's.....	97
3.20	COMUNICACIÓN EN LABVIEW.....	98
3.21	PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN.....	98
3.21.1	PPC.....	99
3.22.2	DDE.....	99

## **CAPITULO IV**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

4.1	IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE.....	102
4.1.1	Portador SCC SS-2345.....	102
4.1.2	Módulo SCC-A10.....	104
4.1.3	Módulo SCC-C120.....	105
4.1.4	Conexión de módulos SCC de entrada analógica.....	106
4.1.5	Sensor de efecto hall.....	106
4.2	ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS BAJO LabVIEW...	106
4.3	IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE.....	107
4.3.1	Programación de Análisis Espectral de Corrientes bajo LabVIEW.....	108

## **CAPITULO V**

### **ANÁLISIS MATEMÁTICO**

#### **PRUEBAS Y VERIFICACIONES**

5.1	INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS MATEMÁTICO.....	112
5.1.1	Transformada discreta de Fourier (DFT).....	112
5.1.2	La relación entre las Muestras de Frecuencia y Dominio del Tiempo...	113
5.1.3	La magnitud e Información de Fase.....	114
5.1.4	Frecuencia que existe entre las Muestras de DFT.....	115
5.1.5	Los Principios de FFT.....	115

5.1.6	Los Componentes de Frecuencia.....	116
5.1.7	Los Tamaños de FFT rápidos.....	117
5.1.8	FFT VIS.....	118
5.1.9	El espectro de Poder.....	118
5.1.10	La pérdida de Información de fase.....	119
5.1.11	Usando el espectro de Poder VI.....	119
5.1.12	Función de la respuesta en frecuencia.....	119
5.1.13	Aliasing.....	120
5.1.14	Windowing.....	120
5.1.15	Promediando para Mejorar la Medida.....	121
5.2	PRUEBAS Y VERIFICACIONES.....	123
5.3	PRESENTACION Y DIAGNOSTICO DE DATOS.....	124

## **CAPITULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

6.1	CONCLUSIONES .....	129
6.2	RECOMENDACIONES .....	131

### **GLOSARIO**

### **BIBLIOGRAFÍA.**

### **ANEXOS**

## INDICE DE TABLAS

TABLA	Pag.
Tabla 1.1 Clasificación de los motores de inducción jaula de ardilla NEMA.....	14
Tabla 1.2 Armónicas en relación a la frecuencia.....	31
Tabla 2.1 Rango de entrada y precisión de acuerdo a la ganancia seleccionada.....	52
Tabla 4.1 Características técnicas del Motor de Inducción Jaula de Ardilla.....	101
Tabla 4.2 Hardware utilizado en la adquisición de datos.....	102

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA	Pag.
Figura. 1.1 Coordenadas del motor de inducción.....	1
Figura. 1.2 Diagrama Fasorial de las FEM en el motor.....	2
Figura. 1.3 Circuito equivalente del motor de inducción.....	5
Figura. 1.4 Resistencia del rotor en función del par y deslizamiento.....	7
Figura. 1.5 Modos de operación del motor de inducción.....	8
Figura. 1.6 Arranque de dos motores de inducción con diferente resistencia en el rotor.....	9
Figura. 1.7 Rotor con anillos deslizantes y escobillas.....	10
Figura. 1.8 Rotor de jaula de ardilla.....	11
Figura. 1.9 Cortes transversales de rotores de jaula de ardilla.....	12
Figura. 1.10 Circuito equivalente del motor con rotor de doble jaula.....	13
Figura. 1.11 Máquina de inducción trifásica.....	21
Figura. 1.12 Motor en régimen permanente (transformación a fasores espaciales).....	23
Figura. 1.13 Modelo transitorio y permanente del motor de inducción.....	27
Figura. 1.14 Tensión frecuencia constante en el motor de inducción.....	28
Figura. 1.15 Tensión-frecuencia constante en el motor de inducción.....	28
Figura.1.16 Análisis por campo de un controlador tensión-frecuencia constante.....	29
Figura.1.17 Corriente mínima en el estator y determinación en línea de $\tau_r$ .....	30
Figura.1.18 Primera armónica en un sistema trifásico equilibrado.....	31
Figura.1.19 Terceras armónicas en un sistema trifásico equilibrado.....	32
Figura.1.20 Motor de inducción en un sistema de terceras armónicas.....	32
Figura.1.21 Circuito del motor de inducción excitada por quinta armónica.....	34

Figura.1.22 Circuito del motor de inducción excitada por séptima armónica.....	35
Figura.1.23 Circuito para armónica de orden “h” de secuencia positiva o negativa...	36
Figura.1.24 Tensiones aplicadas a un motor de inducción.....	37
Figura.1.25 Espectro armónico de la fuente de tensión (Módulo de la tensión).....	38
Figura.1.26 Distribución armónica del torque eléctrico total.....	38
Figura. 2.1. Sistema de adquisición de datos.....	39
Figura. 2.2 Optoacoplador en modo común.....	41
Figura. 2.3 Amplificador de aislamiento.....	42
Figura. 2.4 Amplificador en instrumentación.....	43
Figura. 2.5 Amplificador de ganancia programable.....	44
Figura. 2.6 Acondicionamiento de señal de entrada.....	44
Figura. 2.7 Filtros según el tiempo.....	45
Figura. 2.8 Diagrama de Bode.....	46
Figura. 2.9 Velocidad de respuesta, oscilación.....	46
Figura. 2.10 Filtros según la frecuencia.....	48
Figura. 2.11 Relaciones entre el entorno de programación NI-DAQ y el hardware....	51
Figura. 2.12. Modos de conexión de las estradas análogas.....	54
Figura. 2.13 Conexión diferencial para señales referenciadas.....	55
Figura. 2.14 conexión diferencial para señales flotantes.....	56
Figura. 2.15 conexión de señales flotantes en modo NRSE.....	57
Figura. 2.16 conexión de señales referenciadas en modo NRSE.....	58
Figura. 2.17 Conexión de las Salidas análogas.....	58
Figura. 2.18 Conexión de los canales de entrada – salida digital.....	59
Figura. 2.19 Interfase de E/S.....	59
Figura. 2.20 Etapa de entrada general de una tarjeta.....	62
Figura. 3.1 LabVIEW.....	69
Figura. 3.2 Panel frontal.....	71
Figura. 3.3 Diagrama de bloque.....	72
Figura. 3.4 Jerarquía.....	73
Figura. 3.5 Icono.....	77
Figura. 3.6 Editar un ícono.....	77
Figura. 3.7 Cableado.....	79
Figura. 3.8 Paleta herramientas.....	80

Figura. 3.9 Paleta de controles.....	81
Figura. 3.10 Paleta de funciones.....	81
Figura. 3.11 Lazo For.....	82
Figura. 3.12 Lazo While.....	83
Figura. 3.13 Estructura Case.....	84
Figura. 3.14 Estructura de Sequence.....	85
Figura. 3.15 Formula Node.....	86
Figura. 3.16 Registros.....	87
Figura. 3.17 Controladores Strings.....	88
Figura. 3.18 Waverform Chart.....	88
Figura. 3.19 Intencity Chart.....	90
Figura. 3.20 Waverform Graph.....	91
Figura. 3.21 XY Graph.....	92
Figura. 3.22 Intensity Graph.....	93
Figura. 3.23Muestras de analizador de espectros de señales.....	97
Figura. 4.1 Portador SC-2345.....	103
Figura. 4.2 Partes del portador SC-2345.....	103
Figura. 4.3 Módulo SCC- A10.....	104
Figura. 4.4 Diagrama de bloques del módulo SCC-A10.....	104
Figura. 4.5 Módulo SCC-CI20.....	105
Figura. 4.6 Diagrama de bloques del módulo SCC-CI2.....	105
Figura. 4.7 Sensor de Efecto Hall.....	106
Figura. 4.8 Icono del Análisis Espectral mediante la FFT.....	118
Figura. 4.9 Diagrama de bloques principal.....	110
Figura. 4.10 Diagrama de bloques de los SubVI s.....	110
Figura. 5.1 Transformada discreta de Fourier.....	113
Figura 5.2 Espectro de corrientes del motor en óptimas condiciones sin carga fase R.	124
Figura 5.3 Espectro de corrientes del motor en óptimas condiciones sin carga fase S.	124
Figura 5.4 Espectro de corrientes del motor en óptimas condiciones sin carga fase T.	125
Figura 5.5 Espectro de corrientes del motor con carga fase R.....	125
Figura 5.6 Espectro de corrientes del motor con carga fase S.....	126
Figura 5.7 Espectro de corrientes del motor con carga fase T.....	126
Figura 5.8 Espectro de corrientes de la fase S con rotura de barra.....	126

Figura 5.9 Espectro de corrientes del motor de la fase T con rotura de barra.....	127
Figura 5.10 Espectro de corrientes con alta impedancia fase en R.....	127
Figura 5.11 Espectro de corrientes con alta impedancia fase S .....	128
Figura 5.12 Espectro de corrientes con alta impedancia fase T.....	128

## **INTRODUCCIÓN**

Los motores eléctricos de inducción jaula de ardilla analizados en los laboratorios de la ESPE-Latagunga se utilizan en una gran variedad de aplicaciones en la industria, y en algunas es vital garantizar su adecuado funcionamiento. Esto da la necesidad de una herramienta que permita conocer la condición del motor sin intervenir en la operación del equipo. Según el estudio del capítulo I se ha encontrado que en un gran porcentaje los daños en los motores eléctricos de inducción obedecen a problemas en los rodamientos y un pequeño porcentaje a rotura de barras del rotor. Mediante el análisis espectral de las corrientes es posible determinar las fallas del estator. MCSA (Motor Current Signature Analysis) es el nombre de esta técnica de diagnóstico.

El proyecto de esta Tesis en el capítulo II ha desarrollado actividades de análisis y diagnóstico en el área de mantenimiento de motores de inducción jaula de ardilla, tendientes a adaptar tecnología para proveer a los laboratorios de máquinas eléctricas con herramientas de mantenimiento predictivo que permitan conocer en forma oportuna la condición de funcionamiento de motores eléctricos de inducción. La herramienta actualmente desarrollada utiliza la técnica MCSA.

La técnica de análisis de corrientes del estator se basa en que cualquier agente que afecte el campo magnético en el entrehierro de un motor se verá reflejado en componentes de frecuencia características en el espectro de las corrientes del estator. De esta forma, una falla en barras de rotor o en la pista de un rodamiento causará cambios en la densidad de flujo magnético a través del entrehierro. Esto a su vez ocasionará la aparición de componentes de frecuencia características en el espectro de corrientes del estator. Estas componentes de frecuencia están relacionadas con posibles defectos por modelos matemáticos basados en teoría general de máquinas eléctricas y dependen básicamente de la frecuencia de suministro de corriente, la velocidad del motor y su configuración (dimensiones del rodamiento, número de bolas, número de polos).

Para desarrollar un sistema que ayude al diagnóstico de las fallas más comunes de los motores de inducción jaula de ardilla se desarrolla un sistema de adquisición de datos bajo la plataforma SCC y se desarrolla una aplicación basada en LabVIEW, programa que es analizado en el capítulo III, que permite analizar los espectros de las señales de corriente que suministra al estator, y así lograr identificar las componentes asociadas a fallas en el motor y finalmente registrar la información a ser analizada en una base de datos para el diagnóstico.

En el capítulo IV, bajo el programa LabVIEW se realiza el diagnóstico que consta de rutinas de adquisición y análisis de datos. Para esto el motor es puesto a trabajar con carga y así la pinza de efecto Hall envía la información a la tarjeta DAQCard NIPCI-2014 luego de pasar por el acondicionador SCC con conexión BNC. La rutina de adquisición de datos en LabVIEW toma la señal de corriente de suministro de una de las fases del estator y obtiene su espectro en el dominio de la frecuencia mediante el algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT). Las funciones de análisis matemático necesarias para este diagnóstico vienen incluidas en LabVIEW y se reduce el tiempo de programación.



El capítulo V, realiza la rutina de análisis en LabVIEW que determina la diferencia entre la amplitud de los picos asociados a frecuencias críticas y la amplitud asociada a la componente fundamental, y el programa verifica si los picos de las frecuencias del espectro están dentro del rango permisibles para un motor en optimas condiciones caen fuera de valores de dicho rango.

Con este sistema combina en forma optima una buena resolución de la frecuencia y sensibilidad de la señal, la primera etapa es necesaria para distinguir las componentes del espectro con precisión y la segunda, para identificar las fallas en información.

## **CAPITULO I**

### **MOTORES DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA.**

En un motor de inducción convencional toda la energía eléctrica fluye hacia o desde el estator. Los flujos producidos por las corrientes del estator generan un campo magnético rotatorio que corta a los conductores del rotor, y de esta forma se obtiene sobre ellos la FEM inducida utilizada para forzar corrientes en los ejes “d” y “q” del rotor que se representan en la figura 1.1. Al interactuar el campo magnético rotatorio del estator con el campo magnético rotatorio originado por las corrientes que circulan en el rotor produce el torque eléctrico, permitiendo la construcción de un motor de gran difusión industrial ya que por su sencillez, este resulta económico y robusto.

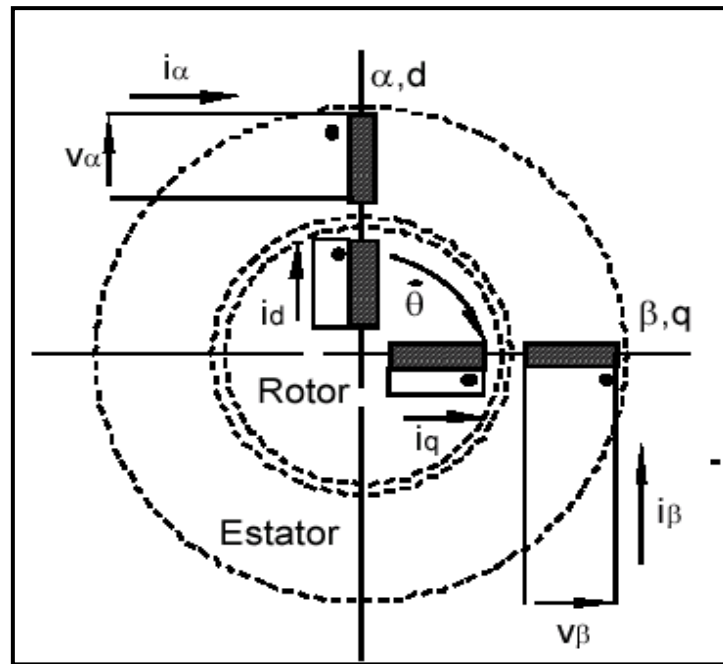


Figura 1.1 Coordenadas del motor de inducción

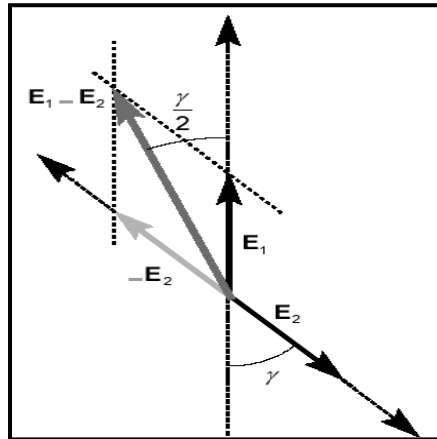


Figura1.2 Diagrama Fasorial de las FEM en el motor

El motor de inducción se excita con corriente alterna en el estator, y se produce el campo magnético rotatorio, que posee una amplitud constante en el tiempo, pero varía en el espacio como se observa en la figura 1.2. La velocidad de giro del campo magnético rotatorio se define por la frecuencia de las corrientes inyectadas en el estator.

### 1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN.

Por el movimiento relativo de un motor se producen corrientes parásitas y el campo magnético. En el motor síncrono de ca, la acción de motor y de generador se lleva a cabo a la velocidad síncrona del campo magnético giratorio. En el motor de inducción, no es posible que la acción de motor ni de generador se lleve a cabo a la velocidad síncrona. Por esta razón, se les clasifica como dínamos asincrónicas. La ecuación 1.1 se refiere al deslizamiento con respecto a la velocidad y está expresada en porcentaje.

$$s = \frac{(S - S_r)}{S} * 100 \quad (1.1)$$

$s =$  Deslizamiento

$S =$  Velocidad síncrona rpm

$S_r =$  Velocidad del rotor rpm

La frecuencia que se induce en el rotor según la ecuación 1.2 varía inversamente a la velocidad del rotor, pero el deslizamiento también varía cuando está en reposo el rotor. La frecuencia del rotor en función de la frecuencia y deslizamiento del estator:

$$\boxed{f_r = s * f} \quad (1.2)$$

$f_r = \text{Frecuencia rotor}$

$f = \text{Frecuencia estator}$

Si el rotor está en reposo un generador de inducción genera una frecuencia de 60 Hz, y si se lo hace girar exactamente a la velocidad sincrónica a la misma dirección del campo magnético la frecuencia del rotor es cero.

Para el deslizamiento se necesita tomar como referencia la dirección del campo magnético, si el campo magnético tomado como referencia gira en sentido de las manecillas del reloj el deslizamiento será positivo caso contrario será negativo. El voltaje inducido en el rotor, la reactancia y la frecuencia del rotor varían todos en función del deslizamiento.

El par se produce debido a la atracción o repulsión mutua de los dos campos magnéticos, el par de la ecuación 1.3 que desarrolla cada conductor en reposo en el rotor se puede expresar en términos de corriente

$$\boxed{T = K_r \phi I_r \cos \theta_r} \quad (1.3)$$

$T = \text{Par}$

$K_r = \text{Cte para el número de polos}$

$\phi = \text{Flujo de cada polo}$

$I_r = \cos \theta_r \text{ Corriente en fase con } \phi$

El par de arranque únicamente es función del voltaje aplicado al estator al igual que los flujos sean del estator o del rotor.

El par máximo se obtiene cuando se diferencia la ecuación del par para cualquier deslizamiento con respecto a la resistencia del rotor y se iguala a cero. El par crítico se desprende de la fórmula 1.4

$$\boxed{R_r = s_b X_{1r}} \quad (1.4)$$

$R_r = \text{resistencia del rotor}$   
 $X_{1r} = \text{reactancia del rotor}$   
 $s_b = \text{deslizamiento}$

$$T_{\max} = \frac{k}{2} \left( \frac{V_p}{R_r} \right)^2 \quad (1.5)$$

$T_{\max} = \text{Par max}$   
 $V_p = \text{Voltaje aplicado}$   
 $K = \text{cte.}$

Cuando se conoce el par de arranque, la ecuación 1.5 es el par máximo, y el nominal de cualquier motor, se puede determinar si ese motor es adecuado para aplicarlo con determinada carga.

## 1.2 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

**Sin carga.-** El deslizamiento es muy pequeño, la frecuencia la reactancia del rotor, y la FEM inducida en éste son muy pequeñas. Debido a esto el factor de potencia es extremadamente pequeño y está en retraso.

**A media carga.-** La velocidad disminuye y provoca un aumento en el deslizamiento, frecuencia, y reactancia del rotor y en la FEM inducida. El aumento de la corriente provoca que el factor de potencia aumente produciendo más potencia mecánica en la armadura y toma más potencia de las barras de distribución.

**A plena carga.-** A mayor carga el deslizamiento aumenta ya que el par aplicado excede al par desarrollado. El factor de potencia a plena carga varía entre 0.8 (motores de 1hp) hasta 0.9 ó 0.95 (motores de 150hp o más). La resistencia efectiva del rotor de un motor comercial de inducción jaula de ardilla es prácticamente constante, el par máximo depende de la relación del voltaje de fase a la resistencia del rotor. Pero si se aumenta la resistencia y reactancia del rotor, el par máximo disminuye por que este par varía inversamente con los factores anteriores.

### 1.3 RESUMEN DE ECUACIONES DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.

El comportamiento del motor depende del deslizamiento, de la tensión aplicada en el estator y de los parámetros del circuito equivalente, se pueden determinar las corrientes que circulan por el motor. Esta carga depende exclusivamente del deslizamiento del rotor.

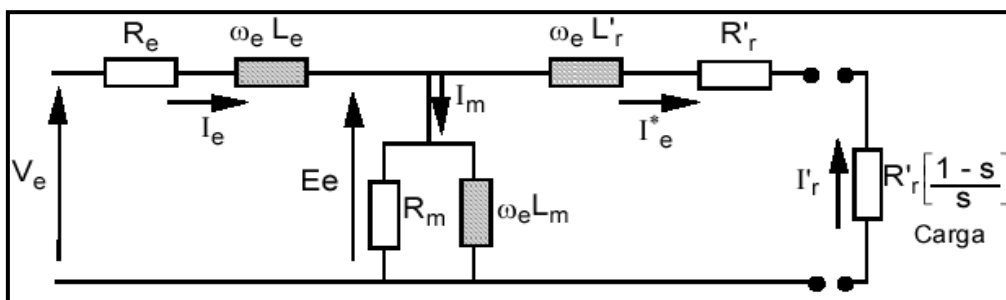


Figura. 1.3 Circuito equivalente del motor de inducción

De la figura 1.3, se pueden extraer varias relaciones para determinar el comportamiento del motor en diferentes condiciones de operación.

#### 1.3.1 Potencia de pérdidas en el rotor.

Las pérdidas eléctricas del rotor se encuentran en las resistencias de las bobinas del rotor. Como la máquina posee  $m_e$  fases en el estator, se pueden calcular por la ecuación

1.6.

$$P_{pr} = m_e (I_e^*)^2 R_r' \quad (1.6)$$

$P_{pr}$  = Potencia de pérdidas rotor

$m_e$  = Fases en estator

$I_e$  = Corriente del estator

$R_r$  = Resistencia rotor

#### 1.3.2 Potencia de pérdidas en el estator.

Los conductores del estator poseen resistencia, y se producen pérdidas. También en el hierro de la máquina se producen pérdidas por histéresis del material magnético y por inducción de corrientes parásitas. Se calcula por la ecuación 1.7.

$$P_{pe} = m_e \left( I_e^2 R_e + \frac{E_e^2}{R_m} \right) \quad (1.7)$$

$P_{pe}$  = Potencia de perdidas estator

$m_e$  = Fases estator

$I_e$  = Corrientes estator

$R_e$  = Resistencia estator

$R$  = Resistencia de magnetización

$E_e$  = FEM

La FEM  $E_e$  se puede calcular, mediante la ecuación fasorial 1.8:

$$E_e = V_e - (R_e + jX_e) I_e \quad (1.8)$$

$V_e$  = Voltaje estator

$I_e$  = Corriente estator

$(R_e + jX_e)$  = Impedancia estator

### 1.3.3 Potencia mecánica en el eje del rotor.

De la potencia que entra al motor por los ejes eléctricos del estator, una parte se consume en los devanados de estator y otra porción en las pérdidas del hierro. El resto de la potencia de entrada atraviesa el entrehierro de la máquina y llega al circuito del rotor. En este circuito se pierde otra porción en las resistencias de los conductores. Finalmente la diferencia entre la potencia que entró por el estator y todas las pérdidas, se encuentra disponible en el eje del rotor como potencia mecánica.

### 1.3.4 Par del motor de inducción.

El par del motor se puede calcular a partir del cociente entre la potencia mecánica disponible en el eje, y la velocidad mecánica del rotor.

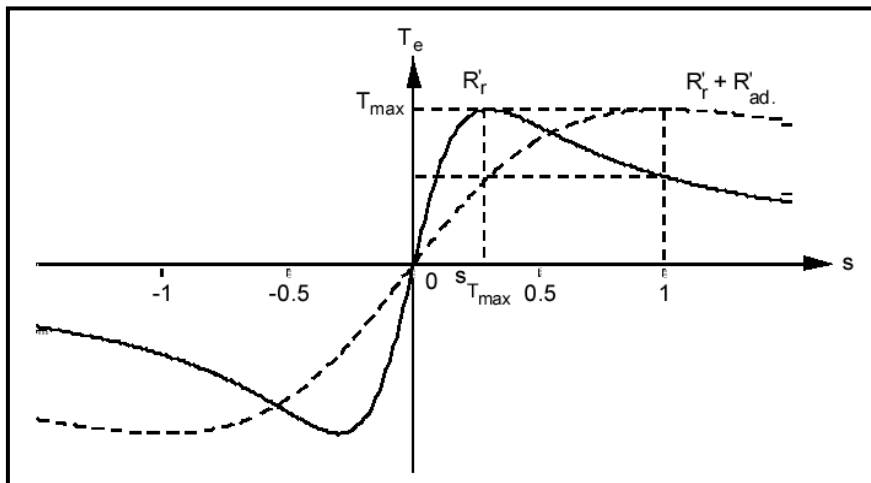
$$T_e = \frac{P_{rotor}}{\omega_e} \quad (1.9)$$

$P_{rotor} = \text{Potencia rotor}$

$\omega_e = \text{Velocidad sincrónica}$

La ecuación 1.9 permite calcular el par mediante la potencia mecánica disponible en el eje y la velocidad mecánica del rotor, o con la potencia eléctrica que atraviesa el entrehierro y la velocidad sincrónica.

El par es máximo cuando la potencia que atraviesa el entrehierro es máxima, ya que la velocidad sincrónica depende de la frecuencia de las corrientes inyectadas en el estator, y constante. La magnitud del par máximo no es afectada por la variación de la resistencia del rotor, pero la característica par-deslizamiento se modifica como se observa en la figura 1.4.



*Figura. 1.4 Resistencia del rotor en función del par y deslizamiento*

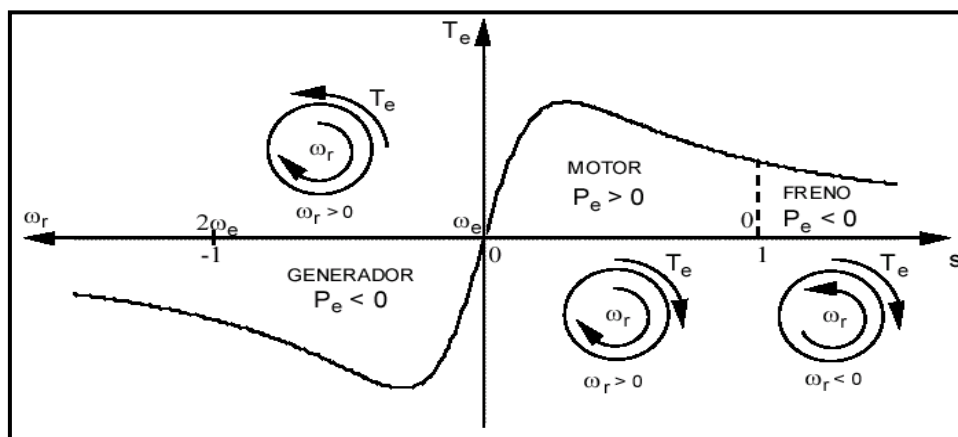
- El par máximo es independiente de la resistencia del rotor.
- El par es proporcional al cuadrado del voltaje en el estator, o inducido en el rotor.



- El deslizamiento al cual se presenta el par máximo es proporcional a la relación  $\frac{R_r}{X_{lr}}$
- Si mayor es la resistencia del rotor menor es la corriente de arranque y mayor es el par de arranque para llegar al par máximo de arranque.
- Para una salida dada de potencia, si mayor es el voltaje nominal menor es la corriente nominal de línea.
- Para un motor a un valor determinado de deslizamiento, la corriente de línea hacia el motor es directamente proporcional al voltaje del estator.

#### 1.4 OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

En la figura 1.5 se puede observar todos los modos de operación pero el más utilizado en los accionamientos industriales, por las ventajas de los sistemas de corriente alterna con respecto a los sistemas de corriente continua, la sencillez, robustez y reducido costo han producido un uso masivo de esta máquina en la industria.



*Figura. 1.5 Modos de operación del motor de inducción*

Existe actualmente un especial interés en la regulación de velocidad mediante el control electrónico.

#### 1.5 EL ARRANQUE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

Los motores de inducción jaula de ardilla en zona residenciales o industriales se pueden poner en marcha directamente desde la línea con una caída de voltaje que es de poca importancia en la fuente de voltaje, y con un pequeño retardo para acelerarse a su velocidad nominal. No es necesario evitar el arranque directo de la línea si las tomas son de capacidad suficiente para suministrar el voltaje y la corriente necesarios al motor de inducción porque no lo perjudica en el momento del arranque.

Cuando se utiliza un motor de inducción para arrancar y accionar una carga mecánica una velocidad determinada puede suceder:

El par de arranque que suministra la máquina puede ser inferior al par mecánico que requiere la carga en reposo para comenzar a moverse, el motor corre un serio riesgo de dañarse por calentamiento excesivo.

El par eléctrico es exactamente igual al par de la carga, no es posible acelerar la máquina.

El torque eléctrico de arranque es mayor que el torque mecánico de la carga, obteniéndose un nuevo punto de operación.

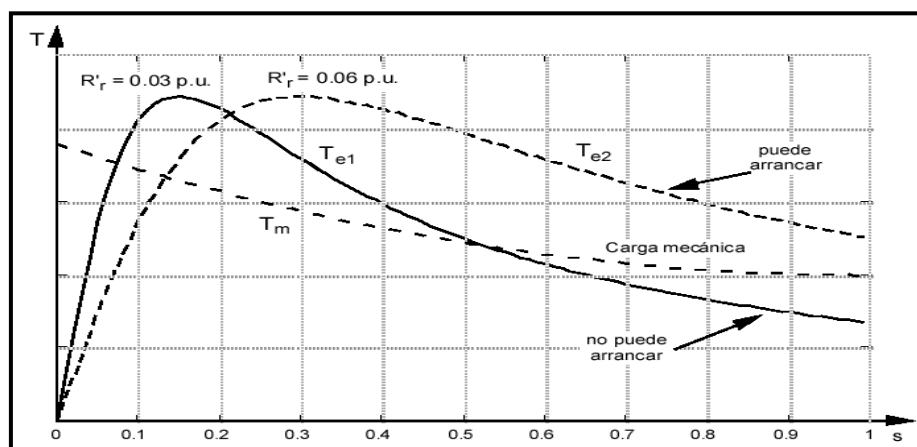
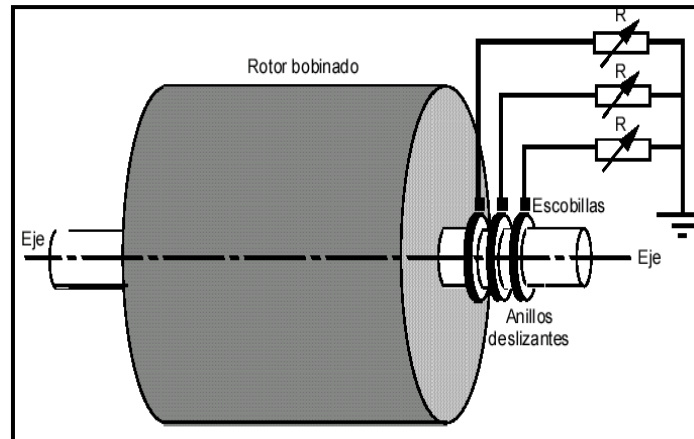


Figura. 1.6 Arranque dos motores de inducción con diferente resistencia en el rotor.

En la figura 1.6 se observa que un motor de inducción produce más par de arranque en la medida que la resistencia del rotor aumenta. Es deseable que una máquina eléctrica produzca un par de arranque elevado y un rendimiento cercano a la unidad.

En algunos motores de inducción se añade en el eje del rotor anillos deslizantes, se conectan a un extremo de las fases del rotor. Cuando la máquina está operando en régimen permanente es posible eliminar o cortocircuitar la resistencia adicional para mejorar el rendimiento como se observa en la figura 1.7.



*Figura. 1.7 Rotor con anillos deslizantes y escobillas*

Este rotor, regula el par de arranque, disminuye las corrientes durante el proceso de aceleración y aumenta el rendimiento en el punto de operación, eliminando la resistencia externa. Pero encarece la máquina, incrementa las pérdidas mecánicas por fricción con las escobillas.

## 1.6 MOTOR DE INDUCCIÓN CON ROTOR JAULA DE ARDILLA.

El devanado en el rotor jaula de ardilla tiene varias barras conductoras cuyos extremos están conectados mediante anillos o placas metálicas a cada punta.

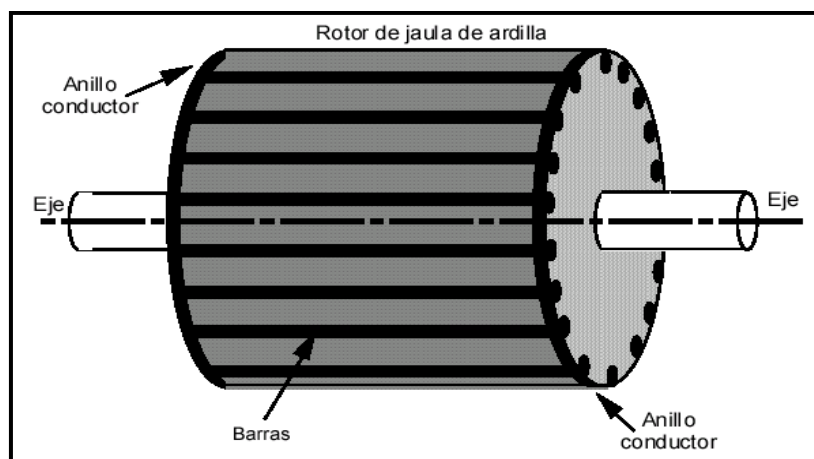
**El motor de inducción jaula de ardilla normal o estándar.-** Fabricado para uso a velocidad constante, tiene grandes áreas de ranuras, para una buena capacidad de disipación de calor, y barras con ranuras hondas en el rotor. En el arranque, la densidad de corriente es alta cerca del rotor, en marcha la densidad disminuye con uniformidad con lo cual se obtiene un par de arranque relativamente alto y una aceleración rápida hacia la velocidad nominal. Las características de funcionamiento o marcha son excelentes, pero las características de arranque son malas: alta corriente a bajo factor de potencia. Tiene la mejor regulación de velocidad. Su corriente de arranque es de 5 a 7

veces la corriente nominal haciendo menos deseable para el arranque con la corriente en línea.

Para satisfacer la demanda de una construcción sencilla, se creó el motor de inducción de arranque en línea que no produce fluctuaciones indeseables: el de rotor de doble jaula de ardilla, este es un motor de clase A.

El rotor de jaula de ardilla en aplicación industrial no es muy frecuente, debido a que existe una solución mucho más económica. El campo producido por las bobinas del estator produce FEM sobre cualquier conductor localizado en el rotor, se pueden colocar barras conductoras en la periferia del rotor.

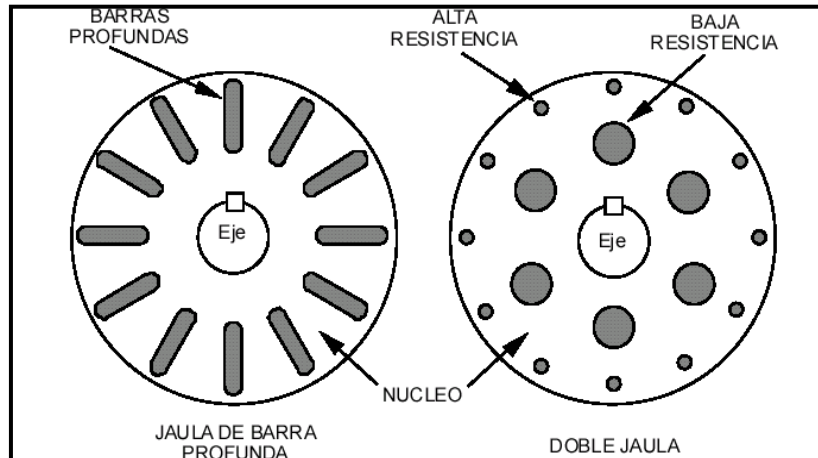
Sobre estas barras, paralelas al eje de la máquina, se inducen las FEM por el campo magnético rotatorio producido en el estator. Si estas barras están cortocircuitadas en sus extremos mediante dos anillos conductores, circula corriente por las barras y se genera un campo magnético rotatorio en el rotor. La interacción entre los dos campos magnéticos rotatorios produce el torque eléctrico.



*Figura. 1.8 Rotor de jaula de ardilla*

El rotor de jaula de ardilla como se ve en la figura 1.8 es muy simple desde el punto de vista constructivo, es capaz de soportar esfuerzos eléctricos y mecánicos mucho mayores que el rotor devanado. En este rotor no es posible incluir resistencia adicional en serie con los conductores. Pero, durante la construcción del rotor se puede variar el valor de la resistencia controlando el espesor de los anillos que cortocircuitan las barras.

El rotor de jaula de ardilla se puede diseñar utilizando barras profundas o doble jaula, una externa muy resistiva y otra profunda con menor resistencia. Estas modificaciones permiten utilizar el efecto pelicular para producir una variación de la resistencia equivalente del rotor durante el arranque. Con el rotor en reposo, el deslizamiento es grande y la frecuencia de las corrientes que circulan por el rotor es proporcional al deslizamiento. Si las barras son profundas o el rotor es de doble jaula, la corriente de alta frecuencia fluye por la periferia de la barra o por la jaula más externa y resistiva, incrementando sustancialmente la resistencia equivalente del rotor en esta condición. Cuando la máquina está operando cerca del punto nominal, los deslizamientos son cercanos a cero y la frecuencia de las corrientes que circulan por el rotor también es reducida. En este caso las corrientes se distribuyen uniformemente por la barra profunda o por las dos barras, consecuentemente la resistencia equivalente disminuye. De esta forma es posible construir máquinas económicas y robustas, de alta eficiencia y torques de arranque importantes. En la figura 1.9 se observa las partes internas del rotor del motor jaula de ardilla.



*Figura. 1.9 Cortes transversales de rotores de jaula de ardilla*

**El rotor de doble jaula de ardilla.-** Se diseñó con mejores características de arranque en línea. La construcción del rotor varía de acuerdo a la potencia. El desarrollo de este tipo de motor de inducción ha desarrollado numerosas variaciones del diseño del rotor normal.

Se puede modelar mediante un circuito equivalente que considere los enlaces de flujo mutuos entre el estator y las barras del rotor, así como los enlaces de dispersión de cada una de las jaulas. Cada uno de estos enlaces se representa en el circuito equivalente en la figura 1.10 por una reactancia. Las resistencias de cada una de las jaulas se modelan independientemente.

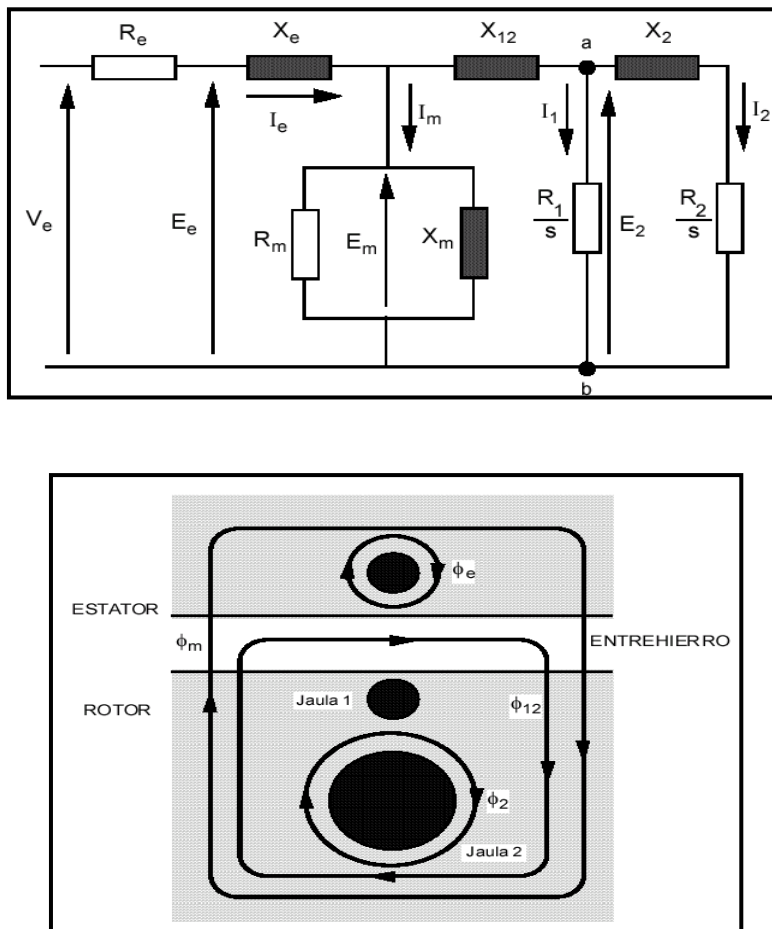


Figura. 1.10 Circuito equivalente del motor con rotor de doble jaula

**Corriente de arranque.-** En el motor de inducción la corriente que absorbe es elevada durante el arranque, es tres y seis veces la corriente nominal del motor, y en algunas ocasiones aún más. La caída de tensión en los conductores de alimentación y en el sistema puede sobrepasar el máximo permitido. La tensión de alimentación del motor no debe estar nunca por debajo del 5% de su valor nominal, ya que el torque eléctrico se reduce con el cuadrado de la tensión de alimentación, y la máquina puede ser incapaz de acelerar la carga mecánica.

Existen cargas mecánicas que a baja velocidad no ofrecen resistencia importante y su torque mecánico se incrementa con la velocidad. Es posible utilizar sistemas de arranque de la máquina de inducción a tensión reducida que contribuyen a disminuir la magnitud de la corriente en la máquina durante el proceso de aceleración, incrementa el tiempo de aceleración de la máquina y su carga mecánica, pero las corrientes disminuyen en la misma proporción que la tensión aplicada.

Algunos motores de inducción que se utilizan en sistemas relativamente débiles (ascensores y elevadores residenciales), se diseñan con reactancias de dispersión muy grandes, para reducir la corriente durante el arranque a dos o tres veces la corriente nominal, disminuyendo el impacto de los frecuentes arranques en el perfil de tensión de la red eléctrica.

Para reducir la corriente durante el proceso de aceleración de la carga mecánica se han utilizado varios sistemas. Utilizan el cambio de conexiones de las bobinas de la máquina, otros utilizan transformadores y los más modernos se diseñan mediante convertidores electrónicos de potencia. Los arrancadores son costosos para ser aplicados a máquinas pequeñas, y la corriente de arranque en estos motores no es importante ni para la máquina, ni para la red. Una máquina pequeña tiene una relación superficie-volumen muy grande y esto le permite disipar bien sus pérdidas.

## **1.7 CLASIFICACIÓN DE MOTORES JAULA DE ARDILLA POR SUS PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS.**

National Electrical Manufacturers Association (NEMA) ha desarrollado un sistema de identificación con letras según la clase. Los valores son para voltaje nominal en el arranque; esta clasificación se indica en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1 Clasificación de los motores de inducción jaula de ardilla NEMA**

Clase NEMA	Par-arranque (# veces el nominal)	Corriente-arranque (# veces el nominal)	Regulación de velocidad (%)	Clase del motor

A	1.5-1.75	5-7	2-4	Normal
B	1.4-1.6	4.5-5	3-5	Propósito general
C	2-2.5	3.5-5	4-5	Doble jaula alto par
D	2.5-3.0	3-8	5-8,8-13	Alto par, alta resistencia
F	1.25	2-4	Mayor de 5	Doble jaula bajo par y baja corriente de arranque

En los motores de propósito general o motores clase B, las ranuras de su rotor están embebidas algo más profundamente que en los normales, esto aumenta la reactancia de arranque y la puesta en marcha del rotor y se reduce el par y la corriente de arranque. Para tamaños mayores se prefieren estos motores por su corriente de arranque. La mayoría de motores de inducción jaula de ardilla que se fabrican son de clase B, las aplicaciones típicas son las bombas centrífugas de impulsión, las máquinas herramienta y los sopladores.

Los de clase C desarrollan un alto par de arranque, acelera rápidamente, la mayor parte de corriente se concentra en el devanado superior. El rotor puede sobrecalentarse en condiciones de arranque frecuente, este motor continua desarrollando par mayor a desplazamientos mayores hasta llegar al par máximo con rotor parado, pero la regulación de velocidad son mejores en los de clase A y B. Se aplican en donde es difícil el arranque como en bombas y compresores de pistón.

Los motores de alto par y alta resistencia son los de clase D, las barras del rotor se fabrican en aleación de alta resistencia y se colocan en ranuras cercanas a la superficie, la relación de resistencia y reactancia del rotor es mayor que en los motores de clase A, B, C. Está diseñado para servicio pesado de arranque, por su pequeña sección transversal y su deficiente capacidad de disipación de calor no se recomienda para arranques frecuentes. Se los aplica en cargas como cizallas o troqueles, entre todas las clases la peor regulación de velocidad.

Los de clase F son de doble jaula y bajo par, están diseñados como motores de baja corriente de arranque menor que las otras clases, la resistencia del rotor es muy alta en



su devanado de arranque y en el de marcha y aumenta la impedancia de arranque y de marcha y reduce su corriente. Está diseñado para remplazar al motor de clase B, se fabrican en tamaños mayores de 25 hp para servicio directo en línea, tienen menos regulación de velocidad que los de clase B, baja capacidad de sobrecarga y baja eficiencia de funcionamiento, pero cuando arrancan con grandes cargas, las bajas corrientes de arranque eliminan la necesidad de equipo para voltaje reducido.

## **1.8 CLASIFICACIÓN DE MOTORES JAULA DE ARDILLA DE ACUERDO CON EL ENFRIAMIENTO Y EL AMBIENTE DE TRABAJO**

El costo y el tamaño físico de los motores cerrados es mayor que el de los motores abiertos de la misma potencia, ciclo de trabajo, y elevación sobre la temperatura ambiente. Mientras más restringida sea la ventilación en cualquier envolvente de máquina, mayor será su tamaño de armazón para determinada potencia:

1. Carcasa a prueba de agua
2. Carcasa a prueba de ignición de polvos.
3. Carcasa a prueba de explosión.
4. Carcasa totalmente cerrada.
5. Carcasa protegida al temporal.
6. Carcasa protegida.
7. Carcasa a prueba de salpicaduras.
8. Carcasa a prueba de goteo.
9. Carcasa abierta.

Para seleccionar las velocidades nominales de estos motores se prefieren los motores de alta velocidad, de la misma potencia y voltaje, debido a que:

- Son de tamaño menor y en consecuencia de menor peso.
- Tienen mayor par de arranque.
- Tienen mayores eficiencias.
- A la carga nominal, tienen mayores factores de potencia.

- Son menos costosos.

Para el efecto de la variación de voltaje sobre la velocidad de un motor de inducción jaula de ardilla, para fines de cálculo la relación entre par y voltaje de estator se tiene en la ecuación 1.10. El cálculo del deslizamiento con un cambio en el voltaje del estator es más complejo, porque varía con la resistencia del rotor el voltaje del estator y el par:

$$T_n = T_0 \left( \frac{V_n}{V_0} \right) \quad \text{lb.pie o N.m} \quad (1.10)$$

$T_n = \text{Par nuevo}$

$T_0 = \text{Par original}$

$V_0 = \text{Voltaje inicial}$

$V_n = \text{Voltaje final}$

Se tiene mayor calentamiento a la menor velocidad, según la ecuación 1.11 una eficiencia reducida, lo cual causa un rápido deterioro en el aislamiento del motor, por lo que se acostumbra a limitar la variación de voltaje del estator a no más del 10% del voltaje nominal.

$$S_n = S_0 \left( \frac{V_0}{V_n} \right)^2 \left( \frac{R_m}{R_{r0}} \right) \quad (1.11)$$

$S_n = \text{Deslizamiento}$

$S_0 = \text{Deslizamiento inicial}$

$V_0 = \text{Voltaje inicial del estator}$

$V_n = \text{Voltaje del estator}$

$R_n = \text{Resistencia del rotor}$

$R_0 = \text{Resistencia inicial del rotor}$

## 1.9 CONTROL DE VELOCIDAD.

En el motor de inducción jaula de ardilla no se presta fácilmente a control de velocidad. Existen tres formas de variar la velocidad:

- Cambiando la frecuencia aplicada al estator.
- Cambiando el número de polos del estator y del rotor.
- Reduciendo el voltaje aplicado al estator.

Los motores de multivelocidad son los que se cambian los polos se cambian mediante conmutación a la que se conectan los devanados en combinaciones en serie o paralelo, hay para dos o cuatro velocidades.

Para motores pequeños polifásicos de inducción de jaula de ardilla, si reducimos el voltaje aplicado al estator mientras se trabaja con determinada carga, se reduce el par máximo y el nominal, se usa para los motores monofásicos pero no para los polifásicos por las siguientes razones:

- El voltaje aplicado debe reducir mucho para producir la disminución de par y velocidad necesaria, por lo que la regulación de velocidad del motor será mala e inestable con cambios de carga.
- Al disminuir el voltaje las corrientes en el rotor y estator durante la marcha aumentan, por lo que se debe reducir mucho el voltaje creando una deficiente regulación de velocidad.
- Si se cambia la frecuencia y el voltaje al estator, no se necesita de motores especiales. Para mantener el mismo flujo en el estator se debe reducir el voltaje en el estator en la misma proporción. La capacidad del motor para autoventilarse se reduce a la menor velocidad, debido al menor voltaje del estator la corriente de entrada a éste y la potencia aumenta produciéndose más calor interno. Al decrecer la eficiencia se limita obtener menores velocidades reduciendo voltaje y frecuencia en el estator. A mayores velocidades ocurre lo contrario y por la mala regulación de velocidad de algunas clases se desea mayores velocidades, y a mayores frecuencias y voltajes de estator se reduce la corriente y la potencia de entrada, aumenta la eficiencia y la velocidad, y la capacidad por su ventilación propia, es por esto que los motores de 400 Hz. de la misma potencia son de tamaño menor a los de 60 Hz.

Para un control de velocidad de un motor polifásico de inducción jaula de ardilla variando la frecuencia, la fuente de poder debe ser un ciclo convertidor electrónico polifásico o alternador impulsado por un promotor de velocidad variable, así cuando aumente la velocidad del alternador aumenta el voltaje y la frecuencia, no se necesitan ajustes especiales al voltaje pero es un método costoso, por esta razón se usan con frecuencia diversos arreglos con engranajes y poleas de paso variable.

## **1.10 ANÁLISIS ESPECTRAL: FÓRMULAS Y DIAGRAMAS.**

Se han discutido diversos aspectos del motor de inducción. La sencillez constructiva, bajo mantenimiento, larga vida útil, versatilidad y bajo costo, han colocado a esta máquina como pilar del desarrollo industrial moderno.

Sin embargo, la regulación de torque y velocidad con estos motores no fue frecuente hasta los ochenta, con la evolución de los controladores electrónicos de potencia.

El primer método desarrollado para regular la velocidad del motor de inducción fue la inclusión de resistencia adicional en el circuito rotórico. El problema con este procedimiento es el excesivo consumo de energía en pérdidas.

Posteriormente se utilizó el mismo principio, pero en lugar de quemar la energía en una resistencia externa, se rectificaba la tensión del rotor y con esta potencia se accionaba a una máquina de corriente continua, que a su vez motorizaba a un generador sincrónico y devolvía el exceso de potencia a la red.

### **1.10.1 Método de Kramer**

Requiere de un gran número de máquinas para controlar la velocidad de la máquina de inducción, además los rendimientos de toda la cascada no son muy altos. La regulación de la tensión en el estator permite ajustar la velocidad en un rango limitado, debido a que el torque eléctrico depende del cuadrado de la tensión de alimentación. Las

máquinas con alta resistencia en el circuito rotórico amplían el rango posible de control de velocidad con este método.

En procesos, donde se necesitan dos o tres velocidades, es posible mediante un cambio en las conexiones de las bobinas, alterar el número de pares de polos de la máquina variando de esta forma la velocidad sincrónica mecánica. Este método se utiliza en la actualidad en los elevadores o ascensores residenciales y en muchas otras aplicaciones.

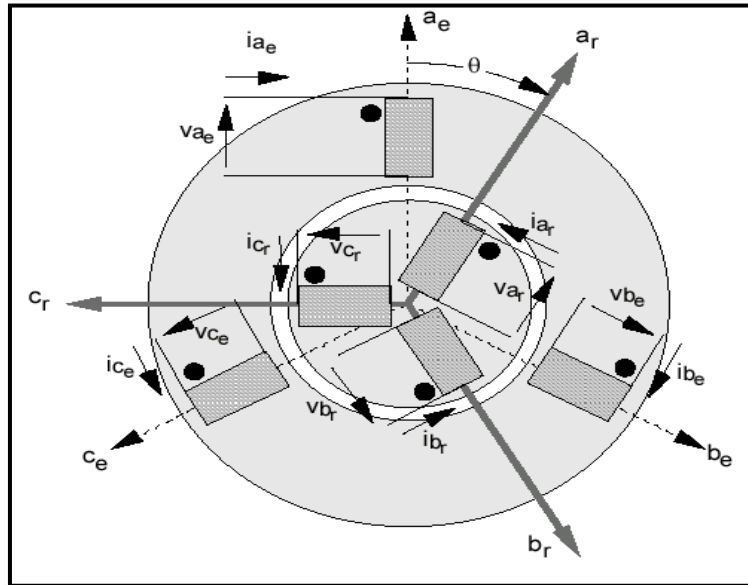
Un sistema de gran difusión industrial es el controlador tensión-frecuencia constante, se alimenta la máquina de inducción con una fuente de alimentación con tensión y frecuencia variable para ajustar la velocidad sincrónica. La tensión de alimentación se mantiene proporcional a la frecuencia para que la máquina opere siempre con la misma densidad de flujo en el entrehierro. Este método de control de velocidad requiere fuentes que ajusten la amplitud y la frecuencia de la fuente.

En un principio esto se realizaba mediante un sistema -Motor de corriente continua controlando la velocidad de un generador sincrónico-. Hoy por hoy los inversores modernos logran este objetivo más eficientemente y con menor costo.

Durante muchos años el control tensión-frecuencia constante reguló la velocidad de los motores de inducción. Sin embargo, el desarrollo sostenido de los controladores electrónicos de potencia no ha sido capaz de sustituir completamente a la máquina de corriente continua por la de inducción. Ya que el motor de corriente continua posee tiempos de respuesta menores y características de operación, difíciles de obtener con otras máquinas. Se desarrollaron modelos de la máquina de inducción mediante las técnicas de los fasores espaciales y la teoría del campo orientado. Con estas nuevas herramientas se intentó reproducir los controles del motor de corriente continua, pero aparecieron limitaciones que aún hoy día no han podido ser superadas completamente, pero ya se dispone a nivel comercial de controladores de máquinas de inducción que utilizan ampliamente los fasores espaciales y la teoría del campo orientado.

### **1.10.2 Modelo de la máquina de inducción en fasores espaciales**

Para la modelación transitoria del motor de inducción en fasores espaciales los devanados son trifásicos en el estator y en el rotor, y las bobinas producen una distribución sinusoidal de la fuerza magnetomotriz en el entrehierro. También se considera que el estator y el rotor de la máquina son cilíndricos, y el efecto de las ranuras es despreciable. En la figura 1.11 se presenta un esquema del motor, y de los sistemas de referencia estáticos y rotóricos.



*Figura. 1.11 Máquina de inducción trifásica*

Los fasores espaciales son una transformación matemática que permite representar un sistema de tensiones, corrientes mediante un fador en el espacio, su posición y magnitud dependen del tiempo. Para transformar las ecuaciones 1.12 y 1.13, se tienen los fasores espaciales de las ecuaciones 1.14 y 1.15:

$$\vec{v}_e \equiv [v_{a_e} + av_{b_e} + a^2v_{c_e}] \quad (1.12)$$

$$\vec{v}_e = \text{Voltaje del estator}$$

$$V_{a_e} = \text{Voltaje de la fase "a" del estator}$$

$$V_{b_e} = \text{Voltaje de la fase "b" del estator}$$

$$V_{c_e} = \text{Voltaje de la fase "c" del estator}$$

$$\boxed{\vec{v}_r \equiv [v_{a_r} + \alpha v_{b_r} + \alpha^2 v_{c_r}]}$$
 (1.13)

$\vec{v}_e =$  Voltaje del rotor

$V_{a_r} =$  Voltaje de la fase "a" del rotor

$V_{b_r} =$  Voltaje de la fase "b" del rotor

$V_{c_r} =$  Voltaje de la fase "c" del rotor

$$\boxed{\vec{i}_e \equiv [i_{a_e} + \alpha i_{b_e} + \alpha^2 i_{c_e}]}$$
 (114)

$\vec{i}_e =$  Corriente del estator

$i_{a_e} =$  Corriente de la fase "a" del estator

$i_{b_e} =$  Corriente de la fase "b" del estator

$i_{c_e} =$  Corriente de la fase "c" del estator

$$\boxed{\vec{i}_r \equiv [i_{a_r} + \alpha i_{b_r} + \alpha^2 i_{c_r}]}$$
 (1.15)

$\vec{i}_r =$  Corriente del rotor

$i_{e_r} =$  Corriente de la fase "a" del rotor

$i_{b_r} =$  Corriente de la fase "b" del rotor

$i_{c_r} =$  Corriente de la fase "c" del rotor

### 1.10.3 Régimen permanente del motor de inducción en fasores espaciales

El motor de inducción en régimen permanente se alimenta en el estator con un sistema trifásico de tensiones de secuencia positiva, y las bobinas del rotor se cortocircuitan. Las corrientes del estator y rotor son balanceadas durante la operación en régimen permanente:

$$\boxed{V_{a_r}(t) = V_{b_r}(t) = V_{c_r}(t) = 0}$$
 (1.16)

$V_{a_r} =$  Voltaje de la fase "a" del rotor

$V_{b_r} = \text{Voltaje de la fase "b" del rotor}$

$V_{c_r} = \text{Voltaje de la fase "c" del rotor}$

Mediante la definición 1.12 y las condiciones de contorno 1.16 se obtiene el siguiente resultado en la ecuación 1.17:

$$\boxed{\vec{V}_r = 0} \quad (1.17)$$

$\vec{v}_r = \text{Voltaje del rotor}$

La definición del deslizamiento de acuerdo con la fórmula 1.18:

$$\boxed{S \equiv \frac{\omega_r}{\omega_e} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}} \quad (1.18)$$

$S = \text{Desplazamiento}$

$\omega_e = \text{Velocidad angular del estator}$

$\omega_r = \text{Velocidad angular del rotor}$

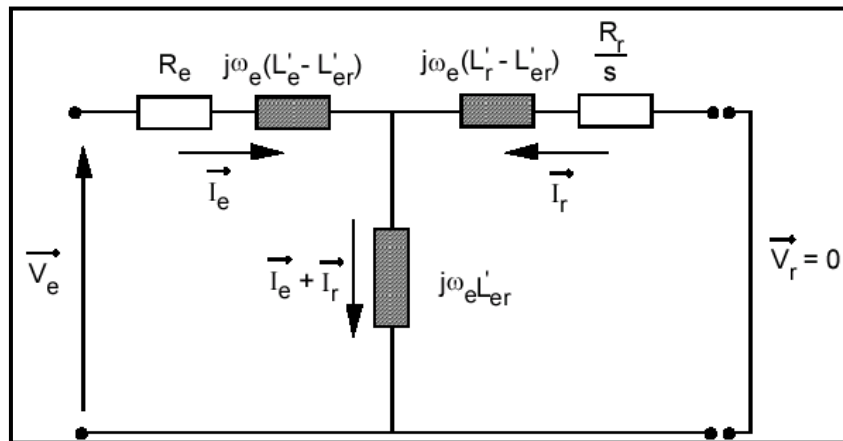


Figura. 1.12 Motor en régimen permanente (transformación a fasores espaciales)

El torque eléctrico del motor de inducción en función de la corriente y la resistencia del rotor, indica la ecuación 1.19 que toda la potencia que traspasa el campo magnético rotatorio del estator al rotor produce el torque eléctrico.



$$\boxed{T_e = \frac{3}{\omega_e} \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{S}} \quad (1.19)$$

$T_e =$  Torque eléctrico

$\omega_e =$  Velocidad angular del estator

$I_r^2 =$  Corriente del rotor

$R_r =$  Resistencia del rotor

$S =$  Deslizamiento

#### 1.10.4 Transformación a variables de campo orientado

Los fasores espaciales simplifican las ecuaciones dinámicas del motor de inducción. Se representa mediante tres ecuaciones para el circuito del estator, tres para el rotor y la ecuación mecánica del movimiento. Las seis ecuaciones circuitales de las bobinas se reducen a dos ecuaciones en variable compleja, una para el estator y otra para el rotor. La ecuación dinámica se mantiene, pero expresada en función de las nuevas variables eléctricas. Las nuevas expresiones son más simples porque la dependencia con el ángulo del rotor es menor.

De los fasores espaciales para la transformación de coordenadas, tres son los más utilizados: El fasor espacial de la corriente del estator, de la corriente del rotor y el de la corriente de magnetización. La selección de cualquiera de estos patrones depende del análisis o la aplicación que se está realizando. El fasor espacial de la corriente del estator puede ser medido directamente, el de la corriente de magnetización está asociado directamente con el flujo resultante en el entrehierro y con la producción del torque eléctrico, el de la corriente del rotor tiene incidencia sobre el rendimiento del motor y la transferencia de potencia al eje mecánico. En este curso introductorio sólo se desarrollarán las ecuaciones del motor de inducción referidas al fasor espacial de la corriente de magnetización.

Para interpretar algunos resultados físicamente es conveniente indicar que es posible asociar esta representación con FMM y campos magnéticos distribuidos

sinusoidalmente. Si se multiplica el fasor espacial de la corriente del estator por el número de vueltas de las bobinas del estator, el nuevo fasor espacial representa la FMM producida por las respectivas corrientes. De igual forma se pueden asociar o interpretar otros fasores espaciales con variables físicas del motor.

El campo magnético resultante en el entrehierro del motor resulta de la superposición de las FMM del estator y rotor. Para esto, se debe recordar que la posición del rotor es una variable, y que las bobinas del rotor y del estator poseen diferentes números de vueltas. Por lo que el fasor espacial de la  $i_m$  es la ecuación 1.20:

$$\vec{i}_m = i_m(t)e^{j\delta(t)} \quad (1.20)$$

$e^j =$  Posición mecánica del rotor al sistema de referencia del estator

$$T_e = L_{er} \operatorname{Im} \left[ \vec{i}_e \cdot (\vec{i}_r \cdot e^{j\theta})^* \right] \quad (1.21)$$

$$T_e = \frac{L_{er}^2}{L_r} i_m i_{qe} \quad (1.22)$$

$\frac{L_{er}^2}{L_r} =$  Campo magnético de las corrientes del estator

$i_m =$  Corriente de magnetización

$i_{qe} =$  Corriente del estator

La expresión 1.22 se desprende de la ecuación 1.21 y determina el torque eléctrico del motor de inducción con una constante que depende de los parámetros del modelo, por el producto de  $i_m i_{qe}$  proporcionales a la magnitud de dos flujos ortogonales en el entrehierro. Se define el torque eléctrico instantáneo del motor de inducción tal como en un motor de c.c que se determina por el producto de la corriente de campo y armadura. Esto es ventajoso para controlar el torque eléctrico producido por el motor.

A diferencia del motor de c.c, en el de inducción no existen bobinas ortogonales por donde se pueda inyectar las corrientes  $i_m i_{qe}$ . Las fuentes de tensión o corriente aplicadas

a las bobinas del estator deben producir las magnitudes adecuadas de las variables transformadas para un torque eléctrico determinado, y las nuevas variables no están desacopladas.

Se han desarrollado técnicas que permiten estimar la posición instantánea de la amplitud del campo magnético en el entrehierro, integrando numéricamente en tiempo real las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento eléctrico y mecánico de la máquina de inducción.

Las tensiones  $V_{de}$   $V_{qe}$  en el sistema de referencia solidario con el fasor espacial de la corriente de magnetización se determinan en la ecuación 1.23 a partir de las tensiones aplicadas a cada una de las fases del motor igual que para las corrientes:

$$\begin{bmatrix} V_{de} \\ V_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \text{sen}\delta \\ \text{sen}\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V\alpha_e \\ V\beta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \text{sen}\delta \\ \text{sen}\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a_e} \\ V_{b_e} \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Si las variables de control son las corrientes del estator, el sistema anterior se simplifica y la ecuación 1.23 representa la dinámica del motor de inducción. Esto es muy conveniente para diseños de sistemas de control de velocidad y torque en tiempo real.

La figura 1.13 presenta el arranque del motor de inducción convencional en vacío, y se le ha aplicado un sistema trifásico equilibrado de tensiones en el estator, con frecuencia angular constante.

Para las siguientes transformaciones con las ecuaciones 1.24 y 1.25 con las condiciones iniciales de un motor detenido, des-energizado, y un valor positivo pequeño para la corriente de magnetización  $i_m$ , para la integración numérica en el primer instante de tiempo.

$$\begin{bmatrix} i_{de} \\ i_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha_e} \\ i_{\beta_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a_e} \\ i_{b_e} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

$$\begin{bmatrix} V_{de} \\ V_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha_e} \\ V_{\beta_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a_e} \\ V_{b_e} \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

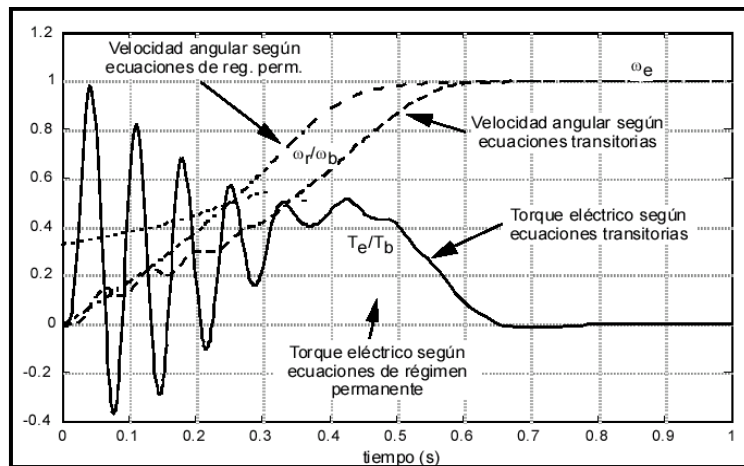


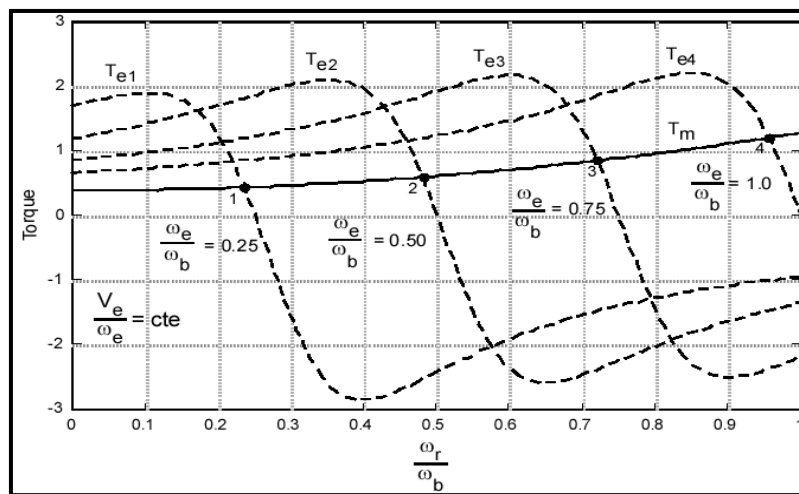
Figura. 1.13 Modelo transitorio y permanente del motor de inducción

En la figura 1.13 se compara el torque eléctrico y la velocidad angular del rotor, el torque eléctrico calculado, presenta fuertes oscilaciones durante el arranque, ya que la fuente debe incrementar el flujo en el entrehierro para producir torque eléctrico. La velocidad también es afectada por las fuertes perturbaciones del torque eléctrico, pero en menor medida por el retardo que introduce la inercia. Los resultados del análisis transitorio se encuentran retrasados con respecto a la respuesta dinámica del circuito equivalente. Los sistemas de control del motor de inducción por campo orientado intentan generar el flujo de magnetización lo más rápidamente posible, para que el torque eléctrico sea grande y permita incrementar la velocidad de respuesta del sistema.

### 1.10.5 Control tensión-frecuencia de la máquina de inducción

El primer controlador de velocidad de los motores de inducción y uno de los más utilizados en la práctica, consiste en regular la frecuencia de la fuente de alimentación. Variando la frecuencia de las tensiones aplicadas a las bobinas del estator, cambia la

velocidad de sincronismo del motor. La variación de la frecuencia afecta proporcionalmente las reactancias de magnetización y dispersión en el circuito equivalente, pero las resistencias se mantienen aproximadamente constantes, considerando que el efecto pelicular no es muy pronunciado. Para que la densidad de flujo magnético se mantenga prácticamente constante, y dentro de los límites de diseño de la máquina, es conveniente variar la amplitud de la tensión de alimentación en la misma proporción que se varía la frecuencia. De esta forma, la magnitud del torque eléctrico es similar a la que se obtiene a frecuencia nominal, pero la velocidad es variable.



**Figura. 1.14 Tensión frecuencia constante en el motor de inducción**

La figura 1.14 presenta las características torque eléctrico velocidad para un motor de inducción alimentado por cuatro frecuencias diferentes, manteniendo constante la relación entre la amplitud de la tensión de alimentación y la frecuencia. Si la variación de la frecuencia es lenta en comparación con la inercia del conjunto motor-carga mecánica, la corriente se reduce en un arranque directo.

Es posible mantener cualquier punto de operación intermedio, aumentando o reduciendo la velocidad. La figura 1.15 indica que operando a baja frecuencia, se incrementa el torque de arranque, pero el torque máximo es prácticamente constante, siempre y cuando las reactancias sean mucho mayores que las resistencias del modelo.

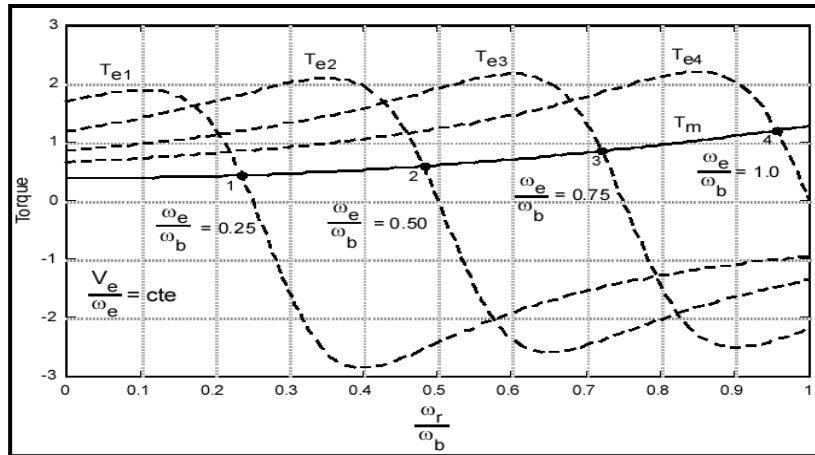


Figura. 1.15 Tensión-frecuencia constante en el motor de inducción

Este controlador de velocidad requiere una fuente de tensión trifásica regulable en magnitud y frecuencia. Mediante interruptores electrónicos de alta velocidad es posible construir fuentes de tensión alterna regulada en frecuencia y en magnitud. Con la aparición de los tiristores y transistores de gran potencia. Los inversores de tensión convierten fuentes de tensión o corriente continua en fuentes de tensión o corriente alterna.

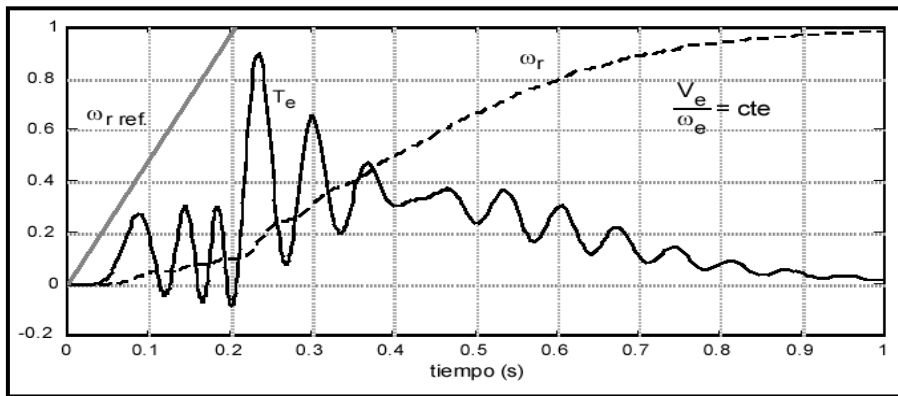


Figura.1.16 Análisis por campo de un controlador tensión-frecuencia constante

La figura 1.16 presenta el torque eléctrico y la velocidad del motor de inducción acelerado por un controlador tensión-frecuencia constante. El motor en vacío, y la referencia de velocidad es una rampa que se satura en la velocidad sincrónica nominal del motor.

### 1.10.6 Controladores de torque y velocidad por campo orientado.

Tal como sucede en los motores de c.c, el campo según la ecuación 1.26 tiene una constante de tiempo relativamente lenta y es conveniente para incrementar la velocidad de respuesta del sistema, mantener la corriente de magnetización en el máximo valor posible. La corriente de magnetización se controla mediante el ajuste de la corriente directa. En régimen permanente estas dos corrientes tienen el mismo valor, hecho que se deduce inmediatamente de la ecuación diferencial (1.33)

$$\boxed{\frac{di_m}{dt} = \frac{i_{d_e} - i_m}{T_r}} \quad (1.26)$$

$$\frac{di_m}{dt} = \text{Comportamiento dinámico del motor}$$

$$i_{d_e} = \text{Corriente directa del estator}$$

$$i_m = \text{Corriente de magnetización}$$

$$T_r = \text{Torque}$$

El principal problema de los controladores por campo orientado consiste en determinar el valor de las corrientes o tensiones de alimentación en variables primitivas, que producen los valores deseados de las variables de campo orientado.

La transformación directa e inversa entre variables primitivas y variables de campo orientado dependen de la posición instantánea del fasor espacial de la corriente de magnetización. Esto presenta un problema importante al diseñar este tipo de controladores, debido a que no resulta simple medir o estimar este ángulo. La medición requiere incluir sensores especiales en la máquina, estimar esta posición requiere la integración en tiempo real del sistema de ecuaciones diferenciales que la modelan. La primera solución es costosa y difícil de implementar en la práctica. La segunda alternativa depende de la velocidad del estimador, de la exactitud del modelo y de la variabilidad de los parámetros durante la operación.

La figura 1.17 presenta el diagrama de los fasores espaciales de la máquina de inducción cuando ésta opera en un punto de corriente mínima en el estator.

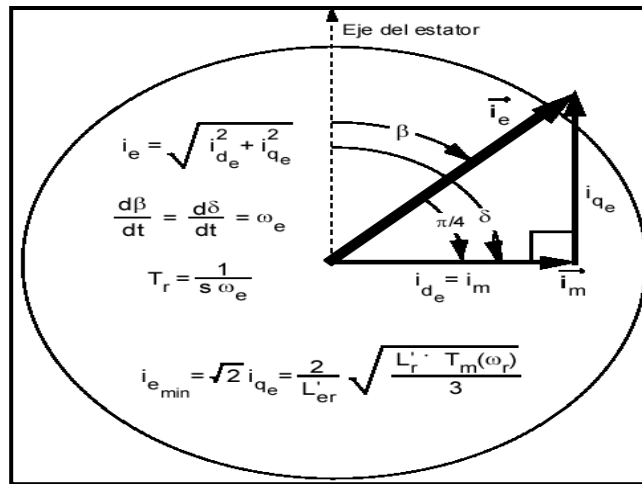


Figura. 1.17 Corriente mínima en el estator y determinación en línea de  $\tau_r$

### 1.10.7 Armónicas temporales en la máquina de inducción.

Durante todo el análisis del motor de inducción se ha considerado que las fuentes que lo alimentan pueden o no ser balanceadas, pero contienen una sola frecuencia, que se denomina componente fundamental.

En los procesos industriales modernos, utilizan convertidores electrónicos de potencia para la regulación y el control. Estos equipos introducen un fuerte contenido armónico en las fuentes de alimentación. En esta sección se analiza la respuesta del motor a sistemas armónicos temporales en su excitación. La simetría de las ondas de excitación limita en general, el rango de las armónicas a los múltiplos impares de la componente fundamental.

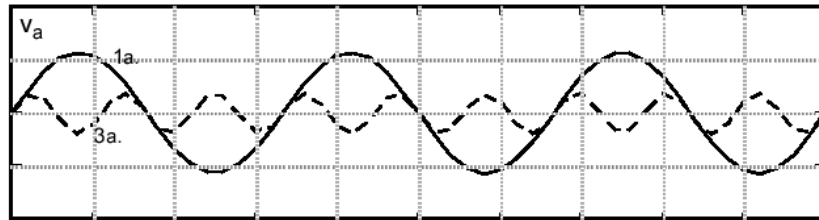
**Armónica Fundamental.**-A continuación se desarrolla el modelo del motor de inducción para cada una de las armónicas más frecuentes. Si existe linealidad, es posible utilizar el principio de superposición para determinar la respuesta completa de la máquina:

Tabla. 1.2 Armónicas en relación a la frecuencia

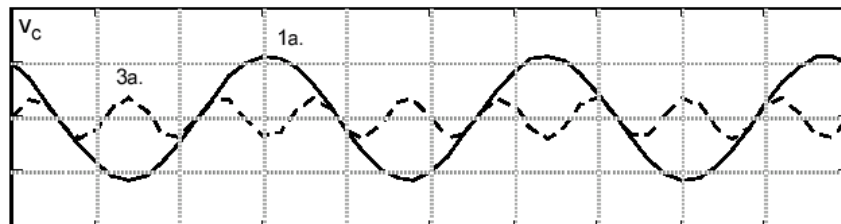
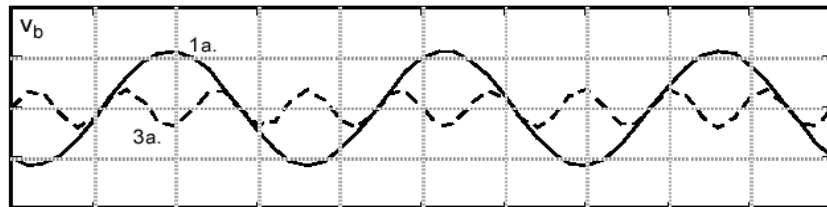
Armónica	Fundamenta	3a.	5a.	7a.	9a.	11a.	13a.
	1						
Frecuencia	$\omega_e$	$3\omega_e$	$5\omega_e$	$7\omega_e$	$9\omega_e$	$11\omega_e$	$13\omega_e$



**Sistema de terceras armónicas.-** En la figura 1.18 se presenta un sistema trifásico de tensiones, de primera y tercera armónica. Si el sistema de primera armónica o fundamental es balanceado, las terceras armónicas se encuentran en fase.



*Figura. 1.18 Primera armónica en un sistema trifásico equilibrado.*



*Figura. 1.19 Terceras armónicas en un sistema trifásico equilibrado*

Las terceras armónicas de la figura 1.19 en un sistema trifásico se encuentran en fase. Un sistema de tres tensiones en fase se comporta exactamente igual que un sistema de secuencia cero. Al estar en fase las tensiones, los flujos por las tres bobinas son iguales y se anulan en el entrehierro de la máquina. El circuito de secuencia de la figura 1.20 de la máquina de inducción modela adecuadamente este tipo de excitación, si se tiene en cuenta que las reactancias se incrementan en un factor de tres. La resistencia del modelo no se altera, siempre y cuando sea posible despreciar el efecto pelicular en los conductores.

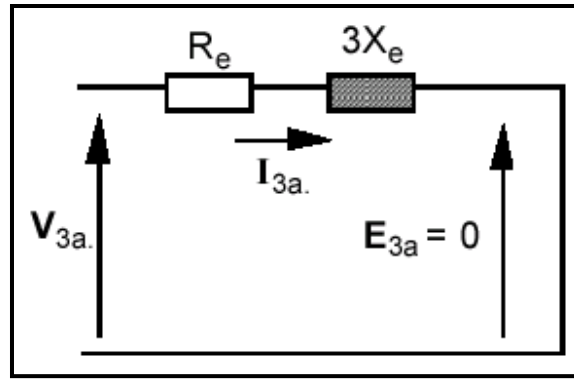


Figura. 1.20 Motor de inducción en un sistema de terceras armónicas

**Sistema de quintas armónicas.-** Un sistema de tensiones trifásicas de quinta armónica tiene la siguiente estructura especificada en las ecuaciones 1.28, 1.29, y 1.30:

$$V_{a_5}(\omega_e t) = \sqrt{2}V_5 \text{sen}5(\omega_e t) = \sqrt{2}V_5 \text{sen}(5\omega_e t) \quad (1.28)$$

$$V_{b_5}(\omega_e t) = \sqrt{2}V_5 \text{sen}5\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) = \sqrt{2}V_5 \text{sen}\left(5\omega_e t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (1.29)$$

$$V_{c_5}(\omega_e t) = \sqrt{2}V_5 \text{sen}5\left(\omega_e t - \frac{4\pi}{3}\right) = \sqrt{2}V_5 \text{sen}\left(5\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.30)$$

$V_{a_5}$  = Voltaje de la fase "a" quinta armónica

$V_{b_5}$  = Voltaje de la fase "b" quinta armónica

$V_{c_5}$  = Voltaje de la fase "c" quinta armónica

$V_5$  = Voltaje de la quinta armónica

$(\omega_e t)$  = Velocidad angular del estator en el tiempo

Estas tensiones corresponden a un sistema de secuencia negativa. Un sistema trifásico de quintas armónicas se comporta como un sistema de secuencia negativa.

Cuando se alimentan las bobinas de una máquina trifásica con este sistema de tensiones, se produce un campo magnético rotatorio de secuencia negativa. El modelo de la máquina en este caso es el circuito equivalente de la máquina en secuencia negativa,

amplificando las reactancias por cinco y calculando el deslizamiento correspondiente a la quinta armónica mediante la relación 1.31:

$$s_{5a} = \frac{-5\omega_e - \omega_r}{-5\omega_e} = 1 + \frac{\omega_r}{5\omega_e} = \frac{6 - s_{1a}}{5} \quad (1.31)$$

$s_{5a}$  = Deslizamiento de la quinta armónica de la fase "a"

$s_{1a}$  = Deslizamiento de la primera armónica de la fase "a"

$\omega_e$  = Velocidad angular del estator

$\omega_r$  = Velocidad angular del rotor

El torque eléctrico producido por las quintas armónicas tiene la misma dirección que el campo magnético rotatorio producido por estas componentes, es contrario a las agujas del reloj. En la figura 1.21 se presenta el circuito equivalente de un motor de inducción alimentada por un sistema trifásico balanceado de tensiones de quinta armónica. Las resistencias del estator y rotor se pueden mantener constantes, mientras que el efecto pelicular no sea importante. La resistencia de magnetización para estas frecuencias se puede corregir para considerar el incremento de pérdidas en el hierro por incremento de la frecuencia de excitación.

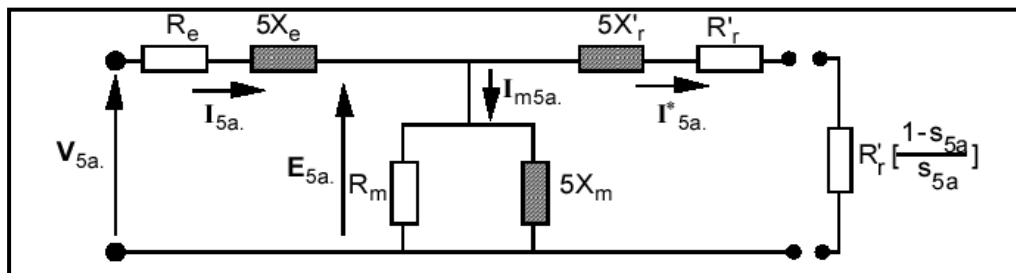


Figura. 1.21 Circuito del motor de inducción excitada por quinta armónica

**Sistema de séptimas armónicas.-** El sistema de tensiones trifásicas de séptimas armónica es la estructura 1.32, 1.33, 1.34:

$$V_{a7}(\omega_e t) = \sqrt{2}V_7 \text{sen}7(\omega_e t) = \sqrt{2}V_7 \text{sen}(7\omega_e t) \quad (1.32)$$

$$\boxed{V_{b_7}(\omega_e t) = \sqrt{2}V_7 \text{sen}7\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) = \sqrt{2}V_7 \text{sen}\left(7\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right)} \quad (1.33)$$

$$\boxed{V_{c_7}(\omega_e t) = \sqrt{2}V_7 \text{sen}7\left(\omega_e t - \frac{4\pi}{3}\right) = \sqrt{2}V_7 \text{sen}\left(7\omega_e t - \frac{4\pi}{3}\right)} \quad (1.34)$$

$V_{b_7}$  = Tensión de la séptima armónica de la fase “b”

$V_{c_7}$  = Tensión de la séptima armónica de la fase “b”

$(\omega_e t)$  = Velocidad angular del estator en el tiempo

Estas tensiones corresponden a un sistema de secuencia positiva. Un sistema trifásico de séptimas armónicas se comporta como un sistema de secuencia positiva.

Cuando se alimentan las bobinas de una máquina trifásica con este sistema de tensiones, se produce un campo magnético rotatorio de secuencia positiva. El modelo de la máquina en este caso es el circuito equivalente en secuencia positiva, amplificando siete veces las reactancias y calculando el deslizamiento correspondiente a la séptima armónica mediante la relación 1.35:

$$\boxed{s_{7a} = \frac{7\omega_e - \omega_r}{7\omega_e} = \frac{6 - s_{1a}}{7}} \quad (1.35)$$

$s_{7a}$  = Deslizamiento de la séptima armónica de la fase “a”

$s_{1a}$  = Deslizamiento de la primera armónica de la fase “a”

$\omega_e$  = Velocidad angular del estator

$\omega_r$  = Velocidad angular del rotor

El torque eléctrico producido por las séptimas armónicas tiene la misma dirección que el campo magnético rotatorio producido por estas componentes, gira en el mismo sentido de las agujas del reloj.

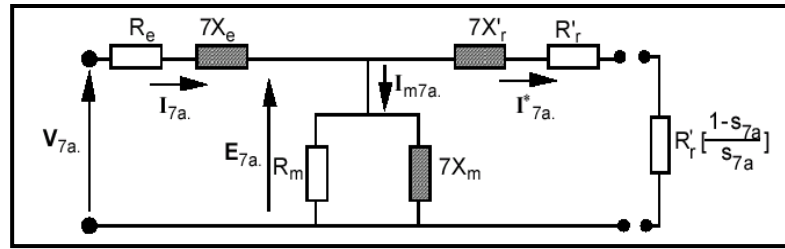


Figura. 1.22 Circuito del motor de inducción excitada por séptima armónica

La figura 1.22 presenta el circuito de un motor de inducción alimentado por un sistema trifásico balanceado de tensiones de séptima armónica. Las resistencias del estator y rotor se pueden mantener constantes, mientras que el efecto pelicular no sea importante. La resistencia de magnetización para estas frecuencias se puede corregir para considerar el incremento de pérdidas en el hierro por incremento de la frecuencia de excitación.

**Sistema armónico de orden “h”.-** Con los modelos de primera, tercera, quinta y séptima armónica, es posible identificar la generalización del modelo para cualquier armónica impar de orden “h”. El circuito equivalente del comportamiento de un motor de inducción trifásica, excitado por una fuente armónica de orden “h” se ha representado en la figura 1.23. Las reactancias crecen proporcionalmente al orden de la armónica, las resistencias son constantes mientras que pueda ser despreciado el efecto pelicular y el incremento de pérdidas en el hierro. Es importante destacar que aún cuando las pérdidas en el hierro crecen con la frecuencia, la densidad de flujo decrece según la ley de Faraday, atenuando este incremento.

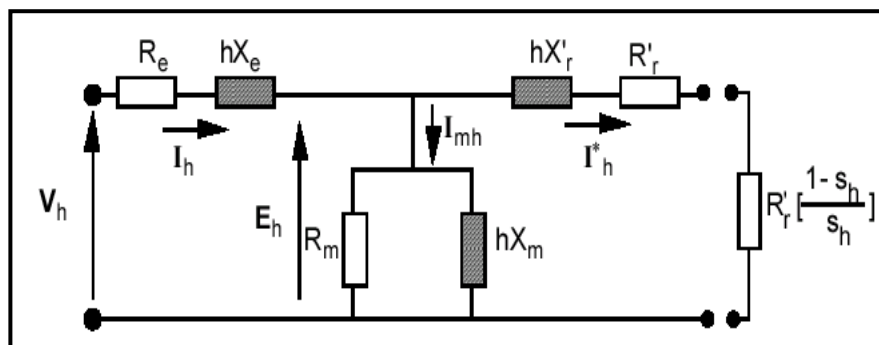


Figura. 1.23 Circuito para armónica de orden “h” de secuencia positiva o negativa

Para calcular el deslizamiento de la armónica “h”, es necesario determinar si una armónica es de secuencia positiva, negativa o cero. Todas las armónicas múltiplos de tres en un sistema trifásico son de secuencia cero, y como no producen campo

magnético rotatorio, no contribuyen a la producción de torque eléctrico. El resto de las armónicas impares producen torques eléctricos positivos o negativos según la secuencia del sistema armónico que genera el campo magnético rotatorio.

Armónica de orden “h” en un sistema trifásico de secuencia positiva es la relación 1.36:

$$h = 6m + 1, \quad m = 0, 1, 2, \quad (1.36)$$

Armónica de orden “h” en un sistema trifásico de secuencia negativa es la relación 1.37:

$$h = 6m - 1, \quad m = 1, 2, 3, \quad (1.37)$$

Deslizamiento de una armónica de secuencia positiva se calcula mediante la ecuación 1.38:

$$s_{h_+} = \frac{h + \omega_e - \omega_r}{h + \omega_e} = \frac{h + \omega_e - (1 - s_{1a})\omega_e}{h + \omega_e} = \frac{h_+ - 1 + s_{1a}}{h_+} \quad (1.38)$$

El deslizamiento de una armónica de secuencia negativa es la ecuación 1.39:

$$s_{h_-} = \frac{-h - \omega_e - \omega_r}{-h - \omega_e} = \frac{h - \omega_e + \omega_r}{h - \omega_e} = \frac{h_- + 1 - s_{1a}}{h_-} \quad (1.39)$$

$s_{h_+}$  = Deslizamiento de la armónica “h” positiva

$s_{h_-}$  = Deslizamiento de la armónica “h” negativa

$s_{1a}$  = Deslizamiento de la primera armónica de la fase “a”

$\omega_e$  = Velocidad angular del estator

$\omega_r$  = Velocidad angular del rotor

Como aplicación del desarrollo anterior, se puede evaluar la característica torque eléctrico-deslizamiento de un motor de inducción alimentada mediante una fuente

trifásica balanceada de tensión periódica, no sinusoidal. La figura 1.24, corresponde a la salida de un inversor trifásico sin modulación de pulso.

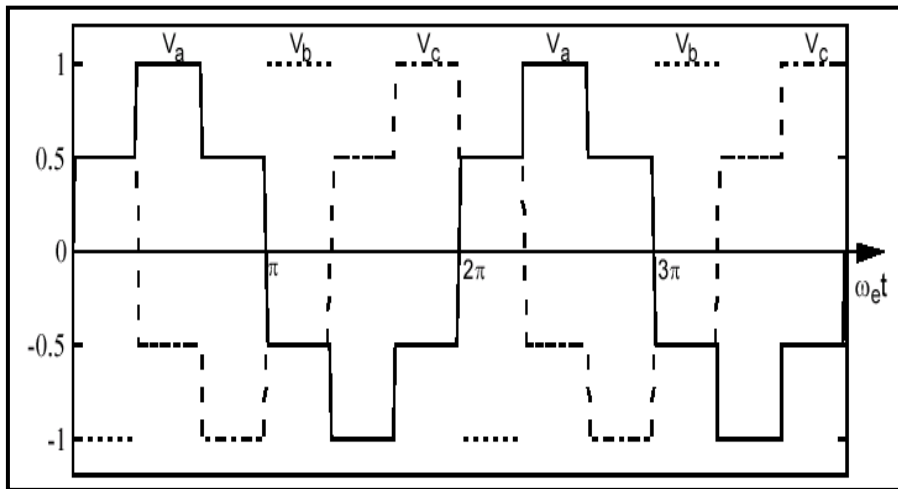


Figura. 1.24 Tensiones aplicadas a un motor de inducción

Si se calcula la distribución armónica de la fuente, por la descomposición en series, o con transformada de Fourier, se obtiene el espectro representado en la figura 1.25, y se determinan las contribuciones al torque eléctrico de las principales armónicas

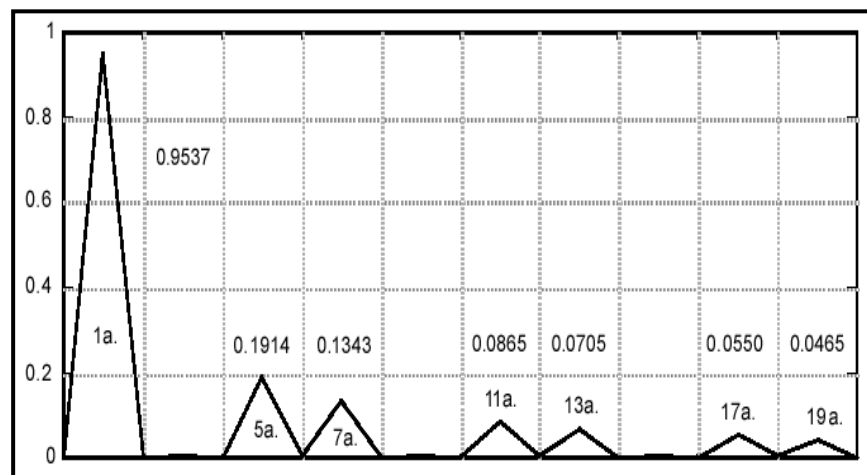
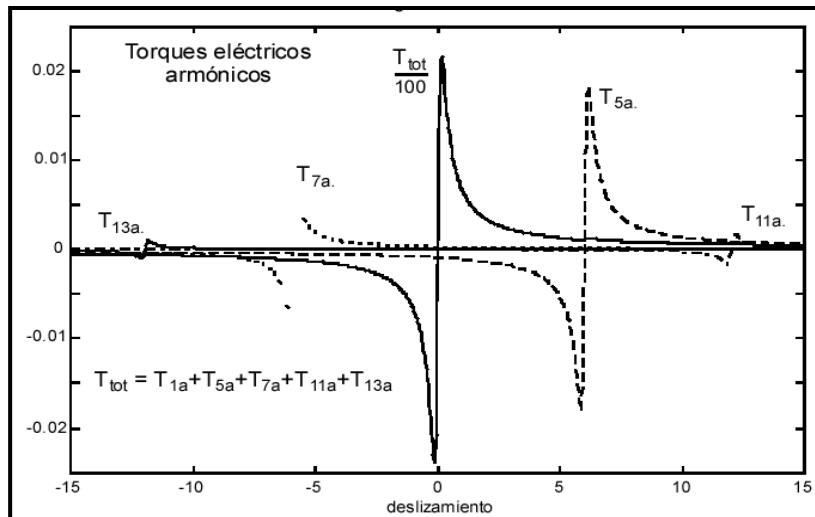


Figura. 1.25 Espectro armónico de la fuente de tensión (Módulo de la tensión)

La figura 1.26 representa las contribuciones al torque eléctrico de las armónicas (5a, 7a., 11a. y 13a.), el motor de inducción se comporta como un filtro pasabajo, atenuando los torques eléctricos producidos por excitaciones de alta frecuencia. Un comportamiento similar, ocurre con las corrientes.



*Figura. 1.26 Distribución armónica del torque eléctrico total.*

## CAPITULO II

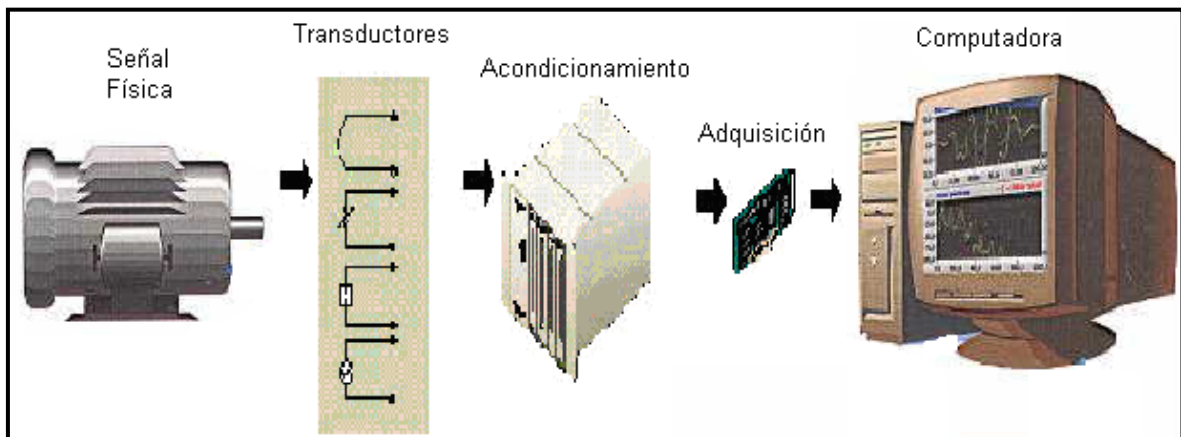
### ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES PARA LAS TARJETAS DE ADQUISICION DE DATOS.

#### 2.1 COMPONENTE DE LOS SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

El acondicionamiento de señales como se observa en la figura 2.1 es un componente importante en un sistema de adquisición de datos. Los sistemas de adquisición de datos



(DAQ) basados en PC y dispositivos insertables son usados en un amplio rango de aplicaciones en los laboratorios, en el campo y en el piso de una planta de manufactura.



*Figura 2.1. Sistema de adquisición de datos*

Este tratamiento es necesario hacerlo sobre grandes cantidades de información y con una elevada velocidad de procesamiento sobre cantidades elevadas de información. Comúnmente, los dispositivos usados para la adquisición de señales son las tarjetas de adquisición de datos, que son las que proporcionan al ordenador personal 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.

Para obtener información sobre fenómenos físicos es necesario introducir un nuevo elemento en el sistema que suministre un parámetro eléctrico a partir de un parámetro físico, dicho elemento es 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. Es necesario el uso de una señal

## **2.2 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.**

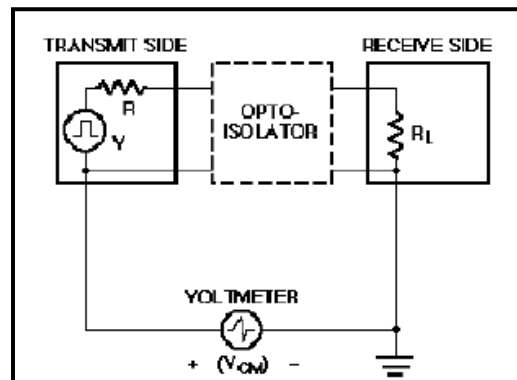
Típicamente, los dispositivos DAQ insertables son instrumentos de propósito general diseñados para medir señales de voltaje, el problema es que la mayoría de los sensores y transductores generan señales que debe acondicionar antes de que un dispositivo DAQ pueda adquirir con precisión la señal.

### **2.2.1 Funciones generales del acondicionamiento de señal**

Depende de los tipos de transductores que se usen, el uso de un equipo de acondicionamiento de señal puede mejorar la calidad y las prestaciones del sistema de adquisición. Este procesamiento al frente, conocido como acondicionamiento de señal, incluye funciones como amplificación, filtrado, aislamiento eléctrico y multiplexeo.

**Aislamiento.-** Puede ser óptico, magnético ó capacitivo. Aislamiento Galvánico: es la ausencia de cualquier camino directo para corriente DC.

**Bucles de tierra.-** Si la masa de la señal y la del sistema de medida son distintas existirá una diferencia de potencial que provocará una corriente entre ambos y por tanto un error en la medida. En la figura 2.2 el bucle de tierra está roto por el acoplamiento óptico. La mayoría de módulos acondicionadores SCC de National Instruments conectables a PC ofrecen un aislamiento de canal-tierra y canal-canal.



*Figura. 2.2 Optoacoplador en modo común*

**Optoacopladores.-** Un optoacoplador combina dos dispositivos semiconductores: fotoemisor y fotoreceptor existiendo entre ambos un camino por donde se transmite la luz. Estos elementos se integran dentro de un encapsulado que por lo general es del tipo DIP para dar cabida a dichos elementos.

Los optoacopladores son capaces de modular una señal luminosa partiendo de una señal eléctrica para luego convertirla otra vez en señal eléctrica. De esta forma, establecen un aislamiento galvánico entre los circuitos de entrada y salida.

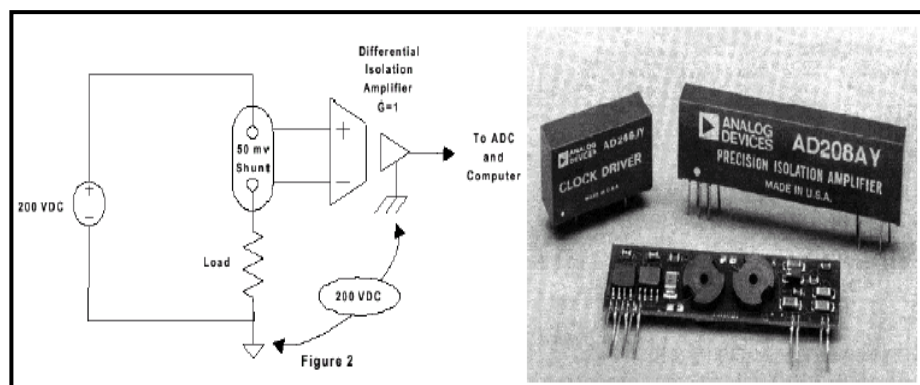
La señal de entrada es aplicada al fotoemisor (LED) y la salida se toma del fotoreceptor (fotodiodo, fototransistor). En el optoacoplador de la imagen, la unión base-colector se comporta como un fotodiodo

Los fotoemisores que se emplean en los optoacopladores de potencia son diodos que emiten rayos infrarrojos (llamados IRED) y los fotoreceptores pueden ser tiristores o transistores.

Cuando se aplica una tensión sobre los terminales del diodo IRED, éste emite un haz de rayos infrarrojos que se transmite a través de una pequeña guía-ondas de plástico o cristal hacia el fotoreceptor. La energía luminosa que incide sobre el fotoreceptor hace que este genere una tensión eléctrica a su salida.

**Amplificador de aislamiento (aa).**- Son amplificadores que rompen la continuidad óhmica entre su entrada y salida. Permiten:

- Proteger la entrada de la salida: ejemplo: Biometría
- Proteger la salida de la entrada: ejemplo: Sistema de medida – Sistema potencia



*Figura. 2.3 Amplificador de aislamiento*

El diagrama simplificado de funcionamiento incluye la modulación de la entrada para “traspasar” la barrera de aislamiento. Posteriormente se produce la demodulación para finalmente obtener la salida: amplificador ganancia variable, modulador AM, demodulador AM, oscilador, salida, entrada, barrera aislamiento

**Tipos de acoplamiento.-** Para acoplar entrada y salida, existen tres métodos principales: aislamiento inductivo, óptico y capacitivo:

▪ **Inductivo:**

Contienen minitransformadores toroidales.

▪ **Óptico**

Están basados en un conjunto LED-Fotodetector.

Ofrecen mayor ancho de banda que los basados en transformador

▪ **Capacitivo**

Al igual que los acoplados ópticamente, el proceso Modulación- Demodulación se realiza de forma digital, por lo que incluye A/D, D/A

Ganancia ajustable mediante resistencia externa RG

Impedancia de aislamiento =  $10^{14} \Omega // 6 \text{ pF}$

**Alimentación.-** Se necesita alimentación separada y aislada para entrada y salida, para lo que se utiliza un convertor DC/DC. Este convertor DC/DC puede estar incluido en el propio AA (interno) o proporcionarse de forma externa mediante un circuito específico.

**Amplificación.-** Debido al bajo nivel de señal que suministran los transductores, el ruido puede jugar un papel importante en lo que a error de medida de señal se refiere. Una amplificación fuera del chasis del PC y cerca de la fuente de origen de la señal puede incrementar la resolución de la medida y reducir de una forma efectiva el efecto del ruido sobre la señal deseada.

**El amplificador de instrumentación.-** Estos amplificadores llamados de instrumentación cumplen ciertos requisitos: Ganancia: seleccionable, estable, lineal; Entrada diferencial: con CMRR alto; Impedancia de entrada alta; Impedancia de salida baja; En la figura 2.4 el amplificador de instrumentación está basado en tres AO.

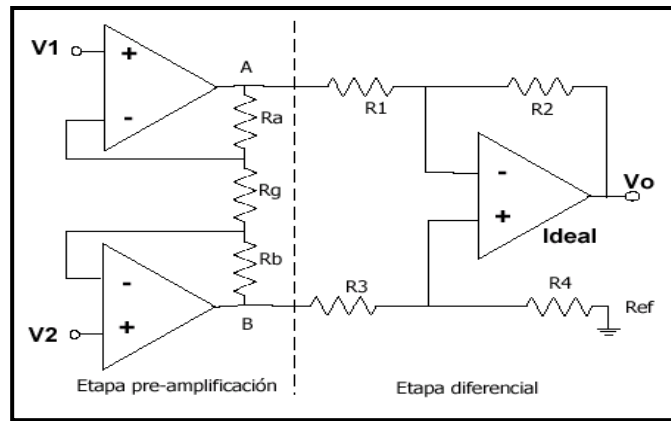


Figura. 2.4 Amplificador en instrumentación

### Amplificación de las entradas de una tarjeta de adquisición de datos.-

Especificaciones del amplificador de ganancia programable de las tarjetas de adquisición de datos Nacional Instruments, NI-6014. Se observa la diferencia en la impedancia de entrada cuando el amplificador está o no alimentado.

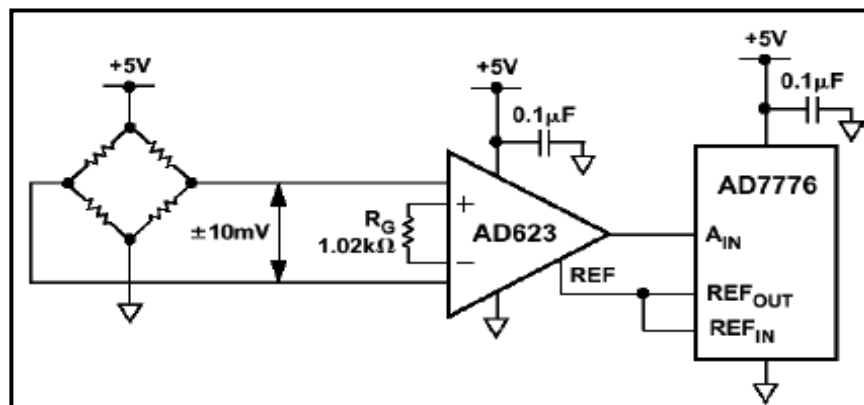


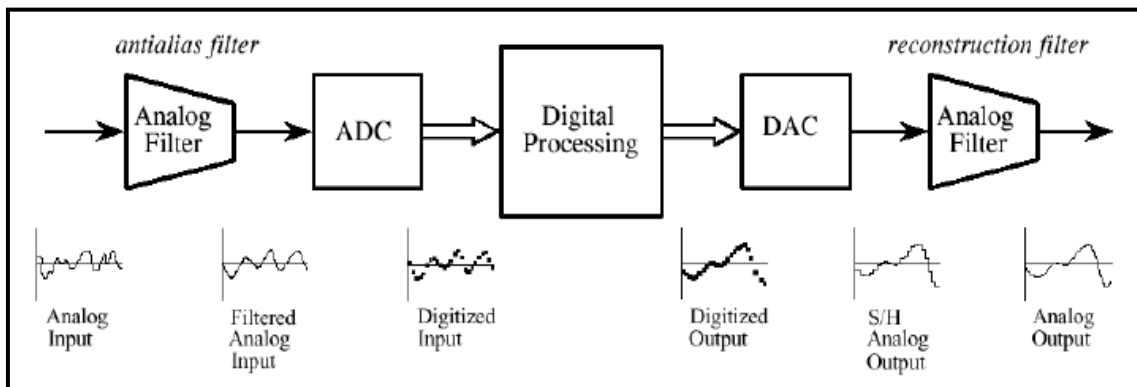
Figura. 2.5 Amplificador de ganancia programable.

**Filtrado.-** Los filtros son circuitos especializados en tratar de distinta forma (amplificar y desfazar más o menos) a los armónicos según su frecuencia. Si en cualquier circuito analógico se introdujera una señal compuesta de armónicos de todas las frecuencias, se vería que trata de distinta forma a unos armónicos que a otros dependiendo de su frecuencia. Esto puede considerarse como distorsión de la señal de entrada.

### 2.2.4 Acondicionamiento de la señal de entrada al sistema

Es necesario eliminar interferencias y ruido de las señales procedentes de sensores, la limitación del ancho de banda al rango útil del sistema, eliminar frecuencias superiores

antes de la conversión A/D (Anti-aliasing), y sintonización de señales útiles (ejemplo: demodulación).



*Figura. 2.6 Acondicionamiento de señal de entrada*

### 2.2.5 Acondicionamiento de la señal de salida

Se produce eliminación de armónicos innecesarios y supresión de ruido e interferencias que halla introducido el sistema.

**Tipos de filtro.-** Según la función que realiza tenemos: Paso-bajo, paso-alto, pasa-banda, banda-eliminada

Lo filtros desde el punto de vista temporal podemos observar claramente en la figura 2.7.

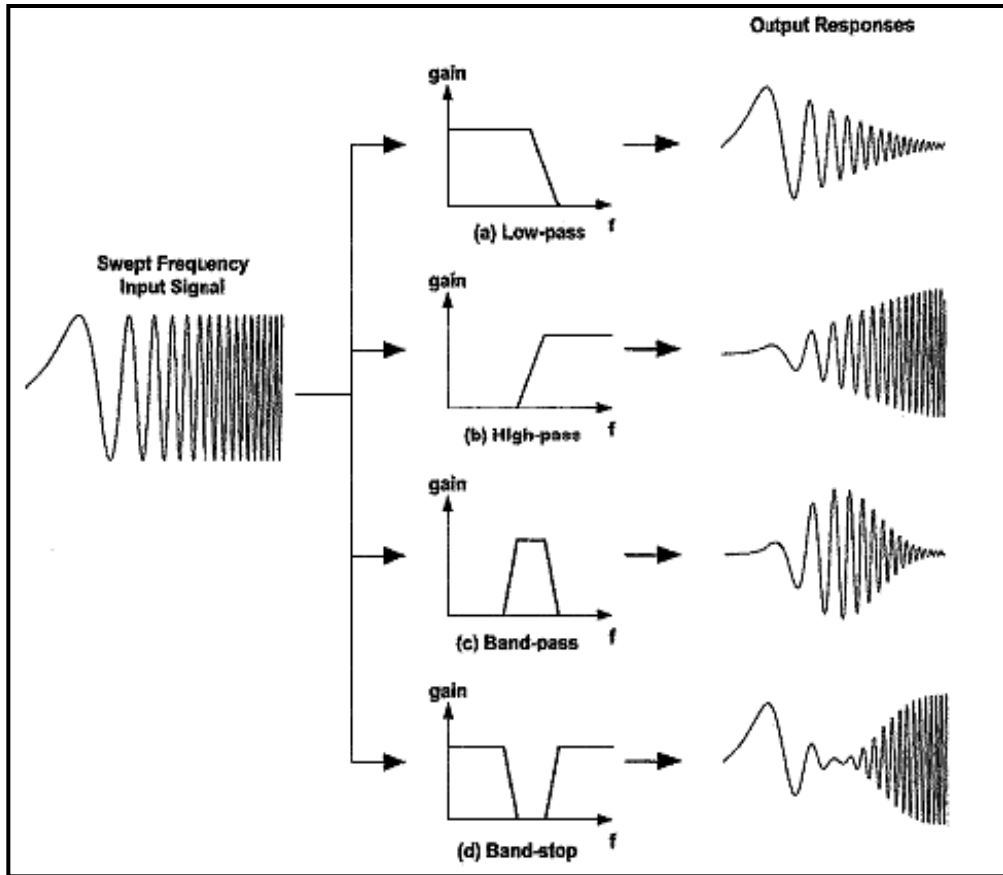


Figura. 2.7 Filtros según el tiempo

Si en un circuito analógico se introduce señales senoidales de todas las frecuencias y de amplitud unidad, en la salida se obtiene el comportamiento en frecuencia de dicho circuito. Para la fase se procedería de forma análoga.

El diagrama de Bode es la representación gráfica y se divide en dos: diagrama de módulo y diagrama de fase.

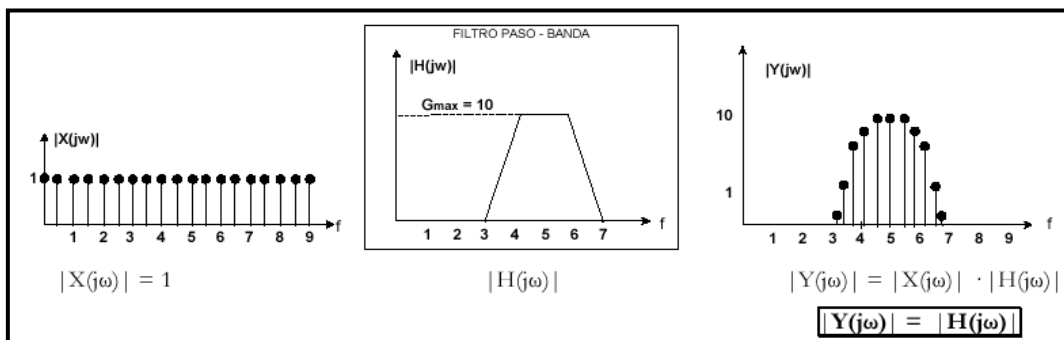


Figura. 2.8 Diagrama de Bode

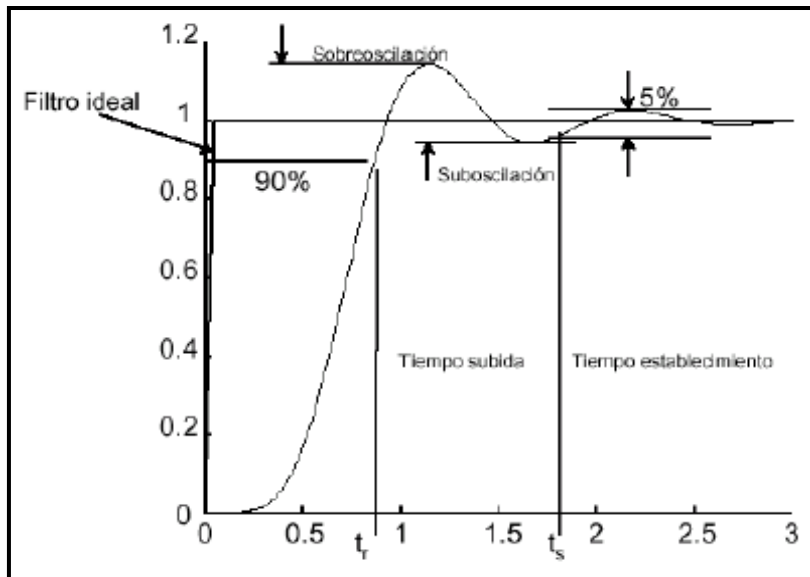


Figura. 2.9 Velocidad de respuesta, oscilación

Lo filtros desde el punto de vista de la frecuencia.

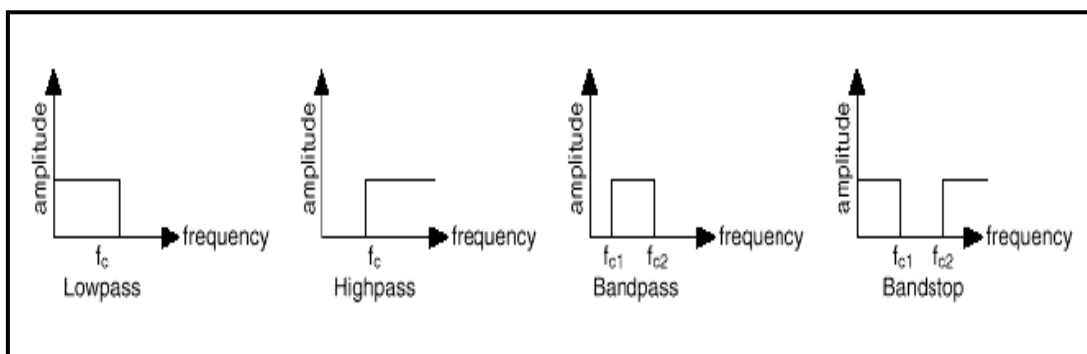


Figura. 2.10 Filtros según la frecuencia

### Parámetros de un filtro

- Frecuencia de corte ( $f_c$ ):  $3dB$  por debajo de la ganancia máxima. Se corresponde con un punto singular (cero) donde se cortan las asíntotas.

- Banda de paso
- Banda de transición
- Banda de rechazo, atenuada
- Rizado



•Factor de calidad: este factor solo tiene sentido en los filtros pasa-banda y banda eliminada resonantes.

Los filtros pasivos están basados en resistencias, bobinas y condensadores. Mientras que los filtros activos se basan en elementos activos como transistores, y amplificadores operacionales a los que se añaden elementos pasivos, Los inductores no se emplean mucho en los filtros activos pues son voluminosos, caros y suelen tener componentes resistivas indeseables de elevada magnitud. Se basan en amplificadores operacionales usados en frecuencias bajas y medias, dependiendo del AO, existen con mejor comportamiento en frecuencia.

**Según el orden de la función.-** Los de primer orden son: Pasabajo, Pasa-alto

**Funciones normalizadas de 2<sup>do</sup> orden resonantes.-** Son: Filtro pasa-banda (PF), Filtro rechazo de banda (RF). También se puede optar por la conexión en paralelo que permite obtener filtros de banda eliminada a partir de un pasabajo y un pasa-alto:

**Filtros de orden superior.-** Se obtienen mediante la conexión en cascada de filtros de orden inferior:

**Según el rizado y la banda de transición.-** Según el valor de los parámetros de la función de transferencia se obtienen unas características u otras en cuanto a rizado, anchura de la banda de transición, respuesta transitoria.

### **Butterworth**

- Ganancia máximamente plana en banda de paso. Si nos fijamos en la gráfica de respuesta del pasabajo de 2<sup>do</sup> orden, para que esto sea así, se debe tomar el valor 2.
- Banda de transición amplia
- Buena respuesta transitoria
- Mala respuesta en fase.

### **Chebyshev**

- Rizado en la banda pasante, es decir distorsión, pero a cambio la banda de transición es más estrecha.
- Peor respuesta transitoria que Butterworth

### **Bessel**

- Banda de transición amplia
- Desfase lineal, por lo que el tiempo de propagación es constante. Este aspecto es importante cuando se trabaja con la fase de la señal como parámetro portador de la información.

### **Cauer o elíptico**

- Banda de transición muy estrecha
- Rizado en banda pasante y banda eliminada
- Peor respuesta transitoria que Chebyshev
- Indicados para la eliminación de una frecuencia.

**Filtros universales integrados.-** Permite implementar filtros pasa-alto, pasa-banda, pasa-bajo de diversos tipos como Butterworth, Bessel, y Chebyshev.

### **Filtros universales conmutados**

- La frecuencia de corte del filtro pasa-bajo es programable variando la frecuencia de conmutación.
- La frecuencia de corte ya no depende de la tolerancia de los componentes R y C como en el primer circuito, esto permite ajustar la frecuencia de corte modificando únicamente la frecuencia de corte.

## **Filtros digitales**

- Están implementados mediante algoritmos que ejecutan microcontroladores, microprocesadores, DSP's, etc. Realizan los algoritmos sobre el valor de las muestras obtenidas por el conversor A/D.
- Sólo pueden tratar armónicos situados por debajo de la mitad de la frecuencia de muestreo, que es la limitación de frecuencia (Teorema de Nyquist) en la entrada del A/D para evitar un fenómeno llamado aliasing. Para evitar ese problema se antepone al conversor A/D un filtro pasabajo que limite la banda de entrada al A/D a la mitad de la frecuencia de muestreo.

**Consideraciones prácticas.-** Hasta ahora para la obtención de las funciones de transferencia se ha considerado el amplificador operacional ideal, pero:

- A la frecuencia de trabajo, el Producto Ganancia por Ancho de banda GBP debe ser al menos 10.
- El Slew Rate limita la amplitud de la señal de entrada para una frecuencia determinada.
- En filtros pasa-bajo tener en cuenta las tensiones y corrientes de offset y sus derivadas.

Es así que la mayoría de los sistemas DAQ basados en PC incluyen algún tipo de acondicionamiento de señal además del dispositivo DAQ y la PC, como lo muestra la Figura 2.1

Sistemas de switcheo al frente también incrementan la funcionalidad de su sistema de medición y automatización. Switcheo de propósito general le proporciona control digital de la presencia o ausencia de su señal en el sistema, como la alimentación a un motor. Configuraciones de multiplexores/matriz de relevadores controlan la fuente y ruta de las señales en su sistema o actúan como multiplexores para dispositivos como DMMs.

### **2.2.4 Acondicionamiento de Transductores**

Los transductores son dispositivos que convierten fenómenos físicos como temperatura, carga, presión o luz a señales eléctricas como voltaje y resistencia. Las características de los transductores definen muchos de los requerimientos de acondicionamiento de señales de un sistema DAQ.

La mayoría de los productos de acondicionamiento de señal de National Instruments compensan las juntas frías usando un sensor adicional, como un termistor o sensor IC. Este sensor es colocado en el conector de señales o bloque terminal para medir la temperatura ambiente en la junta fría directamente. El software después puede calcular la compensación apropiada para los voltajes termoeléctricos indeseados.

- Señal Física
- Transductores Acondicionamiento
- Señal Adquisición
- Computadora

A los **sensores y actuadores** también se les conoce como transductores. Transductor es aquel elemento que convierte una señal de entrada de cierta naturaleza en una señal de salida de otra naturaleza. Por ejemplo, un micrófono es un sensor que convierte energía sonora (en forma de presión) en energía eléctrica, mientras que una bocina es un actuador que convierte una señal eléctrica en una señal sonora.

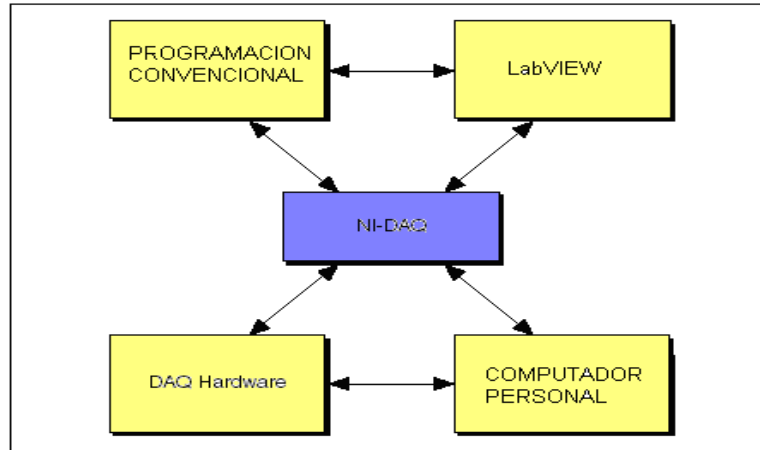
**La computadora o procesador.-** La computadora proporciona un procesador, un reloj, un bus para transferir datos y espacio de memoria o disco para almacenar datos.

### **2.3 TÉCNICAS DE MEDICIÓN Y REFERENCIA A TIERRA.**

Se analizará en base a la tarjeta **NI PCI 6014**. Para que funcione adecuadamente como un sistema de adquisición de datos necesita los siguientes requerimientos:

- El Manual de usuario NI PCI 6013/6014.
- Software NI DAQ compatible con la tarjeta.

- Un paquete de software de instrumentación virtual con su documentación (puede ser LabVIEW, Measurement Studio).
- Un computador con bus PCI.



*Figura 2.11 Relaciones entre el entorno de programación NI-DAQ y el hardware*

NI-DAQ lleva a cabo muchas de las complejas interacciones, como por ejemplo las interrupciones entre la computadora y dispositivo de adquisición de datos, necesarias para el eficiente uso del procesador; le proporciona también la posibilidad de migración, es decir mantiene una interfase de software que puede ejecutarse en diferentes versiones, para que se pueda cambiar de plataformas de hardware con modificaciones mínimas al código, cuando se está utilizando LabVIEW, tal como se muestra en la figura 2.11.

El ambiente de desarrollo de aplicación puede ser LabVIEW que proporciona gráficos interactivos una interfase muy innovadora y un lenguaje de programación gráfico muy poderoso, posee una librería de instrumentos virtuales muy versátil y completa que interactúan directamente con su hardware de aplicación.

### **2.3.1 Entradas análogas.**

Poseen dos modos de conexión de las entradas se indica en la tabla 2.1: NRSE y DIFF, NRSE proporciona 16 canales de entrada, y DIFF solamente presenta 8 canales de entrada, cada canal de entrada deberá ser configurado con un modo particular, y se deberá realizar programáticamente en algún utilitario de configuración de las entradas,

por ejemplo se podrían configurar 12 canales de entrada, cuatro de ellos en modo diferencial (utilizan 8 entradas) y 8 canales de entrada en modo NRSE.

La tarjeta NI 6014 tiene un rango de entrada bipolar que puede cambiar de acuerdo a la ganancia que se programa por el utilitario de software, cada canal puede ser configurado con ganancias de: 0.5, 1, 10 y 100 para la máxima resolución del conversor AD. Con la adecuada ganancia configurada, usted puede utilizar toda la resolución del conversor para la medición de la señal de entrada. Esto se indica el rango en la tabla 2.1.

*Tabla 2.1 rango de entrada y precisión de acuerdo a la ganancia seleccionada.*

GANANCIA	RANGO DE ENTRADA	PRECISIÓN
0.5	-10 a +10 V	305.2 $\mu V$
1.0	-5 a +5 V	152.6 $\mu V$
10.0	-500 a +500 mV	15.3 $\mu V$
100.0	-50 a +50 mV	1.53 $\mu V$

El dispositivo puede monitorear múltiples canales en forma simultánea como si fuera un solo canal a una velocidad predeterminada, sin embargo hay que prestar mucha atención con los límites predeterminados por cada canal. No es necesario configuraciones de tiempo adicionales cuando la ganancia es la misma o las ganancias de cada canal son altas y las impedancias de las fuentes de señal son bajas.

### **2.3.2 Salidas Análogas.**

La tarjeta NI 6014 proporciona dos salidas de voltaje análogas de 16 bits de resolución cada uno, cada salida tiene un rango bipolar fijo de salida,  $\pm 10V$ . Los datos escritos en el conversor digital análogo son interpretados en el formato de complemento a dos

### **2.3.3 Entradas y salidas digitales.**

La tarjeta NI 6014 contiene ocho líneas que corresponden a entradas y salidas discretas (DIO<0...7>) para propósito general. Se puede configurar por software en forma independiente cada línea ya sea como entrada o salida cuando el sistema arranca o sé

resetea los puertos digitales se colocan en el estado de alta impedancia. A través de estas líneas se pueden controlar los disparos de los contadores y temporizadores del dispositivo.

#### **2.3.4 Señales temporizadas.**

Proporciona una interfase flexible para conectar señales sincronizadas para otros dispositivos o circuitos externos. La tarjeta NI 6014 usa un (PFI) colocada en uno de los pines del bloque conector para conectarla con el dispositivo o circuito externo, estas conexiones están diseñadas para habilitar a la tarjeta para controlar y ser controlada por otros dispositivos o circuitos externos.

#### **2.3.5 Entradas de función programable.**

Los 10 pines del dispositivo están conectados al multiplexor que determina la ruta de las señales, para cada señal temporizada que puede ser seleccionada por software. Es importante que se note que se puede usar las entradas temporizadas una a una, o todas las señales temporizadas en forma simultánea con el mismo control del utilitario.

Este flexible esquema de ruteo reduce la necesidad de cambiar las conexiones físicas de las entradas y salidas en el conector para diferentes aplicaciones.

#### **2.3.6 Señales de entrada análoga.**

Las señales de entrada análoga de la tarjeta NI 6014 son ACH<0. 15>, AISENSE y AIGND. Las conexiones de este tipo de señales con la tarjeta dependen del tipo de fuente de la señal, dependiendo de ella se puede observar los diferentes tipos de fuentes de señales, y los modos sobre los cuales se actúa, ya que al hacer conexiones de señales se debe primero observar si es un sistema de tierra flotante o un sistema referenciado a tierra.

#### **2.3.7 Fuentes de señal flotantes.**

Para la tarjeta DAQ NI 6014 se deberá conectar la tierra de referencia de la tarjeta (AIGND) al sistema de tierra flotante para establecer la referencia de la señal en la tarjeta, por otra parte en este tipo de sistemas deberá tomarse en cuenta que las señales no sobrepasen el rango del sistema de modo común.

### 2.3.8 Fuentes de señal referenciadas a tierra.

Se debe considerar seriamente los sistemas de referencia de las señales, ya que si una fuente de señal esta inadecuadamente referenciada se obtendrán serios errores en el sistema de medición.

### 2.3.9 Modos de conexión de entradas análogas.

La tarjeta NI PCI 6014 que contiene internamente amplificadores operacionales de instrumentación (PGIA), puede usarse de distintas formas dependiendo de cómo se configure el modo de operación que puede ser DIFF y NRSE.

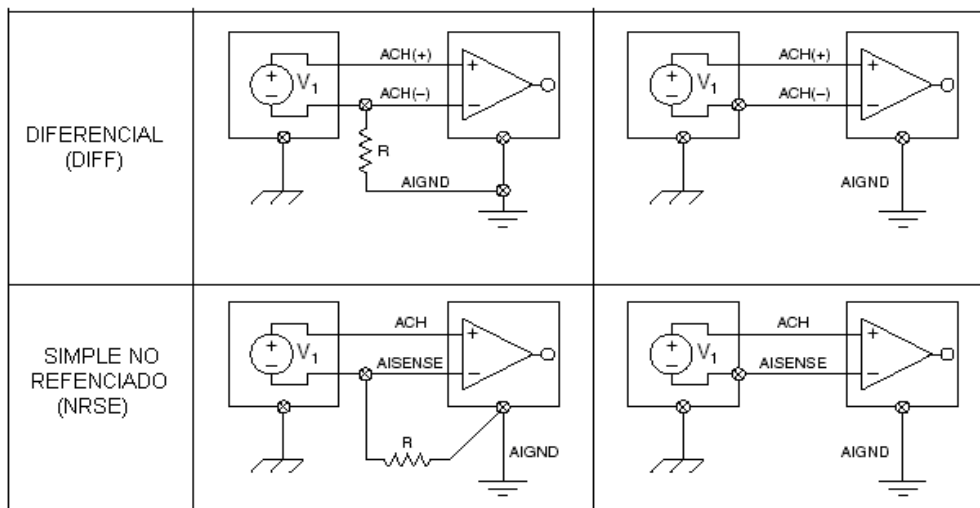


Figura 2.12. Modos de conexión de las estradas análogas

En la conexión en el modo NRSE las señales de entrada análoga son conectadas en ACH<0. 15>, e internamente conectadas al terminal positivo del amplificador operacional de instrumentación y la señal AISENSE es conectada al terminal negativo, en el modo diferencial (DIFF) las señales correspondientes a ACH<0. 7> son conectadas al terminal positivo del amplificador operacional, ACH<8. 15> son

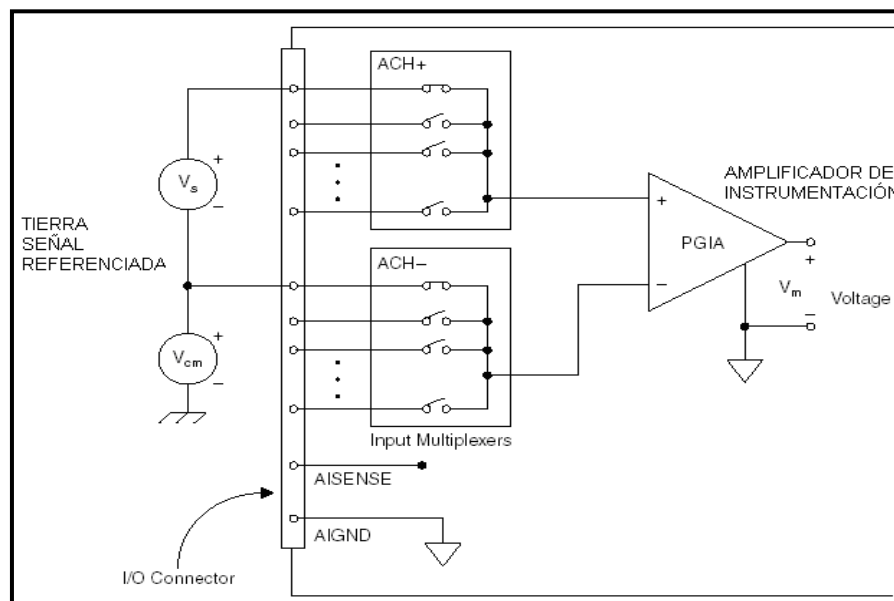


conectadas al terminal negativo y el terminal AISENSE no es utilizado. Será estrictamente necesario revisar que las fuentes de voltaje diferencial no sobrepasen los límites del voltaje de modo común, así como también que el exceder los límites del voltaje especificados puede destruir la tarjeta DAQ e incluso la computadora.

En la conexión diferencial está disponible cuando se programa la entrada como modo de canal diferencial (DIFF). Cuando se configura el canal de entrada en modo diferencial cada señal utiliza dos entradas del multiplexor, una para la señal y una para la referencia, por lo que con este tipo de modo la tarjeta solo posee ocho canales de entrada.

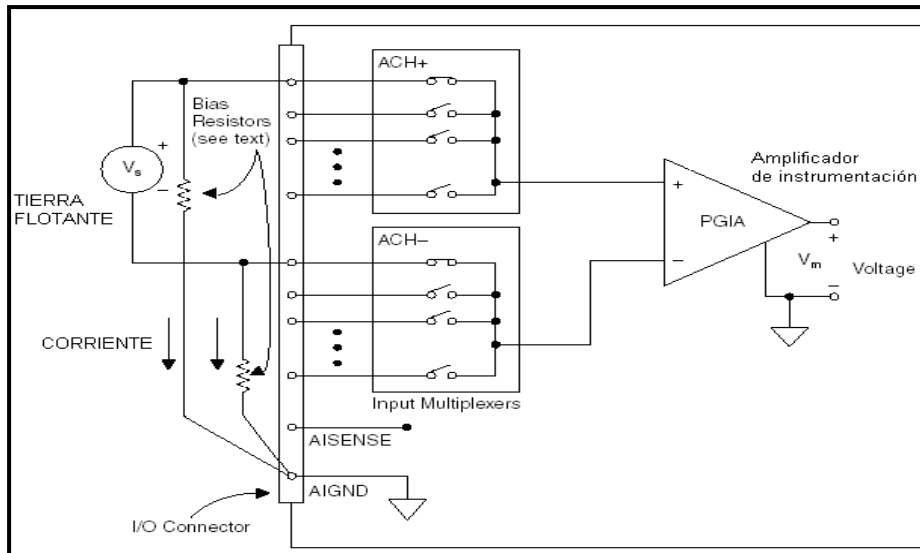
Las conexiones de modo diferencial reducen el ruido introducido dentro de la señal, e incrementa la relación de rechazo de modo común.

La figura 2.13 muestra la forma de conexión para señales que poseen una fuente de señal con referencia a tierra con un canal en un dispositivo configurado en modo diferencial. Con este tipo de conexión el amplificador elimina el ruido de modo común de la señal y la diferencia de potencial de tierra entre la tierra de la fuente de señal y la tierra del dispositivo, representados como  $V_{cm}$ .



**Figura 2.13** Conexión diferencial para señales referenciadas

Como se observa en la Figura 2.14 para señales flotantes, se debe conectar el terminal positivo de la fuente de la señal del amplificador con el terminal de AIGND, y el terminal negativo de la fuente del amplificador de la fuente de la señal AIGNDI. Esta conexión es recomendada para fuentes acopladas de corriente continua.



*El Figura 2.14 conexión diferencial para señales flotantes*

La conexión de referenciada simple (RSE Referenced Single-ended) es aquella en la que la señal de entrada analógica está referenciada a un punto de tierra común que puede estar compartido. La señal de la entrada está conectada al terminal positivo del amplificador operacional y la tierra común está conectada al terminal negativo de la entrada del amplificador usando la entrada AISENSE.

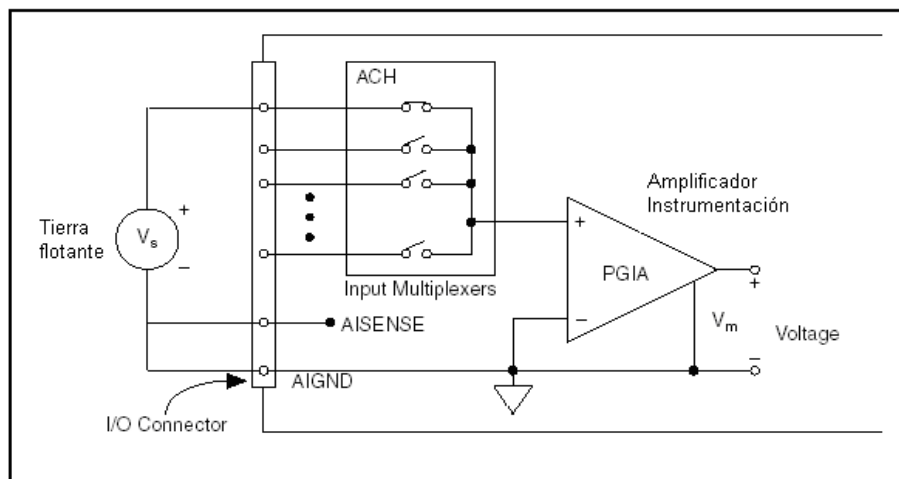
Cuando un canal está configurado en el RSE están disponibles 16 canales de entrada en la tarjeta NI 6014. Se podrá utilizar la configuración del RSE para señales de entrada que posean las siguientes características:

- Voltajes grandes de la entrada (mayores a un 1V)
- La fuente de la señal está conectada al dispositivo a distancias menores a 3m.
- El modo de conexión NRSE es solamente una configuración RSE con modificaciones de la referencia. La conexión de la entrada AISENSE se diferencia para conectar fuentes de señal flotante y fuentes de señal referenciadas. Para fuentes de señal de entrada flotante AISENSE está conectada directamente a AIGND, y la tarjeta proporciona la referencia de tierra para

señales externas, en cambio para fuentes de señal referenciada AISENSE está conectada a la referencia externa de tierra, previniendo de ésta forma lazos de realimentación de corriente por tierra y errores en la medición.

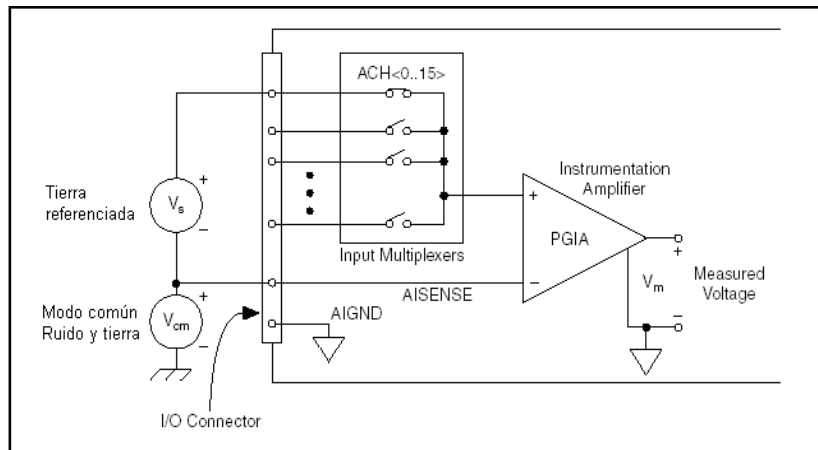
En el modo de conexión RSE se introduce mayor cantidad de ruido e interferencias electromagnéticas que en la configuración de modo diferencial, la interferencia por inducción magnética es proporcional al área de los conductores con los que está conectada la señal, y la interferencia eléctrica es resultado de la diferencia de campo que existe entre los conductores.

La figura 2.15 muestra la forma de cómo conectar fuentes de señal flotantes al canal de un dispositivo configurado en modo NRSE.



*Figura 2.15 conexión de señales flotantes en modo NRSE.*

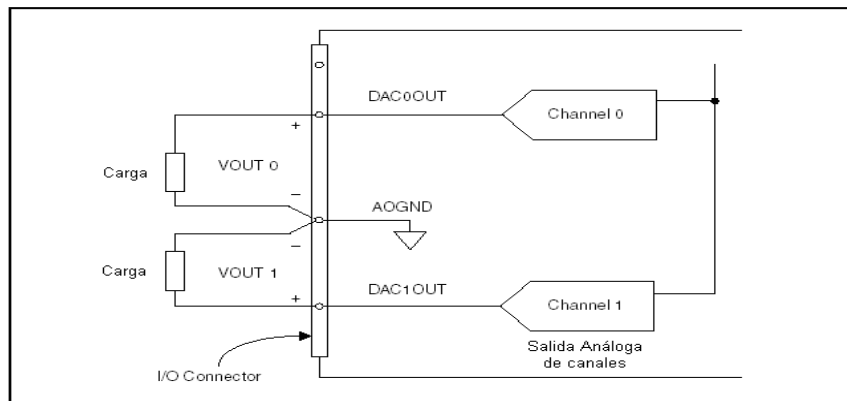
Cualquier diferencia de potencial entre la tierra del dispositivo y la tierra de la señal aparece como una señal de modo común entre la entrada positiva y negativa del amplificador operacional, y ésta diferencia es rechazada por el amplificador. Si AISENSE está conectada a AIGND la diferencia entre los potenciales de tierra aparece como un error en el voltaje medido. La figura 2.16 muestra la conexión de una señal referenciada en modo NRSE.



**Figura 2.16** conexión de señales referenciadas en modo NRSE

### 2.3.10 Conexión de salidas análogas.

Disponibles solamente en la tarjeta NI PCI 6014, las señales a considerar para las salidas análogas son: DAC0OUT, DAC1OUT y AOGND. DAC0OUT es la señal de salida de voltaje del canal 0, DAC1OUT es la señal de salida de voltaje para el canal 1 y AOGND es la tierra de referencia para ambos canales, y la referencia externa del sistema DAQ. La figura 2.17 muestra la forma de conexión de las salidas análogas para la tarjeta NI 6014.



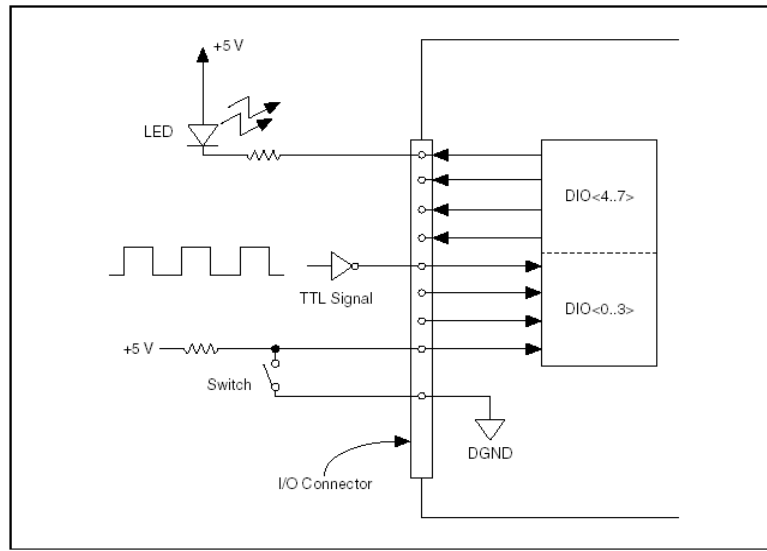
**Figura 2.17** Conexión de las Salidas análogas

### 2.3.11 Conexión de Entradas – Salidas Digitales.

Las entradas – salidas digitales en la tarjeta NI 6014 son: DIO<0..7> y DGND, las primeras son los puertos de entrada salida digital y DGND es la referencia común de

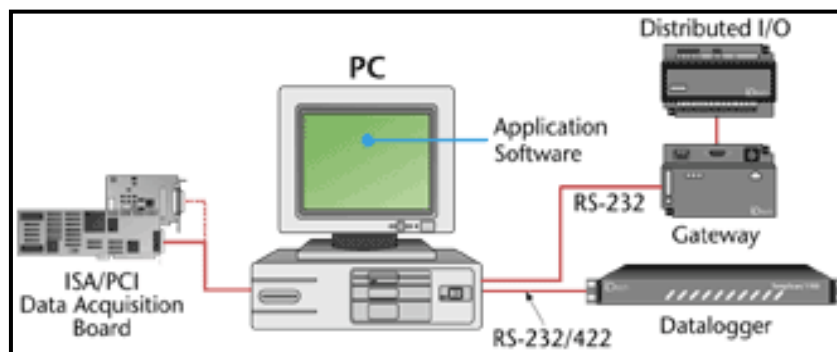
todas estas señales, estas señales pueden ser programadas individualmente como entrada o salida según sea la necesidad.

La figura 2.18 muestra la forma de conexión de las señales de entrada – salida digital para tres aplicaciones típicas. Aquí se puede observar la configuración de los canales DIO<0..3> como entrada digital y los canales DIO<4..7> como salida digital.



*Figura 2.18 Conexión de los canales de entrada – salida digital*

## 2.4 CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS DAQ.



*Figura. 2.19 Interfase de E/S*

### 2.4.1 Interfaces de E/S con el Proceso

Se refiere al equipo y programas de software de la figura 2.19 que permiten:

- Recibir señales analógicas, discretas y protocolizadas, para acondicionarlas y enviarlas para su procesamiento a los módulos de control y/o adquisición de datos, así como LAN.
- Acondicionar las señales procesadas por los módulos de control para enviarlas, en forma analógica al elemento final de control o en forma digital hacia elementos de control secuencial.

#### **2.4.2 Control y/o Adquisición de Datos**

Se refiere al equipo y programas de software que permiten efectuar:

El control continuo modulante y secuencial y la adquisición de datos de las variables del proceso para su procesamiento y almacenamiento.

La comunicación con los otros componentes del sistema.

#### **2.4.3 Interfaz del Usuario**

Se refiere al equipo y programas de software que permiten al usuario comunicarse con los demás componentes del sistema, para su configuración inicial; así como presentar, manipular y procesar la información requerida en el sistema para la operación y monitoreo del proceso y WAN con otros sistemas de cómputo.

### **2.5 TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

Las consideraciones que determinan las características hardware de las tarjetas de adquisición de datos, para tener un criterio de valoración de la efectividad de estas y de comparación entre diferentes placas.

#### **2.5.1 Tipos**

Actualmente se dispone de una gran variedad de tarjetas de adquisición de datos que permiten llevar a cabo nuestras aplicaciones. Sin embargo, es importante conocer cuales

son las prestaciones que pueden dar cada tarjeta, para que se adapte correctamente a la aplicación sin que sus prestaciones sean muy elevadas o muy bajas.

### **2.5.2 Entradas analógicas.**

Las prestaciones y precisión que proporcionan una tarjeta en cuanto a entradas se refiere, son básicamente el número de canales de que dispone, la frecuencia de muestreo, la resolución y los niveles de entrada. Generalmente muchos de estos parámetros se pueden configurar por software

**Frecuencias de muestreo.-** Determina la velocidad a la que se producen las conversiones ADC. Una frecuencia de muestreo elevada proporciona señales con mayor calidad de definición en tiempo

**Resolución.-** Indica el número de bits que utiliza el conversor ADC para cuantificar los niveles de señal analógica. Cuando mayor sea el número de bits del ADC mayor será el número de niveles de señal que puede representar.

**Niveles de entrada.-** Son los límites de entrada de tensión de las tarjetas de adquisición de datos. Para disponer del máximo de resolución en la medida, el margen dinámico de señal de entrada debe coincidir con el margen de la tarjeta, para esto se puede utilizar un amplificador.

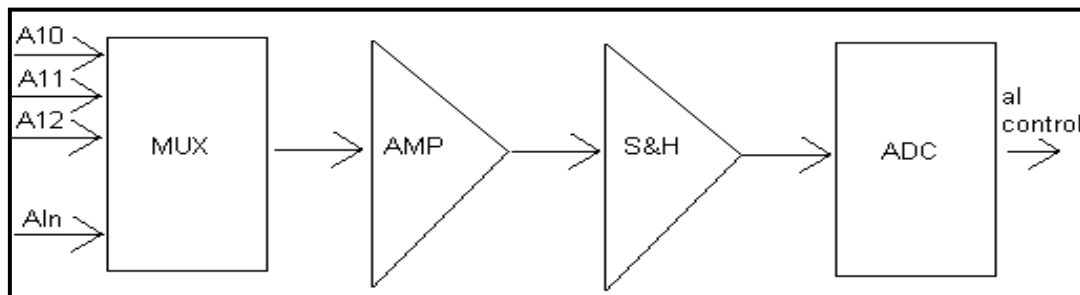
**Salidas analógicas.-** La mayoría de las tarjetas de adquisición de datos incorporan salidas analógicas básicamente las características técnicas de las salidas analógicas son las mismas conectadas para las entradas.

**Puertos digitales.-** Son líneas de entrada/salida digitales. Se utilizan para control de procesos, generación de testeo, para comunicación con equipos periféricos. Los parámetros más importantes que se caracterizan los puertos digitales son el número de líneas disponibles, la velocidad a la cual se pueden transferir los datos y la capacidad de control de diferentes dispositivos.

**Temporizadores.-** Son líneas útiles para muchas aplicaciones tales como contar las veces que se produce un evento, generar bases de tiempos para procesos digitales o generación de pulsos.

### 2.5.3 Diagrama de bloques general de una tarjeta de adquisición de datos

La figura 2.20 muestra la etapa de entrada de una tarjeta de adquisición de datos está compuesta por un multiplexor, que permite disponer de varios canales de entrada, segundo de un amplificador de instrumentación de ganancia programable. Este amplificador se conecta a otro amplificador de muestreo y retención y finalmente este proporciona el valor de tensión al conversor ADC.



*Figura. 2.20 Etapa de entrada general de una tarjeta*

Las salidas analógicas se componen de conversores DACV que se conectan directamente al bus interno del microprocesador. Para cada salida se necesita un conversor DAC que normalmente tienen la misma resolución que los ADC de la entrada.

Los puertos digitales están implementados por medio de un controlador digital paralelo como puede ser el 8255, circuito muy utilizado en este tipo de dispositivos.

## 2.6 HARDWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Es el corazón de cualquier sistema de adquisición de datos. Su función es convertir señales analógicas provenientes del mundo real a señales digitales (convertidores analógico a digital, ADC) y/o convertir señales digitales a analógicas (convertidores digital a analógico, DAC).



Generalmente las señales de los sensores son incompatibles con el hardware de adquisición de datos; para esto se requiere acondicionar la señal. Por ejemplo, si la señal es muy pequeña, es necesario amplificarla; por el contrario, si la señal es muy grande se requiere atenuarla. También es muy común eliminar componentes de frecuencias indeseables que se encuentran presentes en la señal a procesar. En el caso de las señales de salida, generalmente estas son de baja corriente y mediante hardware se les amplifica la corriente.

El hardware de adquisición de datos puede conectarse directamente a una ranura de expansión en la computadora o conectarse a ella externamente a ella mediante cables y algún puerto. En este caso, el hardware de adquisición de datos será la tarjeta de sonido de la computadora.

De forma simple, el hardware de adquisición de datos se caracteriza por los subsistemas que posee. Un subsistema es un componente del hardware de adquisición de datos que ejecuta una tarea específica. Entre los subsistemas más comunes se encuentran:

- Entradas analógicas
- Salidas analógicas
- Entradas/Salidas digitales
- Contadores y temporizadores

### **2.6.1 Subsistemas de entradas analógicas**

Estos subsistemas convierten (digitalizan) las señales analógicas de entrada provenientes de un sensor a una secuencia de bits que pueden ser interpretados por la computadora. Generalmente son dispositivos multicanal de 12 o 16 bits de resolución (ADC).

En este caso, la entrada analógica se refiere a la entrada de micrófono de la tarjeta de sonido de la PC.

### **2.6.2 Subsistemas de salidas analógicas**

Estos subsistemas convierten datos digitales almacenados en la computadora en señales reales analógicas. Las tarjetas de adquisición de datos comunes generalmente ofrecen dos canales analógicos de salida de 12 bits de resolución (DAC). En este caso, la salida analógica se refiere a la salida de bocinas (speakers) de la tarjeta de sonido de la PC.

### **2.6.3 Subsistemas de entrada/salida digital**

Estos subsistemas están diseñados para manipular entradas y salidas digitales (niveles lógicos) de y hacia el hardware. Estos valores generalmente se manejan como bits individuales o líneas o como un puerto generalmente de ocho líneas o bits.

### **2.6.4 Subsistemas contador/temporizador**

Se utilizan para contar eventos, para medir frecuencias, determinar períodos y generar trenes de pulsos.

## **2.8 SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.**

El software de adquisición de datos permite intercambiar información entre la computadora y el hardware. Por ejemplo, los programas típicos permiten configurar la tasa de muestreo de una tarjeta adquisitoras de datos y adquirir un número predefinido de muestras. Toda placa de adquisición de datos necesita un software de control. Este se puede llevar a cabo de tres formas distintas

La primera consiste en la programación directa de los registros. Es el método que permite más flexibilidad en cuanto a la capacidad de control pero es el más costoso por tiempo y dificultad de programación.

Otro método es utilizar un driver o software de control de la tarjeta. Se trata de una serie de funciones que actúan sobre los registros de la tarjeta pero a un nivel de programación superior al de la programación directa de los registros.

Por último existe la posibilidad de controlar la tarjeta a través de un programa de nivel superior a los anteriores. Un ejemplo de este método sería el control de la tarjeta a través de LabVIEW.

Para hacer uso de una aplicación de alto nivel es necesario conocer la existencia y el funcionamiento básico del driver correspondiente si se desea aprovechar al máximo las prestaciones de la tarjeta. En general cualquier aplicación se dedica a llamar a las funciones de este software. Es conveniente que el software de control de la tarjeta sea del mismo fabricante de esta. Las tarjetas que se utilizarán son de NI y son un conjunto de más de 110 funciones para el control de las placas de adquisición.

## **2.8 TOOLBOX DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)**

El toolbox de Adquisición de Datos (DAQ) le permite al usuario capturar y/o generar señales reales e interactuar con ellas desde Matlab. De lo anterior, puede deducirse que un sistema de adquisición de datos es un conjunto de software y hardware que permiten a un sistema digital “conectarse” al mundo real formado de:

- Sensores y actuadores
- Hardware de adquisición de datos
- Hardware de acondicionamiento de señal
- Computadora o procesador
- Programa

El toolbox de adquisición de datos se divide en tres componentes principales:

- Las funciones M establecidas
- El motor de adquisición de datos
- Los manejadores (drivers) de la tarjeta de adquisición de datos.

### **2.8.1 Funciones M**

Para ejecutar cualquier tarea con la aplicación de adquisición de datos, debe llamarse algunas funciones M. Entre otras cosas, estas funciones permiten:

Crear dispositivos de objetos que proporcionan un camino de Matlab al hardware y permite controlar el comportamiento de la aplicación

Capturar datos o sacar datos

Configurar las propiedades

Evaluar el estado y los recursos del hardware de adquisición

### **2.8.2 El motor de adquisición de datos**

El motor de adquisición de datos, o simplemente motor, es una librería de enlace dinámico (dll) en forma de archivo MEX que:

Guarda los dispositivos de objetos y sus valores asociados de configuración que controlan la aplicación de adquisición de datos

Controla la sincronización de eventos

Controla el almacenaje de datos capturados o en espera de ser sacados

Mientras el motor ejecuta estas tareas, puede usarse Matlab para ejecutar otras tareas como el análisis de los datos adquiridos. En otras palabras, el motor y Matlab son asíncronos.

### **2.8.3 El adaptador del manejador del hardware**

El adaptador del manejador del hardware, o simplemente el manejador, es una interfaz entre el motor de adquisición de datos y el manejador de la tarjeta. El propósito principal del adaptador es pasar información entre Matlab y la tarjeta adquisitora a través del manejador (driver) generalmente proporcionado por el fabricante. Por ejemplo, si se usa una tarjeta adquisitora de National Instruments, entonces debe estar instalado el manejador correspondiente de NI-DAQ proporcionado por el fabricante.

## **CAPITULO III**

### **PROGRAMACIÓN GRÁFICA ENTORNO A LabVIEW**

Normalmente un instrumento de medida consta de una cáscara rígida o panel frontal lleno de controles y visualizadores, con una circuitería interna, que procesan las señales de entrada.

El instrumento Virtual es un módulo software que simula el panel frontal de un instrumento apoyándose en elementos hardware, accesibles por el ordenador como tarjetas de adquisición, que realizan una serie de medidas

Cuando se ejecuta un programa que funciona como instrumento virtual (VI) se ve en la pantalla del ordenador un panel cuya función es igual a la de un instrumento físico, facilitando la visualización y control del aparato. El VI actúa de acuerdo a los datos reflejados en el panel frontal, como un instrumento físico.

El control de instrumentación por ordenador no es nuevo, pero en la década de los noventa los procesadores se incorporaron a equipos asequibles. Esto ha traído consigo un fuerte desarrollo de importantes paquetes de software que simplifican la creación de aplicaciones.

#### **3.1 ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS CON INSTRUMENTOS VIRTUALES.**

El concepto de *instrumentación virtual* nace a partir del uso de la PC como *instrumento* de medición de variables físicas (temperatura, presión, caudal), representadas por señales analógicas de corriente o voltaje. Este concepto va más allá de la simple medición de corriente o voltaje, pues también involucra el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los datos e información relacionados con la medición de una o varias señales específicas. El instrumento virtual utilizado para la adquisición de la señal, comprende también la interfaz hombre-máquina, las funciones de análisis y procesamiento de señales, las rutinas de almacenamiento de datos y la comunicación con otros equipos.

El término *virtual* surge de la funcionalidad y apariencia que (por software) el usuario puede definir para una PC utilizada como instrumento, creando una flexibilidad que no depende del fabricante como en el caso de los instrumentos tradicionales.

El *instrumento virtual* queda definido entonces como el conjunto de software y hardware que agregado a una PC permite a los usuarios interactuar con la computadora como si se estuviera utilizando un instrumento electrónico hecho a medida.

El software es la esencia del sistema de instrumentación virtual (como el hardware lo es para un instrumento tradicional), ya que es el que le confiere la *flexibilidad* necesaria para variadas aplicaciones y modos de operación (termómetros, control de funcionamiento de motores, análisis de señales biomédicas), seleccionables por programa.

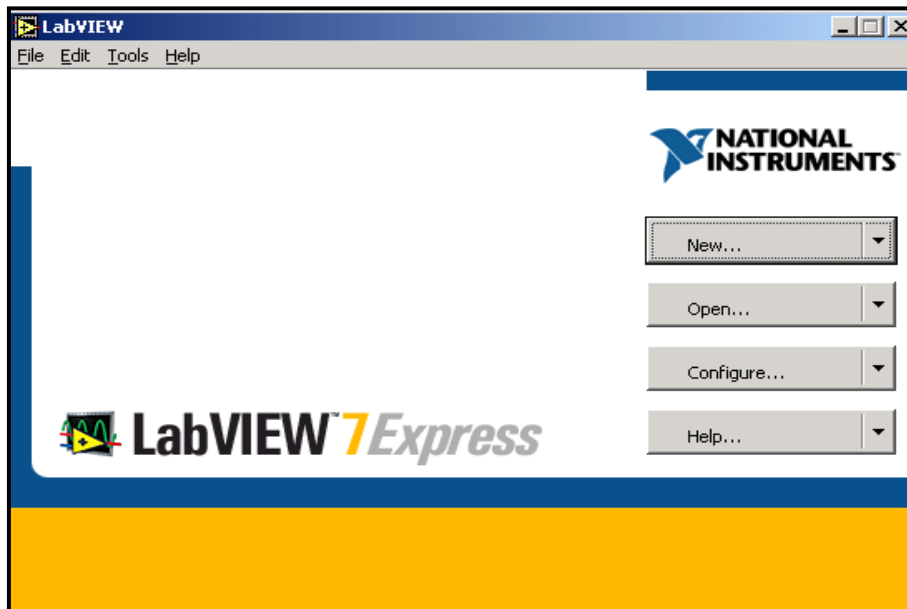
El instrumento virtual se completa con una tarjeta apropiada para la captura, conversión y acondicionamiento de las señales eléctricas representativas de las variables físicas a estudiar.

### **3.2 INTRODUCCIÓN A LABVIEW.**

LabVIEW es un lenguaje de programación gráfico en entorno Windows como se observa en la figura 3.1. LabVIEW, como LENGUAJE C es un sistema de la programación de uso general con bibliotecas extensas de funciones para cualquier tarea

de la programación. LabVIEW incluye las bibliotecas para la adquisición de datos, GPIB, control de instrumentos a través del pórtico serial, análisis, presentación y almacenamiento de datos.

LabVIEW es un sistema de programación de uso general, pero también incluye las bibliotecas de funciones y herramientas de desarrollo diseñados específicamente para la adquisición de datos y mando del instrumento. Se denomina al programa de LabVIEW instrumento virtual (VIs) porque su apariencia y funcionamiento pueden imitar a los instrumentos reales. Sin embargo, los VIs son similares a las funciones de los programas convencionales.



*Figura. 3.1 LabVIEW*

### **3.3 CREACIÓN DE VIS.**

Esta sección contiene la información básica al crear los instrumentos virtuales sobre (VIs), usando un VI en otros VIs, se puede programar las estructuras como los loops, y las estructuras de los datos.

Un instrumento virtual (VI) en la programación gráfica tiene a menudo una interfaz del usuario similar a los instrumentos físicos.

### **3.3.1 Construcción de un VI.**

Una de las llaves para crear las aplicaciones de LabVIEW es usando la naturaleza jerárquica de los VI. Después de crear un VI, se lo puede usar como un subVI en el diagrama de bloques de un VI de nivel superior.

### **3.3.2 Estructura de los VIs.**

La interfaz del usuario interactiva de un VI simula el tablero de un instrumento físico. El panel frontal puede contener botones, gráficos, y otros controles e indicadores. Mediante el uso del mouse y del teclado, se puede observar los resultados en la pantalla. Los VI reciben las instrucciones de un diagrama de bloques que se construye. El diagrama de bloques es el código fuente para los VI.

Los VIs son jerárquicos y modulares. Se los puede usar como nivel superior de los programas, o como los subprogramas dentro de otros programas.

Un VI dentro de otro VI se llama un subVI. El icono y conector de un VI trabaja como una lista del parámetro gráfico para que otros VIs puedan pasar los datos a un subVI.

Se construye un VI para lograr cada tarea secundaria y entonces combina esos VIs en otro diagrama de bloques y logra que el más grande realice la tarea. Finalmente, un VI de nivel superior contiene una colección de subVIs que representa las funciones de la aplicación.

Se puede ejecutar cada subVI solo, en el panel frontal aparte del resto de la aplicación, poner en marcha es mucho más fácil.

### **3.3.3 SubVI.**

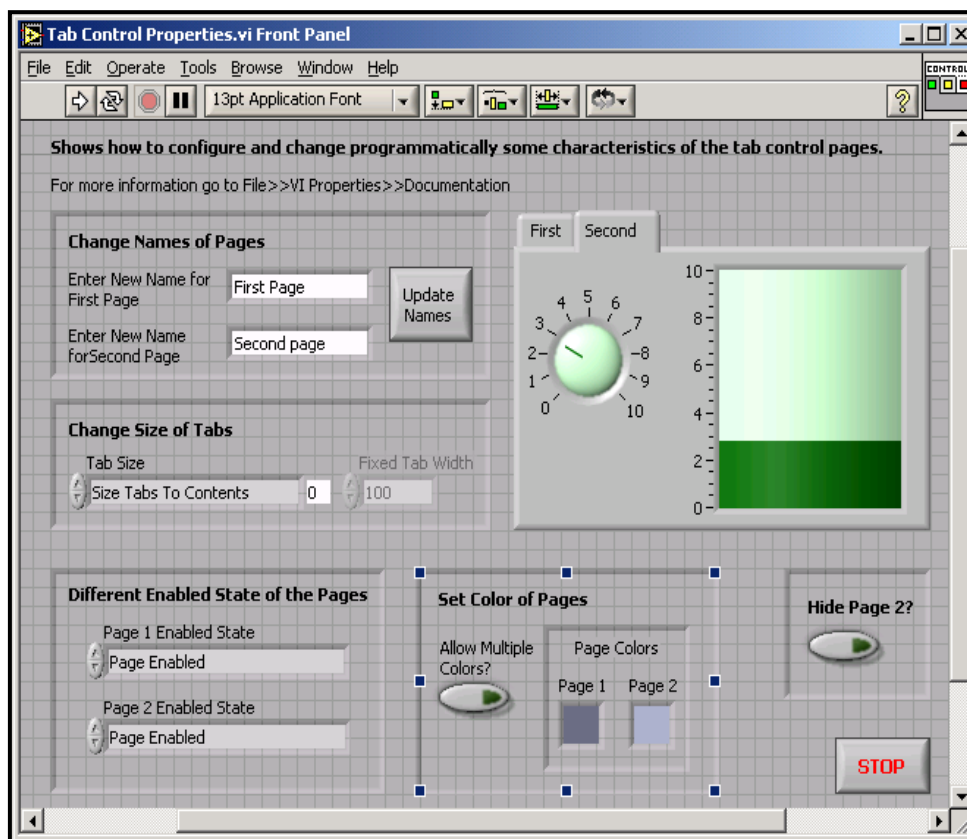
Es un VI que se usa en el diagrama de bloque de otro VI. Se puede usar cualquier VI que tiene un icono y un conector como un subVI en otro VI. En el diagrama de bloque,



se seleccionan VIs para usar como un subVIs, también se puede seleccionar cualquier VI en el sistema.

Un subVI es análogo a un subprograma. Un nodo del subVI es análogo a un la llamada a subrutinas. El nodo del subVI no es el propio subVI, así como un subprograma Un diagrama de bloque que contiene varias llamadas de nodos de subVI idénticas al mismo subVI en varios tiempos.

### 3.3.4 Panel frontal.



*Figura. 3.2 Panel frontal*

Es la interfaz del usuario de los VI. Se construye el panel frontal tal como se observa en la figura 3.2 con los mandos e indicadores que son los términos de la entrada y salida interactivos de los VI. Los controles son botones, diales, y otros dispositivos de entrada. Los indicadores simulan dispositivos de salida del instrumento y datos del despliegue que el diagrama de bloque adquiere o genera.

Los objetos del panel frontal manipulaban y desplegaban datos booleanos (VERDADERO o FALSO). Varios estilos están disponibles, como los interruptores, botones, y leds. El Botón de carrera se muestra roto cuando un VI no pueden correr debido a los errores. Se indica por una flecha rota en el botón de ejecución.

### 3.3.5 El diagrama de bloque.

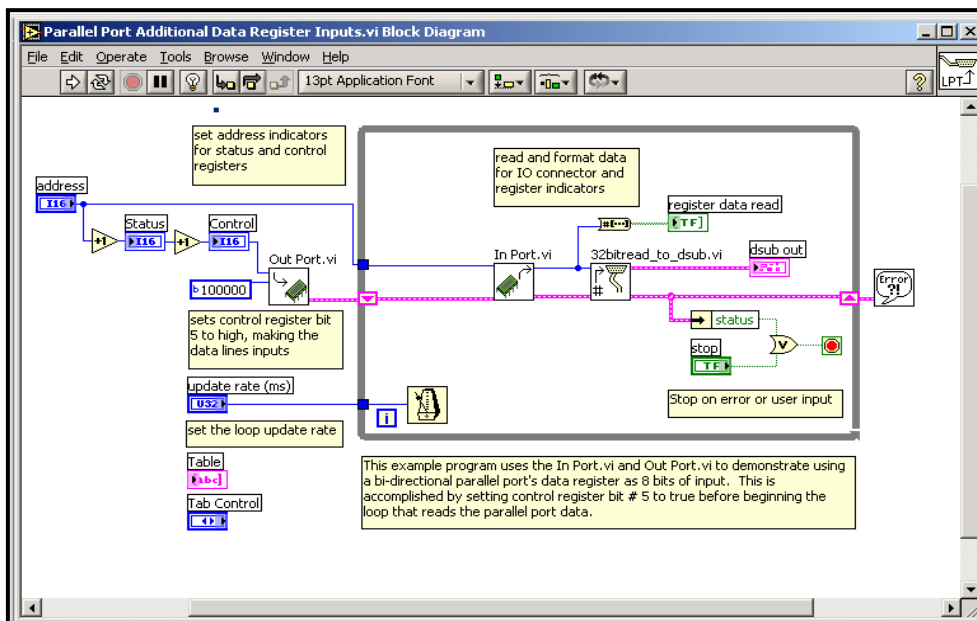


Figura. 3.3 Diagrama de bloque

Después de construir un panel frontal, se agrega un código que usa representación gráfica de funciones para controlar los objetos del panel frontal.

El diagrama de bloque contiene este código fuente gráfico. Los objetos del panel frontal aparecen como los terminales en el diagrama de bloque. El terminal sólo desaparece después que anula el objeto en el panel frontal.

Cada control o indicador en el panel frontal tienen un terminal correspondiente en el diagrama de bloque. Adicionalmente, el diagrama de bloque contiene funciones y estructuras de figura en las bibliotecas de VI de LabVIEW. Los alambres conectan cada

uno de los nodos en el diagrama de bloque, incluso los controles y terminales del indicador, funciones, y estructuras.

Es decir el Diagrama de bloque es una descripción Pictórica o representación de un programa o algoritmo. El diagrama de bloque es el código fuente para los VI. Consiste en iconos ejecutables los nodos llamados así como alambres que llevan los datos entre los nodos que se pueden observar en la figura 3.3.

### 3.4 JERARQUÍA DE UN VI.

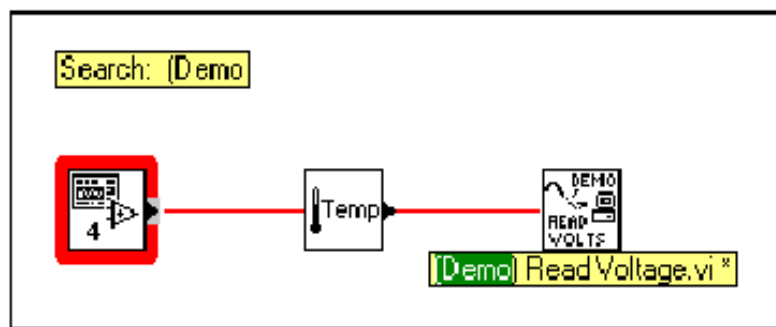


Figura. 3.4 Jerarquía

Cuando se crea una aplicación, empieza el nivel superior del VI y define las entradas y rendimientos para la aplicación. Entonces, se construye los subVIs y realiza los funcionamientos necesarios en los datos. Si un diagrama de bloque tiene un gran número de iconos, se los agrupa en un nivel más bajo de VI como se indica en la figura 3.4.

No se puede crear una biblioteca VI dentro de otra biblioteca VI. Tampoco se puede crear un nuevo directorio dentro de una biblioteca VI, después de crear una biblioteca VI, aparece en LabVIEW una carpeta con el VI en el icono plegador.

### 3.5 TIPOS DE DATOS.

LabVIEW ofrece una gran variedad de tipos de datos estos se pueden observar en el anexo A con los que se pueden trabajar respondiendo a las necesidades reales. LabVIEW es la diferenciación que efectúa en el diagrama de bloques entre los

diferentes tipos de controles o indicadores, basada un color propio. De esta manera, será muy fácil identificarlos y reconocer inmediatamente si se está trabajando con el tipo de datos adecuados. A continuación se describe estos tipos:

### **3.5.1 Boolean (verde claro).**

Son enteros de 16 bits. El bit más significativo contiene el valor booleano. Si el bit de 15 se pone a 1 entonces el valor del control o indicador es verdadero si este bit 15 vale 0, el valor de la variable booleana será falso.

### **3.5.2 Numéricos Extend (naranja).**

Según el modelo de ordenador que se esté utilizando los números de coma flotante con precisión extendida presentan el siguiente formato; Windows: 80 bits (formato precisión extendida 80287)

### **3.5.3 Numéricos Double (naranja).**

Los números en coma flotante de doble precisión cumplen con el formato de doble precisión IEEE de 64 bits. Es el valor por defecto de LabVIEW.

### **3.5.4 Numéricos Single (naranja).**

Los números en coma flotante de precisión simple cumplen con el formato de precisión simple IEEE de 32 bits.

### **3.5.5 Numéricos Long Integer (azul).**

Los números enteros largos tienen un formato de 32 bits, con o sin signo.

### **3.5.6 Numéricos Word Integer (azul).**

Estos números tienen un formato de 16 bits con o sin signo.

### **3.5.7 Numéricos Byte Integer (azul).**

Tienen un formato de 8 bits con o sin signo.

### **3.5.8 Numéricos Unsigned Long (azul).**

Es un número entero largo y sin signo

### **3.5.9 Numéricos Unsigned Word (azul).**

Es una palabra sin signo

### **3.5.10 Numéricos Unsigned Byte (azul).**

Es un byte sin signo

### **3.5.11 Numéricos Complex Extend (naranja).**

Es un número complejo con precisión extendida

### **3.5.12 Numéricos Complex Double (naranja).**

Es un número complejo con precisión doble

### **3.5.13 Numéricos Complex Single (naranja).**

Es un número complejo con precisión simple

### **3.5.14 Datos arrays.**

Es un elemento de la recopilación de datos que son del mismo tipo. Una serie tiene uno o más dimensiones. Se accede cada elemento de la serie a través de su índice. El índice está en el rango 0 a  $n - 1$ , donde  $n$  es el número de elementos en la serie. LabVIEW

almacena el tamaño de cada dimensión de un array como long integer seguido por el dato. Se puede mostrar un array bidimensional con números en coma flotante de precisión simple.

Los arrays booleanos se almacenan de manera diferente a los booleanos escalares. Estos arrays se almacenan como bits empaquetados. El tamaño de la dimensión viene dado en bits en lugar de bytes. El bit 0 se guarda en la posición más alta de memoria (215), y el bit 15 en la posición más baja (20).

### **3.5.15 Strings (rosa).**

LabVIEW almacena strings como si fueran un array uni-dimensional de bytes enteros (8 caracteres de 8 bits).

### **3.5.16 Handles.**

Es un puntero que apunta a un bloque de memoria relocizable. Solo apunta a datos definidos por el usuario. LabVIEW no reconoce que es lo que hay en ese bloque de memoria. Es especialmente útil para pasar un bloque de datos por referencia entre nodos de interface de código.

### **3.5.17 Paths (verde oscuro).**

LabVIEW almacena las componentes tipo y número de un path en palabras enteras, seguidas inmediatamente por las componentes del path

### **3.5.18 Datos clusters.**

Un cluster puede contener elementos de diferentes tipos de datos, cuando se usan los clusters, sus subVIs requieren menos términos de conexión. Un cluster se puede comparar con un bulto de alambres de un cable de teléfono. Cada alambre en el cable representaría un elemento diferente del cluster. Los componentes incluyen el valor del

X inicial (0), el valor de X de delta (1), y la serie para los datos de la forma de onda, con las constantes numéricas en el diagrama de bloque.

Almacena diferentes tipos de datos de acuerdo a las siguientes normas: Los datos escalares se almacenan directamente en el cluster; los arrays, strings, handles, y paths se almacenan indirectamente. El cluster almacena un handle que apunta al área de memoria en la que LabVIEW ha almacenado realmente los datos.

### 3.6 ICONO.

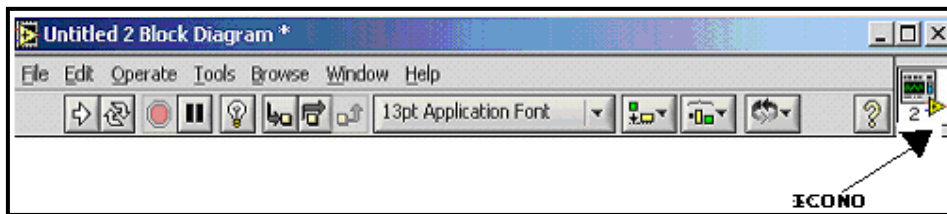


Figura. 3.5 Icono

Cada VI tiene un icono predefinido desplegado en la esquina superior derecha del tablero y ventanas del Diagrama de bloques. Para VIs, el valor por defecto es el LabVIEW VI icono y un número que indica cuántos nuevos VIs se ha abierto subsecuentemente.

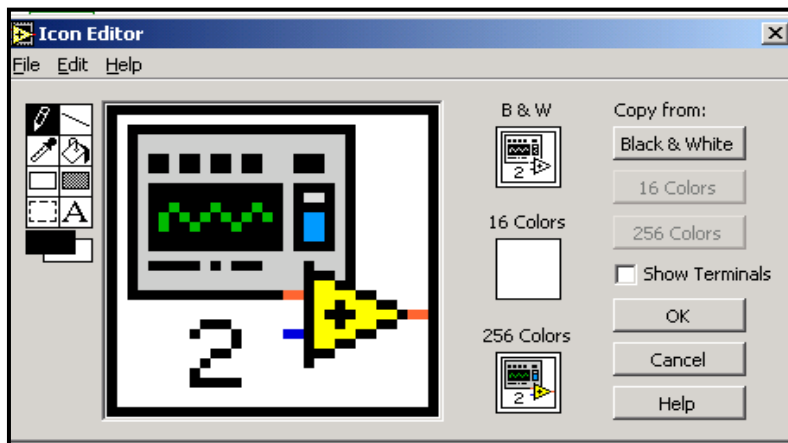


Figura. 3.6 Editar un ícono

Se usa al Editor del Icono para personalizar el icono. Para activar al Editor del Icono, de aparición repentina en el icono predefinido en la esquina superior correcta de la ventana del Tablero. Una imagen del tamaño del icono real aparece en una de los cuadros al derecho del área de la corrección como se observa en la figura 3.5.

Las herramientas a la izquierda del área de la corrección realizan las siguientes funciones:



Pencil tool.-El lápiz y borra pixel por el pixel.



Line tool.- Línea recta. Presione <Shift> y arrastre esta herramienta para dibujar líneas: horizontal, vertical, y diagonal.



Copy tool.- Copia el color prioritario de un elemento en el icono.



Fill bucket.- Es una área perfilada del color prioritario.



Rectangle tool.- El rectángulo una frontera rectangular en el color prioritario. El doble clic en esta herramienta es para idear el icono en el color prioritario.



Filled rectangle Tool. - Rectángulo lleno que un rectángulo apareció con el primer plano el color y lleno con el color de fondo. El doble clic es para idear el icono en el color prioritario y lo llena del color de fondo.



Select tool.- Selecciona una área del icono por mover, clonando, u otros cambios.



Text.- La herramienta del texto en el plano del icono.



Foreground/Background.- Despliega el primer plano actual y los colores de fondo. Se hace clic en cada uno para conseguir una paleta de colores de la que se puede elegir los nuevos colores.



Los botones a la derecha de la pantalla de la corrección realizan las siguientes funciones:

- Undo.- Cancela la última función que se realizó.
- OK.- Muestra su dibujo como el VI icono e ingresos al panel frontal.
- Cancel.-Retorna al panel frontal para ahorrar cualquier cambio.

El editor tiene como valor predefinido el Negro & Blanco, pero se puede pulsar el botón de las otras opciones coloridas para cambiar los modos. La Herramienta de Copia colorida se usa para copiar los colores por pegar con la herramienta Colorida, también se usa para poner primer plano y colores de fondo, esto se indica en la figura 3.6.

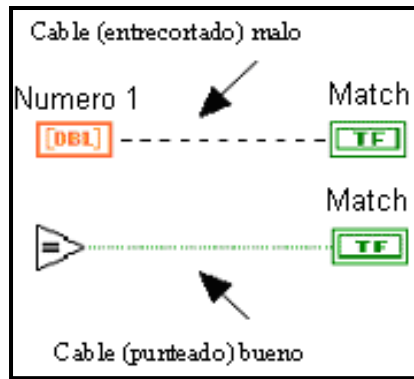
### **3.7 EL CONECTOR.**

Es la interfaz programática a un VI. Si se usa el tablero de controles o indicadores para pasar los datos a y del subVIs, estos controles o indicadores necesitan los terminales en el conector. Se define las conexiones escogiendo el número de términos que se quiere para los VI.

El icono del conector reemplaza el icono en la esquina superior derecha de la ventana del tablero. LabVIEW selecciona un modelo terminal apropiado para sus VI con los terminales para los mandos a la izquierda de la hoja del conector, y terminales para los indicadores a la derecha. El número de terminales seleccionados depende del número de controles e indicadores en su panel frontal.

Cada rectángulo en el conector representa un área terminal, y se puede usar los rectángulos para entrada o rendimiento de los VI, se puede seleccionar un modelo terminal diferente para sus VI.

### **3.9 LOS CABLES**



*Figura. 3.7 Cableado*

Un cable es una trayectoria de datos entre los nodos. Los cables están coloreados según el tipo de datos que cada cable lleva. Los cables azules son enteros, los cables anaranjados son flotantes, los cables verdes son booleanos, y los cables rosas son strings.

Un cable entrecortado representa un cable malo, se puede conseguir un mal cableado por varias razones, como conectar dos instrucciones, o conectando un terminal de la fuente a un terminal del destino cuando los tipos del datos no emparejan (por ejemplo, conectando un numérico a un booleano). Se puede quitar un cable malo haciendo clic en él con la herramienta del Posicionamiento y haciendo clic en < Anule >. Edit»Remove bad wires o <Ctrl-b> anula los cables malos en el diagrama de bloques. Esto es una táctica rápida y útil para intentar si los VIs se niegan a correr o ingresa el signo que tiene el mensaje de error.

No se debe confundir un cable entrecortado, con un alambre punteado, ya que un cable punteado representa un dato booleano, como muestra en la figura 3.7.

### **3.9 PALETA DE HERRAMIENTAS (TOOLS PALETTE)**

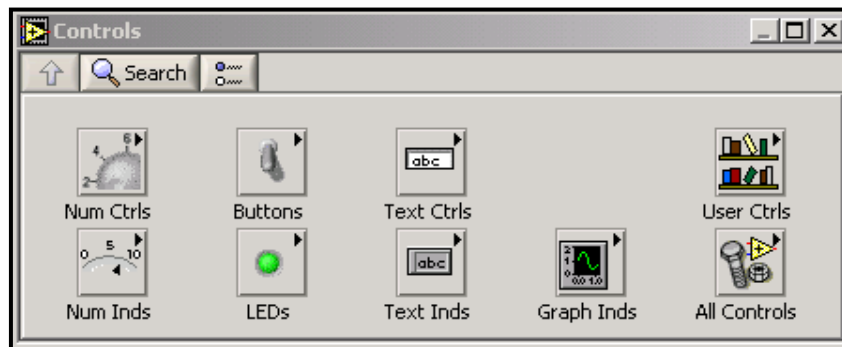


*Figura. 3.8 Paleta herramientas*

La Paleta de herramientas está disponible en el panel frontal y en el diagrama de bloque. Una herramienta es un modo que opera especialmente del cursor del ratón. Cuando se selecciona una herramienta, el icono del cursor cambia al icono de la herramienta. Se usa las herramientas para operar y modificar el panel frontal y objetos del diagrama de bloque.

Si selecciona Window»Show Tools Palette para desplegar la paleta herramientas. Se puede poner la paleta de herramientas en cualquier parte de la pantalla. La paleta de herramientas desplegada se indica en la figura 3.8.

### 3.10 PALETA DE CONTROLES (CONTROLS PALETTE)



*Figura. 3.9 Paleta de controles.*

La paleta de control sólo está disponible en el panel frontal y contiene: controles e indicadores se usa para crear la interfaz del usuario. Se selecciona Window»Show Controls Palette o clic derecho del ratón en el espacio en que trabaja el panel frontal para desplegar la paleta de control. Se puede poner la paleta de controles en cualquier parte en la pantalla. La paleta de controles desplegada se indica en la figura 3.9.

### 3.12 PALETA DE FUNCIONES (FUNCTIONS PALETTE)



Figura. 3.10 Paleta de funciones.

La paleta de funciones que se indica en la figura 3.10 sólo está disponible en el diagrama de bloque, contiene los objetos que se usan para programar el programa y sus VIs, como la aritmética, el instrumento I/O, archivo O/I, y funcionamientos de adquisición de datos. Se selecciona Window»Show Functions Palette o click derecho en el diagrama de bloque para desplegar la paleta de funciones. Se puede poner la paleta de las funciones en cualquier parte en la pantalla.

### 3.12. PROGRAMACIÓN ESTRUCTURADA.

A la hora de programar, muchas veces es necesario ejecutar un mismo conjunto de sentencias un número determinado de veces, o que éstas se repitan mientras se cumplan ciertas condiciones. También puede ocurrir que se desee ejecutar una u otra sentencia dependiendo de las condiciones fijadas o simplemente forzar que unas se ejecuten siempre antes que otras.

Para ello LabVIEW dispone de cinco estructuras fácilmente diferenciables por su apariencia y disponibles en la opción **Structures** del menú **Function** del diagrama de bloques.

### 3.12.1 Lazos For loop.

Se usa para que una operación se repita un número determinado de veces. Su equivalente en lenguaje convencional es:

For i = 0 to N-1

Ejecuta subdiagrama

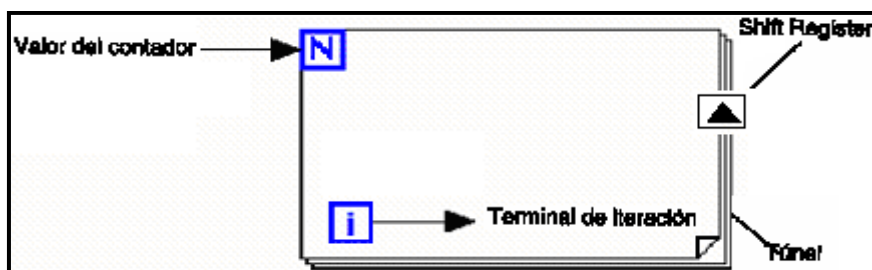


Figura. 3.11 Lazo For

Al colocar un **For Loop** en el Diagrama de bloque se observa que tiene asociados dos terminales:

**N** Terminal contador: Contiene el número de veces que se ejecutará el subdiagrama creado en el interior de la estructura. El valor del contador se fijará externamente.

**i** Terminal de iteración: Indica el número de veces que se ha ejecutado la estructura: Cero durante la primera iteración, uno durante la segunda y así hasta N-1.

Ambos terminales son accesibles desde el interior de la estructura. Es decir, sus valores podrán formar parte del subdiagrama pero en ningún caso se podrán modificar como se observa en al figura 3.11.

### 3.12.2 While loop.

Se utiliza **While Loop** para una operación que se repita mientras una determinada condición sea cierta, se repite como mínimo una vez, independientemente del estado de la condición. Su equivalente en lenguaje convencional es:

- **Do** ejecutar subdiagrama
- **While** condición **is TRUE**

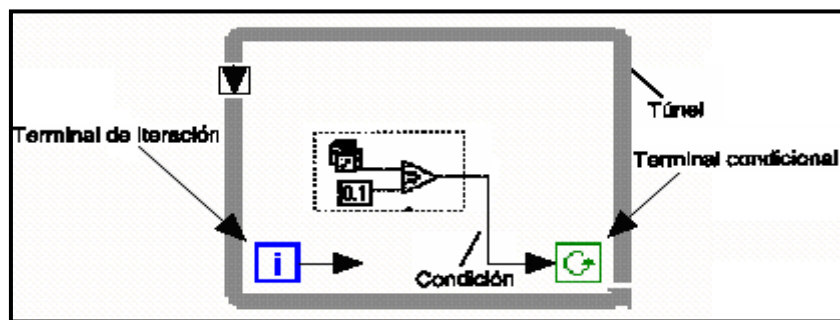




Figura. 3.12 Lazo While

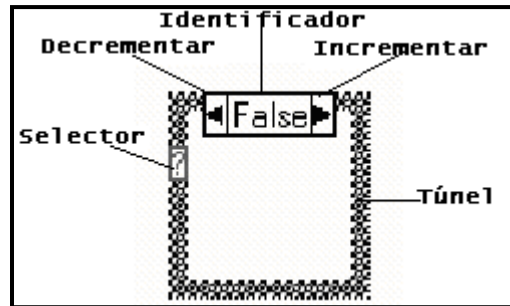
En la figura 3.12 al igual que **For Loop** contiene dos terminales:

 Terminal condicional: A él se conecta la condición que hará que se ejecute el subdiagrama. LabVIEW comprobará el estado de este terminal al final de cada iteración, si su valor es TRUE (verdadero) continuará, pero por el contrario si su valor es FALSE (falso) detendrá la ejecución.

 Terminal de iteración: Indica el número de veces que se ha ejecutado el bucle y que, como mínimo, siempre será una ( $i=0$ ).

### 3.12.3 Estructura Case

Se usa la estructura Case que se observa en la figura 3.13 en aquellas situaciones en las que el número de alternativas disponibles sean dos o más. Según qué valor tome el selector dentro de los “n” valores posibles, se ejecutará en correspondencia uno de los “n” subdiagramas.



*Figura. 3.13 Estructura Case*

Consta de un terminal llamado selector y un conjunto de subdiagramas, cada uno de los cuales está dentro de un case o suceso y etiquetado por un identificador del mismo tipo que el selector; éste será booleano o numérico. Si se conecta un valor booleano al selector, la estructura tendrá dos Case: False y True. Pero si se conecta un valor numérico la estructura podrá tener hasta 214 Case.

No cuenta con los registros de desplazamiento de las estructuras iterativas pero sí se puede crear los túneles para sacar o introducir datos. Si un case o suceso proporciona un dato de salida a una determinada variable será necesario que todos los demás también lo hagan; si no ocurre de esta manera será imposible ejecutar el programa.

#### **3.12.4 Estructura de Sequence.**

Esta estructura no tiene su homóloga en los diferentes lenguajes convencionales, ya que en éstos las sentencias se ejecutan en el orden de aparición pero, en LabVIEW una función se ejecuta cuando tiene disponible todos los datos de entrada. Se produce de esta manera una dependencia de datos que hace que la función que recibe un dato directa o indirectamente de otra que se ejecute siempre después, creándose un flujo de programa.

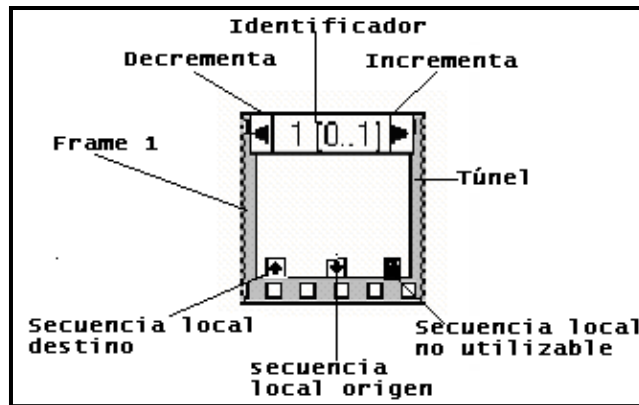


Figura. 3.14 Estructura de Sequence.

Pero existen ocasiones en que esta dependencia de datos no existe y es necesario que un subdiagrama se ejecute antes que otro; es en estos casos cuando se usa la estructura Sequence indicada en la figura 3.14 para forzar un determinado flujo de datos. Cada subdiagrama estará contenido en un frame o marco y estos se ejecutarán en orden de aparición: Primero el *frame 0* o *marco 0*, después el *frame 1* y así, sucesivamente, hasta el último.

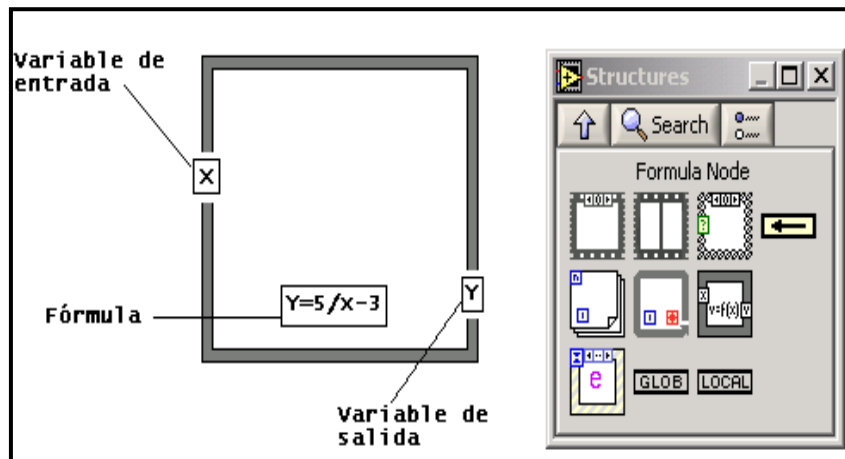
Al contrario del Case, si un frame aporta un dato de salida a una variable los demás no tendrán por qué hacerlo. Pero el dato estará solamente disponible cuando se ejecute el último frame y no cuando se ejecute el frame que transfiere el dato.

### 3.12.5 Formula Node

El nodo de fórmula es una función de características similares a las estructuras vistas anteriormente, disponible en la paleta Structs & Constants del menú Functions como indica la figura 3.15, pero que, en lugar de contener un subdiagrama, contiene una o más fórmulas separadas por un punto y coma. Se usa Formula Node para ejecutar fórmulas matemáticas que serían complicadas de crear utilizando las diferentes herramientas matemáticas que LabVIEW incorpora en sus librerías.

Una vez escrita la fórmula en el interior del rectángulo sólo se añade los terminales que harán la función de variables de entrada o de salida; para ello se desplegará el menú pop-up de la estructura y ejecutará el comando Add Input (añadir entrada) o Add Output (añadir salida).





*Figura 3.15 Formula Node*

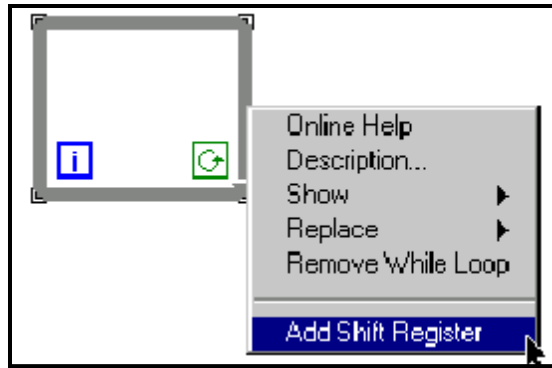
No hay límite para el número de variables o de fórmulas y nunca podrá haber dos entradas o dos salidas con el mismo nombre, aunque una salida sí podrá tener el mismo nombre que una entrada. Todas las variables de salida deberán estar asignadas a una fórmula por lo menos una vez.

### 3.13. VARIABLES LOCALES Y GLOBALES

Las variables locales almacenan los datos en algunos controles o indicadores existentes en el panel frontal del VI creado estas variables no sirven para cambiar datos entre VI's. En cambio las variables globales disponen solo en en panel frontal en el cual se define el tipo de dato de la variable y el nombre de identificación una de estas variables es el registro de desplazamiento.

#### 3.13.1 Registro de desplazamiento (Shift Registers)

Los registros de cambio (disponible para lazos While y For) el traslado de los valores de una iteración de la próxima vuelta. Se puede crear un registro de cambio haciendo click arriba a la izquierda o frontera correcta del lazo y seleccionando Add Shift Register.



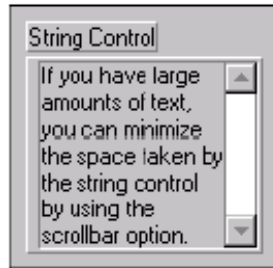
*Figura. 3.16 Registros*

El Shift Register contiene un par de términos directamente en situación opuesta en los lados verticales en el borde del lazo. En el terminal derecho si son correctos los datos se da la realización de una iteración. Esos datos cambian al final de la iteración y aparece al principio en el término izquierdo de la próxima iteración, así desplegado en lo siguiente ilustración. Un registro de cambio puede sostener cualquier tipo de datos numéricos, booleanos, y así sucesivamente. El shift register automáticamente adapta al tipo de datos del primer objeto que se conecte al shift register como se indica en la figura 3.16.

### **3.14 INDICADORES Y CONTROLADORES STRINGS.**

Un string es una colección de caracteres de ASCII. En el mando del instrumento, se puede pasar los datos numéricos como las cadenas de caracteres y entonces puede convertir estos strings a números. Los datos numéricos guardados al disco también pueden involucrar los strings.

El mando del string e indicador, está mostrado a la izquierda, en el menú Controls"String que indica la figura 3.17. Se puede entrar o cambiar el texto dentro de un mando del string que usa la herramienta que opera o la herramienta del etiquetado. Se agranda los mandos del cordón e indicadores arrastrando a una esquina con la herramienta de posicionamiento.



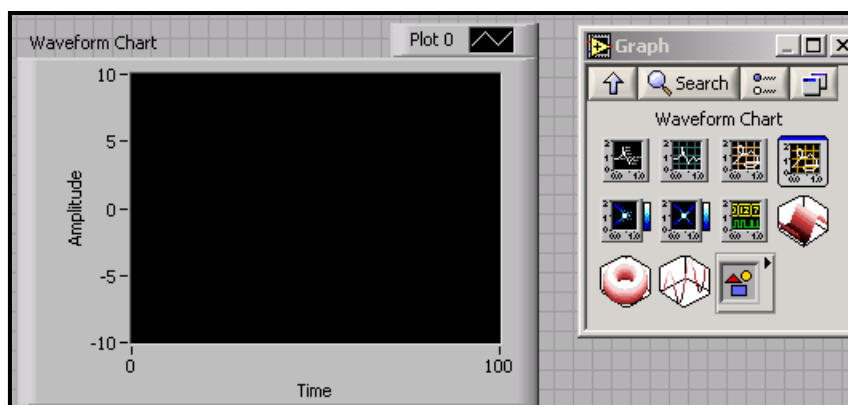
*Figura. 3.17 Controladores Strings*

### 3.15. INDICADORES CHART.

Un indicador chart de trazos muestra gráficas, recibe los datos y los muestra punto por punto o array por array, reteniendo un cierto número de puntos en pantalla mediante un buffer disponible para ello.

#### 3.15.1 Waveform Chart.

Como se indica en la gráfica 3.18, es un indicador gráfico numérico que se actualiza con los nuevos datos periódicamente. Se puede encontrar dos tipos de charts en la paleta Controls»Graph: en el waveform chart y en el intensity chart se puede personalizar los charts para emparejar sus datos despliegan los requisitos o para desplegar más información. El número de puntos que waveform chart almacenará en el buffer, por defecto, serán 1024.



*Figura 3.18 Waverform Chart*

Los rasgos disponibles para los charts incluyen: un scrollbar, una leyenda, una paleta, en la pantalla digital, y representación de variables con respecto a tiempo.

Los datos se pueden pasar uno a uno al chart o mediante arrays, es muy conveniente pasar múltiples puntos a la vez ya que de esta manera sólo es necesario redibujar la gráfica una vez y no una por cada punto

Es posible dibujar varias gráficas en un mismo chart, uniendo los datos de cada gráfica en un cluster de escalares numéricos de forma que cada escalar que contiene el cluster se considera como un punto de cada una de las gráficas para una misma abscisa. Se puede ahorrar tiempo uniendo los clusters en arrays y después pasando todo el array a la gráfica.

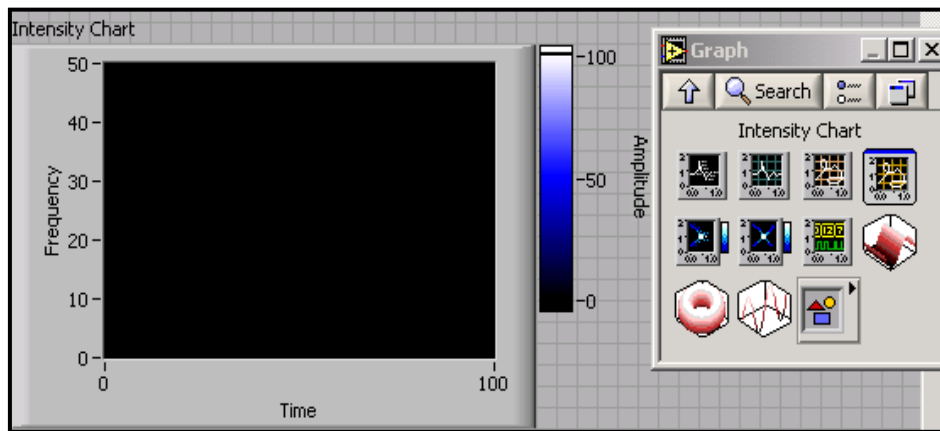
Los modos de visualizar un chart son tres: strip chart, scope chart y sweep chart.

- El modo strip chart es el modo por defecto y consiste en que cada nuevo valor se coloca a la derecha del display, mientras que valores anteriores se desplazan hacia la izquierda. En el modo scope chart cada nuevo valor se coloca a la derecha del anterior, empezando por el margen izquierdo del display. Cuando se llega al margen derecho se borra todo el display y se comienza de nuevo desde la izquierda.
- El modo scope chart es mucho más rápido que el modo strip chart ya que no es necesario realizar todo el proceso de desplazar la pantalla hacia la izquierda para cada nuevo punto.
- El modo sweep chart actúa como el modo scope chart, salvo que ahora cuando se llega al final de la pantalla, ésta no se borra y se comienza de nuevo desde el principio, donde una línea vertical se mueve hacia la derecha cada vez que se añade un nuevo punto.

### **3.15.3 Intensity chart.**

Mediante *intensity chart* se muestra datos tridimensionales colocando bloques de colores sobre planos cartesianos como se indica en la figura 3.12. Para ello se crea arrays bidimensionales de números donde los índices de un elemento corresponderán a las coordenadas X e Y, y el contenido a la coordenada Z, que tendrá asociado un color para cada posible valor. Previamente será necesario definir la escala de colores que se

utilizará a través de los *atribuye nodes* mediante el ítem *Z Scale Info: Color Array o Color Table*, o a través de la rampa de colores visualizada junto a la gráfica.



*Figura 3.19 Intensity Chart*

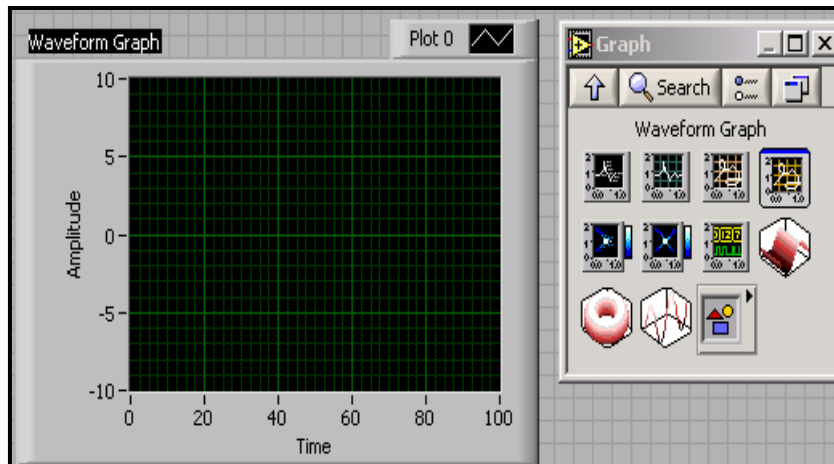
Cada vez que se envíe un nuevo conjunto de datos, estos aparecerán representados a la derecha de los ya existentes. *Intensity chart* de la figura 3.19 soporta los tres modos de visualización de *waveform chart* y también dispone de un buffer cuyo tamaño es, por defecto, de 128 puntos. Las opciones disponibles para *intensity chart* son prácticamente las mismas que para *waveform chart*.

### 3.16 INDICADORES GRAPH.

Un indicador *graph* o indicador gráfico es una representación bidimensional de una o más gráficas. El *graph* recibe los datos como un bloque.

#### 3.16.1 Waveform graph.

*Waveform graph* representada en la figura 3.20 puede dar una serie de valores  $Y$  equiespaciados dada siempre una distancia delta de  $X$  ( $\Delta X$ ) comenzando a partir de un valor inicial  $X_0$ . A un mismo punto  $X$ , sólo le puede corresponder un valor de  $Y$ . Cuando se representa una nueva serie de datos, al contrario de lo que ocurría en los indicadores *chart*, estos datos reemplazan a los ya existentes en lugar de añadirse al lado, y pierden los valores representados con anterioridad.



*Figura 3.20 Waverform Graph*

Existen dos posibilidades a la hora de representar una única gráfica en una *waveform graph*.

- La primera consiste en unir un array de valores numéricos directamente a la *graph* de forma que ésta interpreta cada valor como un nuevo punto comenzando en  $X=0$  e incrementando  $X$  en 1 para cada punto.
- La segunda consiste en crear un cluster en, el cual, junto con el array de valores, se indica el valor inicial  $X_0$  y el incremento  $\Delta X$ .

Existe la posibilidad de representar más de una gráfica en una misma *waveform graph*. Para ello es necesario unir los datos de las diferentes gráficas en un formato que LabVIEW sepa interpretar. Utilizar un formato u otro vendrá determinado principalmente por las características de las gráficas a mostrar. Así, si todas las gráficas tienen un mismo escalado  $X$  y un mismo número de puntos, bastará con crear un array bidimensional de valores numéricos donde cada fila de datos es una única gráfica. LabVIEW interpretará estos datos como puntos en la gráfica comenzando en  $X=0$  e incrementándola en 1. Si se desea cambiar el punto inicial o el incremento de  $x$ , se crea un cluster que contendrá el array bidimensional y los valores de  $x_0$  y  $\Delta x$ .

Mediante el comando *Transpose Array* del menú pop-up LabVIEW interpreta las columnas como gráficas diferentes en lugar de las filas.

Puede ocurrir que el número de elementos de cada gráfica sea diferente. En ese caso es necesario crear un cluster para cada array de datos y después unir todos los clusters en un array. Esto es necesario debido a que LabVIEW no permite crear arrays de arrays. Para que el punto inicial sea diferente de cero o que el incremento sea diferente de 1, se crea un cluster que contenga el array de clusters de array y los nuevos valores de  $X_0$  y  $\Delta X$ .

### 3.16.2 XY Graph

En la figura 3.21 *XY Graph* un punto X, puede tener varios valores Y, lo que permite, por ejemplo, dibujar funciones circulares. *XY Graph* representa una coordenada (X, Y) donde los valores de X no tienen que estar equiespaciados como ocurriría en *las waveform graph*.

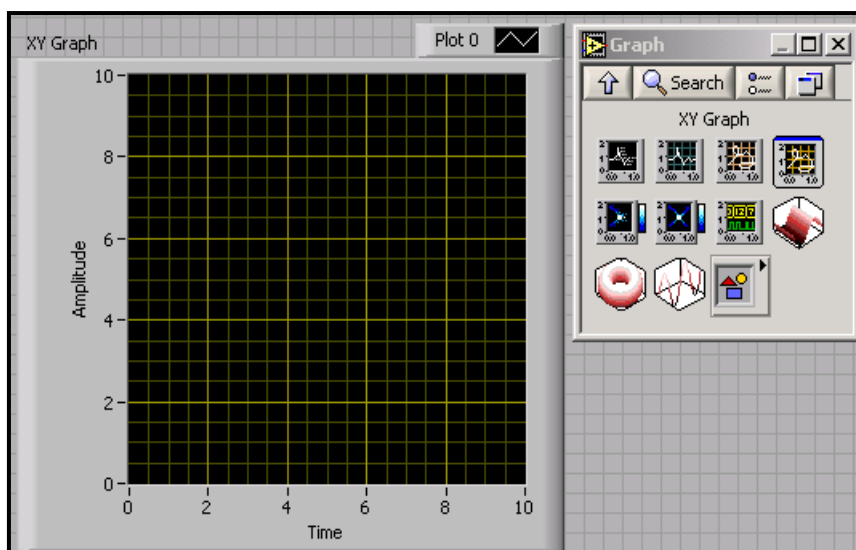


Figura. 3.21 *XY Graph*

Para representar una única gráfica en una *XY Graph* existen dos posibilidades. La primera consiste en crear un cluster que contenga un array de datos X y un array de datos Y. La segunda consiste en crear un array de clusters, donde cada cluster contiene un valor de X y un valor de Y.

Al igual que en *las waveform graph* existe la posibilidad de representar más de una gráfica en una misma *XY Graph* (figura 5.8). Pero, en este caso, tan sólo existen dos formatos posibles derivados de los dos formatos vistos anteriormente para una única

gráfica. El primer formato es un array de gráficas, donde cada gráfica es un cluster de un array X y un array Y. Y el segundo formato es un array de clusters de gráficas, donde cada gráfica es, a su vez, otro array de clusters conteniendo un valor X y un valor Y.

### 3.16.3 Intensity Graph.

*Intensity graph* es exactamente igual que *intensity chart* salvo que *intensity graph* no retiene valores anteriores, por lo que cuando un nuevo bloque de valores se carga, éstos sustituyen a los ya existentes como se observa en la figura 3.22.

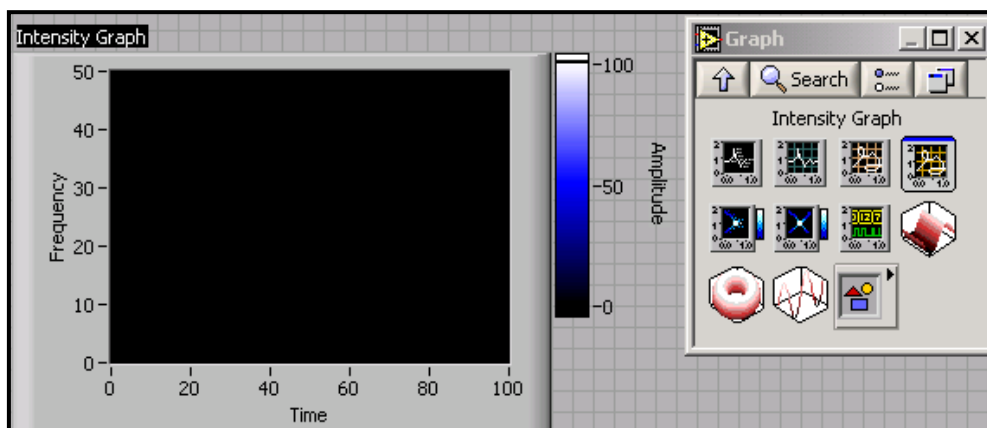


Figura. 3.22 Intensity Graph.

Los comandos disponibles en los menús pop-up de los indicadores *graph* tienen las mismas utilidades que los descritos en los indicadores *chart*. Solamente existe una diferencia y es que los indicadores *graph* disponen de cursores que permiten el movimiento por la gráfica. La paleta de cursores está disponible desde la opción *Show Cursor Display* del menú pop-up.

## 3.17 I/O INPUT/OUTPUT

Transfiere datos a un sistema involucrando la computación las comunicaciones encauzan, dispositivos de entrada del operador, y/o adquisición de datos e interfaces del mando.

### 3.17.1 LabVIEW VISA



VISA es una Aplicación de I/O normal que Programa la Interfaz (el API) para la programación de la instrumentación. VISA no proporciona la capacidad de programación en instrumentación. VISA es un API de alto nivel que llama en los niveles más bajos de driver. VISA puede controlar VXI, GPIB, o los instrumentos de serie, si se construye un driver apropiado se lo llama dependiendo del tipo de instrumento que se usa. Cuando se pone a punto los problemas de VISA es importante tener presente que existe una jerarquía, ya que puede parecer ser un problema de VISA cuando en realidad es un problema con uno de los drivers que VISA está llamando.

### **3.18 LabVIEW INSTRUMENTO DRIVER**

Un instrumento driver es un juego de VIs de LabVIEW que comunica con un instrumento que usa las funciones de I/O de VISA de LabVIEW. Cada VI corresponde a un funcionamiento programático, como configurar, leyendo, escribiendo, y activando un instrumento. El instrumento driver de LabVIEW elimina la necesidad de aprender las complejas ordenes de la programación de bajo nivel para cada instrumento.

La biblioteca de LabVIEW contiene a instrumentos drivers para una variedad de instrumentos programables que usan el GPIB, VXI o interfaz de serie. Los instrumentos drivers son distribuidos con su código fuente del diagrama de bloques, para personalizarlos para su aplicación específica si se lo desea.

#### **3.18.1 FUNCIONES GPIB EN LabVIEW**

El GPIB se ha aplicado a otras aplicaciones como la comunicación del intercomputador y mando del periférico debido a su 1 Mbytes/s de máxima transferencia de datos, ha evolucionado subsecuentemente en ANSI/IEEE Norma 488.2-1987. Por la versatilidad del sistema se conoce con el nombre de Interfaz Autobús de propósito general. El GPIB funciona para LabVIEW siguiendo las especificaciones del IEEE 488.2.

#### **3.18.2 EL PUERTO EN SERIE PARA VIs**

La comunicación en serie es un medio popular de transmisión de datos entre una computadora y una unidad periférica como un instrumento programable o incluso otro

de computación. La comunicación en serie usa un transmisor para enviar los datos. Se puede usar este método cuando los datos que se transfieren son bajos o se debe transferir los datos a las distancias largas.

La comunicación en serie es popular porque la mayoría de las computadoras tienen un o dos puertos en serie. Muchos instrumentos de GPIB también están disponibles con la limitación de puertos.

### **3.20 ANALISIS Y ADQUISICIÓN DE DATOS EN LABVIEW.**

LabVIEW es un programa adecuado para la adquisición y análisis de datos, por su total compatibilidad con las tarjetas de National Instruments, sus gráficos ofrecen una gran potencia de la visualización de las señales adquiridas. Para que todo esto sea posible, LabVIEW ofrece una librería de adquisición de datos que proporciona al usuario una herramienta de trabajo de fácil uso y que permite disponer de una mayor flexibilidad en cuanto al manejo de las TAD se refiere.

#### **3.19.1 Librerías de adquisición de datos.**

Contiene un conjunto de VIs muy completo que permite al programador un fácil manejo de las TAD. Son muchos los VIs que ofrece esta librería, comenzando por los muy sencillos hasta una programación para expertos donde incluso se debe conocer el hardware de la tarjeta.

#### **3.19.2 Análisis en labVIEW.**

Los signos digitales están por todas partes en el mundo alrededor de nosotros. Las compañías usan los signos digitales para representar la voz humana. La radio, TELEVISIÓN, y los sistemas del sonido de alta fidelidad son todos convertidos gradualmente al dominio digital debido a su fidelidad superior, reducción del ruido, y la flexibilidad del proceso señalado. Los datos se transmiten de los satélites a las estaciones terrestres en forma digital, también se convierten los signos analógicos a la forma digital antes estos se procesen con una computadora. LabVIEW Análisis Biblioteca que consiste en centenares de VIs para el proceso señalado y análisis.

El Análisis del Datos es importante ya que los procesadores señalados numéricos y digitales se han puesto en aumento importante al tiempo real y al análisis de sistemas.

### **3.19.3 Generación de señal**

En la biblioteca de generación de análisis se puede generar tipos de señales de diferentes de signos. Algunas de las aplicaciones para la generación señalada son:

- Simulando los signos para probar su algoritmo cuando los signos del mundo real no están disponibles (por ejemplo, cuando no se tiene una tabla de DAQ por obtener los signos del mundo real, o cuando el acceso a los signos del real-mundo no es posible).
- Los signos Generadores para aplicar a un conversor de D/A.

### **3.19.4 Frecuencia normalizada.**

En el mundo analógico, una frecuencia señalada es moderada en Hz o ciclos por segundo. Pero el sistema digital usa a menudo una frecuencia digital que es la proporción entre la frecuencia analógica y la frecuencia de muestreo: la frecuencia digital = la frecuencia analógica / la frecuencia de muestreo

### **3.21.5 Transformada rápida de fourier (fft).**

Las muestras de un signo obtenidas de una tabla de DAQ constituyen el *cronómetro de representación del dominio del signo*.

La representación de un signo por lo que se refiere a su frecuencia individual los componentes están conocidos como la representación de dominio de frecuencia del el signo. La representación de dominio de frecuencia podría dar más visión sobre el signo y el sistema del que fue generado.

El algoritmo transforma muestras de los datos del dominio de tiempo en el dominio de frecuencia. Establece la relación entre las muestras de un signo en el dominio de tiempo y su representación en el dominio de frecuencia.

### **3.19.6 Medida VIs.**

Varias medidas VIs se realizan en el dominio de tiempo normalmente se usa a las transformaciones del dominio de la frecuencia como la amplitud y espectro de la fase, el espectro de poder señalado, la función de traslado de red, y así sucesivamente. Se puede usar la medida de VIs para lo siguiente aplicaciones:

- La amplitud y el espectro de la fase
- El espectro de Power.
- Una ventana en el dominio del tiempo.
- Power y estimación de frecuencia
- El análisis armónico y total la distorsión armónica (THD) los dimensiones

Los FFT, y espectro de poder son útiles para medir la frecuencia de signos estacionarios o transeúntes. El FFT proporciona la media frecuencia del signo durante el tiempo entero que el signo era adquirido. Por esta razón, usted usa el FFT principalmente para el análisis señalado estacionario (cuando el signo no está cambiando significativamente en la frecuencia durante el tiempo que el signo es adquirido), o cuando se requiere sólo la media energía a cada línea de frecuencia.

Para medir información de frecuencia que cambia durante la adquisición, se debe usar el análisis de tiempo-frecuencia colectivo VIs, como el Espectrograma de Gabor.

Se puede conectar la medida del VIs directamente al rendimiento de adquisición de datos. La figura 3.23 indica en el diagrama de bloques muestras del analizador de espectros.

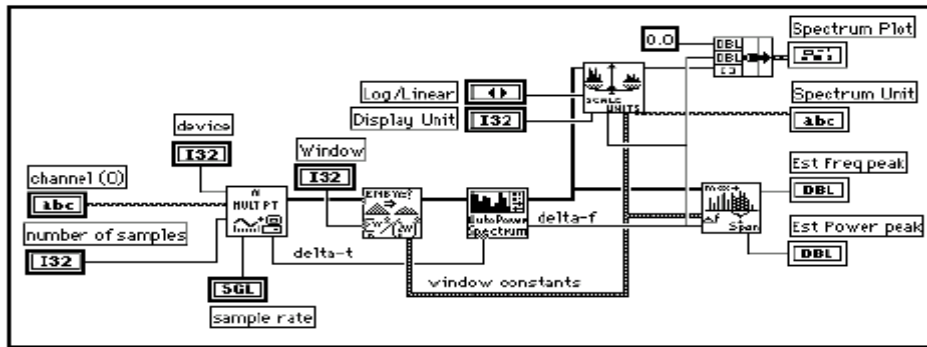


Figura. 3.23 Muestras de analizador de espectros de señales

### 3.22 COMUNICACIÓN EN LABVIEW

La comunicación entre los procesos múltiples, posiblemente en las computadoras separadas normalmente ocurre en una red de hardware, como ethernet o LocalTalk.

Para conectar una red de computadoras en las aplicaciones del software es necesario usar los servicios de otra aplicación. Por ejemplo, la aplicación que proporciona los servicios (el servidor) o podría ser una aplicación de la recolección de datos que corre en una computadora especializada o un programa del banco de datos que proporciona la información a otras aplicaciones.

### 3.23 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Para la comunicación entre los procesos, se debe usar un idioma de comunicaciones común, llamado protocolo. Un protocolo de comunicación le permite especificar los datos que usted quiere enviar o recibir y la situación del destino o fuente, sin tener que preocupar sobre cómo los datos llegan allí. El protocolo traduce sus órdenes en datos que conectan una red de computadoras a drivers.

Un protocolo no es compatible con otro. Así, en las aplicaciones de comunicación, una de las primeras cosas que se debe hacer es decidir qué protocolo usar.

Se construyen varios protocolos en LabVIEW algunos de los cuales es específico a un tipo de computadora. LabVIEW usa los siguientes protocolos al comunicarse entre las computadoras:

- TCP.-En todas las computadoras
- UDP.-En todas las computadoras
- DDE.-En el PC, para la comunicación entre las aplicaciones de Windows,
- ActiveX.-Para el uso con Windows 95 y Windows NT
- AppleEvents-En Macintosh, para enviar los mensajes entre las aplicaciones de Macintosh,
- PPC.-En Macintosh, para enviar recibir datos entre las aplicaciones de Macintosh

Cada protocolo es diferente, son entre sí incompatibles, para comunicar entre un Macintosh y un PC, se debe usar un protocolo compatible con ambos, como TCP.

### **3.21.1 PPC**

La comunicación de Programa-a-programa (PPC) es un protocolo de Macintosh para transferir bloques de datos entre las aplicaciones. Se puede usar para crear VIs que actúa como clientes o servidores. Normalmente no se usa para más aplicaciones de Macintosh.

Aunque PPC normalmente no es apoyado, proporciona algunas ventajas. Porque está en un más bajo nivel, también, en LabVIEW se puede crear VIs que usa PPC para actuar como servidores, no puede crear diagramas que actúan como los servidores de AppleEvent.

LabVIEW puede usar PPC para enviar y recibir grandes cantidades de información entre las aplicaciones en la misma computadora o las computadoras diferentes en una red. Para dos aplicaciones para comunicar con PPC, deben estar corriendo y deben preparar enviar o recibir la información.

Se puede usar ambos protocolos con las conexiones abiertas múltiples. Al decidir entre TCP y PPC, considere las plataformas que planea ejecutar su VIs adelante y las plataformas con que comunicará.

### **3.21.2 DDE**

El intercambio de Datos dinámico (DDE) es un protocolo para intercambiar los datos entre las aplicaciones de Windows. En las comunicaciones de TCP/IP, DDE trabaja a un nivel superior donde las aplicaciones envían los mensajes a intercambiar la información. La función de la llamada de donante acepta cualquier mensaje de DDE que Windows envía a la aplicación. Un cliente de DDE comienza una conversación con otra aplicación (un servidor de DDE) enviando un conector al mensaje. Después de establecer una conexión, el cliente puede enviar las órdenes al servidor o puede pedir el valor de datos que el servidor maneja.

Con LabVIEW se pueden crear VIs que actúan como los clientes a otras aplicaciones (ellos piden o envían los datos a otras aplicaciones). También se puede crear VIs que actúan como servidores que mantienen la información nombrada al acceso por otras aplicaciones. Como un servidor, LabVIEW no usa la comunicación conexión. En cambio, proporciona la información nombrada a otras aplicaciones que pueden leer o pueden poner los valores de esa información.

## CAPITULO IV

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Para el presente trabajo se ha considerado un motor de inducción jaula de ardilla existente en los laboratorios de la ESPE- Latacunga con las características técnicas que se indican en la tabla 4.1:

*Tabla 4.1 Características técnicas del Motor de Inducción Jaula de Ardilla.*

<b>PARÁMETROS</b>	<b>DATOS TÉCNICOS</b>
TIPO	RGZ
Frecuencia	60 Hz
Voltaje de alimentación	208 V.
Voltaje en cada fase	120
Corriente Nominal	1.5 A
Eficiencia Nominal	81.5%
Aislamiento	Clase F



Temperatura Ambiente	40°C
Incremento de temperatura	90°C
CLASE (NEMA)	<i>B</i>
Velocidad Nominal	1670 rpm.
Potencia Nominal	¼ Hp.

Se realizará el análisis espectral de corriente del motor de inducción jaula de ardilla mediante la adquisición de señales de corriente de cada fase obtenidas por medio del equipo de adquisición de datos especificado en la tabla 4.2.

*Tabla 4.2 Hardware utilizado en la adquisición de datos*

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>TIPO</b>
Tarjeta de Adquisición de datos	NI PCI-6014
Portador SCC	SC-2345
Módulo SCC	A-10
Módulo SCC	CI20
Cable de interfase	SH68-68EP
Fuente	120VAC
Conectores banana	STÁNDAR
Sensor de efecto hall	4A/2V

Se visualizará y analizará las señales del análisis espectral de corrientes obtenidas en la tarjeta NI-PCI 6014 mediante el programa gráfico LabVIEW.

#### **4.1 IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE.**

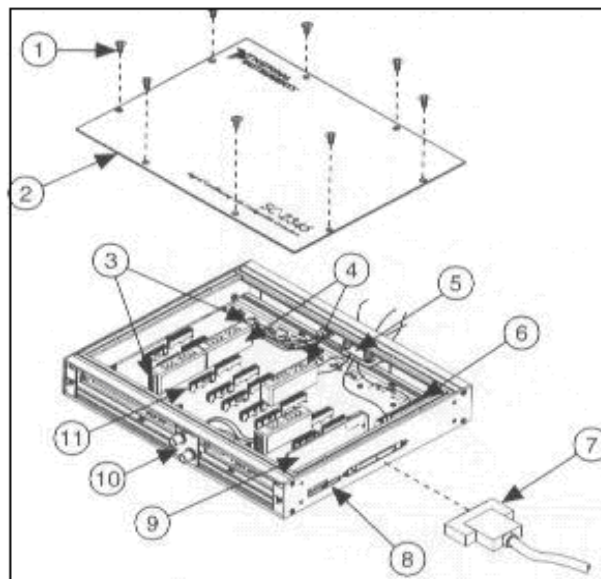
En esta etapa se integran el equipo de adquisición y acondicionamiento de señal para los datos que llegarán a la tarjeta NI PCI 6014, mediante la implementación del portador SC-2345 sus partes se observan en la figura 4.2, en el cual se conectará el módulo SCC-A10 para obtener la señal de voltaje; El módulo SCC-CI20 para tomar la corriente de entrada del motor de inducción jaula de ardilla que se analizará.

#### 4.1.1 Portador SCC- SC 2345

Los portadores de SCC están disponibles con conectores que usan el panel. Los conectores utilizados para esta aplicación son los del portador SC- 2345 que se indica en la figura 4.1, y sus partes se pueden observar en la figura 4.2.



*Figura. 4.1 Portador SC-2345*



*Figura. 4.2 Partes del portador SC-2345*

- 1.- Tornillos
- 2.- Tapa cobertora
- 3.- Terminales de los módulos
- 4.- Módulos SCC
- 5.- Panel de alivio de tensión

- 6.- Bloque Terminal de tornillos
- 7.- Cable de 68 pines
- 8.- Leds indicadores de energía
- 9.- Fuente SCC
- 10.- Panel de conector BNC
- 11.- Bloques de Socket conectores de módulos SCC

#### 4.1.2 Módulo SCC -A10

El SCC-A10 se observa en la figura 4.3 y es un módulo de dos canales que acepta el voltaje de la entrada a 100 V. Cada canal del SCC-A10 incluye un divisor 10:1 circuito de atenuación y amplificador de instrumentación diferencial con los rendimientos de impedancia baja. El circuito de atenuación que se indica en la figura 4.4 incluye la impedancia alta, para que poder conectar tierra flotante o tierra-referenciada. El SCC-A10 también proporciona protección contra sobrevoltaje a 250 Vrms. para su sistema de DAQ.



*Figura. 4.3 Módulo SCC- A10*

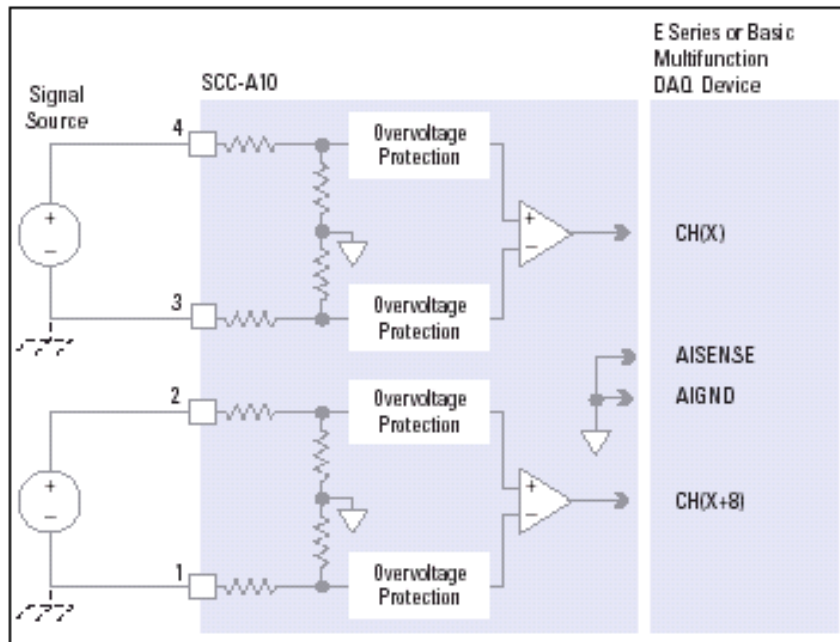


Figura. 4.4 Diagrama de bloques del módulo SCC-A10

### 4.1.3 Módulo SCC - CI20

El SCC-CI20 es un módulo que se indica en la figura 4.5, tiene dos canales que acepta corrientes de entrada de 0 a 20 mA. ó 4 a 20 mA. En la figura 4.6 se indica que cada canal incluye una instrumentación diferencial del amplificador con los rendimientos de impedancia baja por el dispositivo de DAQ con funciones múltiples.



Figura. 4.5 Módulo SCC-CI20

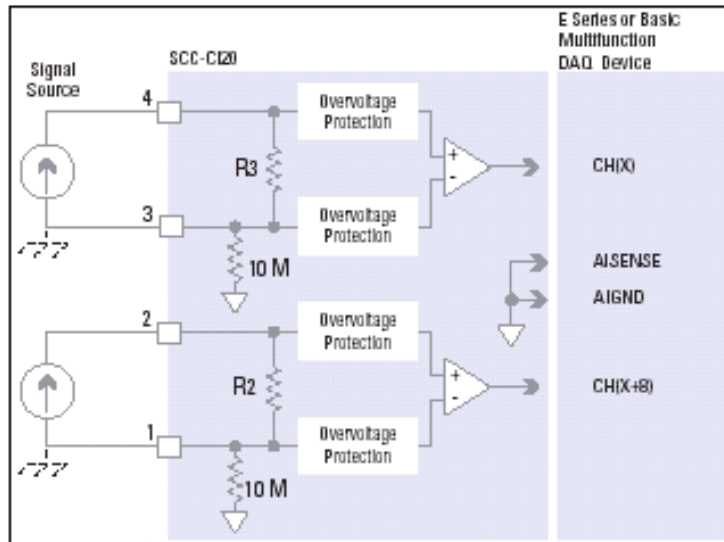


Figura. 4.6 Diagrama de bloques del módulo SCC-CI2

#### 4.1.4 Conexión de módulos SCC de entrada analógica

Se colocan los conectores de la entrada analógica en los pares alineados para los conectores J(X+1) y J(X+9), para el X 0 a 7. En el portador SC-2345, las rutas de las señales de entrada analógicas a las Series E del dispositivo de DAQ encausa a AI (el X) y AI (X+8), ejemplo, en el módulo SCC-A10 atenuador de voltaje se conectó en el conector J2, por tanto la señal en el canal se observa en A9.

Para acondicionar la entrada analógica sencilla, se coloca el módulo de SCC A-10 y el módulo SCC C-I20 en cualquier conector del J1 a J8, y se conecta las señales de I/O a él. En una entrada analógica sencilla la configuración de SCC, se conecta la señal externa a un módulo de SCC que acondiciona la señal

Se configura el SC-2345 de la siguiente manera:

Los Dispositivos abiertos e interfaces. Si su dispositivo no aparece automáticamente, presiona <F5> para actualizar

Se selecciona el SC-2345 en la opción crear nueva ventana.

Se selecciona al portador bajo NI-DAQmx el bloque del conector SCC

#### 4.1.5 Sensor de efecto Hall.

El sensor de efecto Hall utilizado para esta aplicación tiene dos rangos de entrada que son de 0-20 A y 0-200 A para cualquiera de estos la salida de voltaje es de 0-2v. Dicho sensor existe en los laboratorios de la ESPE, y se lo puede observar en la figura 4.7.



*Figura. 4.7 Sensor de Efecto Hall.*

#### **4.2 ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS BAJO LabVIEW.**

Para la adquisición de datos el motor es puesto a trabajar con y sin carga dentro de los rangos considerados normales y el sensor de Efecto Hall envía la información a la tarjeta de adquisición de datos después de pasar por el acondicionador de datos SCC.

Para esta aplicación se utiliza las señales de entrada analógica en la tarjeta de adquisición de datos NI PCI 6014, la misma que posee 16 canales de entrada analógica de 16 bits (ocho canales en forma diferencial), dos canales de salidas análogas de 16 bits, un conector de 68 pines y ocho líneas de entrada/salida digitales. Además un sistema de adquisición de datos de National Instruments, con control temporizado para funciones relacionadas con el tiempo (DAQ-STC). El DAQ-STC se compone de tres grupos temporizados para controlar entradas analógicas, salidas analógicas, y funciones de conteo y temporización de propósito general.

La tarjeta recibe las señales de corriente, tomadas por una pinza de efecto Hall. Estas señales son aisladas, amplificadas y filtradas en forma conveniente por el sistema SCC antes de ser recibidas por la tarjeta.

Durante la fase de almacenamiento, los datos del espectro de corrientes son almacenados por LabVIEW en formato binario como archivos tipo datalog, con una precisión de 32 bits.

La rutina de adquisición de datos en LabVIEW toma la señal de corriente de suministro de una de las fases del estator y obtiene su espectro en el dominio de la frecuencia mediante el algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT). Todas estas funciones de análisis matemático vienen incluidas en el paquete lo cual reduce el tiempo de programación.

### 4.3 IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE

El sistema desarrollado combina en forma óptima una buena resolución de la frecuencia y sensibilidad a la señal. La primera característica es necesaria para distinguir las componentes del espectro con precisión y la segunda para identificar las fallas en formación.

En LabVIEW mediante la transformada rápida de Fourier una subrutina se encarga de localizar los picos correspondientes a las frecuencias críticas dentro del espectro de corrientes registrado durante la prueba. Luego se determina la diferencia entre la amplitud de los picos asociados a frecuencias críticas y la amplitud asociada a la componente fundamental (frecuencia de la red). Finalmente el programa verifica si la severidad de los picos de las frecuencias críticas del espectro está dentro de los rangos permisibles para un motor sano o si por el contrario caen dentro de valores excesivos.

#### 4.3.1 Descripción del ícono del análisis espectral en LabVIEW.

Es necesario estudiar este ícono de LabVIEW considerando que es la base matemática en la que se basa en programa para analizar las señales tomadas del motor.

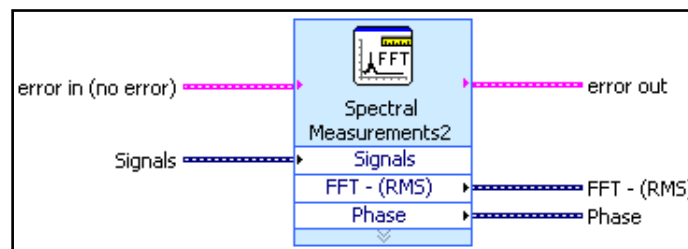


Figura. 4.8 Ícono del Análisis Espectral mediante la FFT.

El ícono que se observa en la figura 4.8 .Realiza análisis espectrales, como el espectro máximo y espectro de poder, y se configura bajo los siguientes parámetros:

Las Dimensiones seleccionadas:

- La magnitud (pico)
- Fase de vista: En radianes
- Windowing: Hanning
- Averaging:none

Los Dimensiones espectrales.- realizan dimensiones, como el espectro máximo y espectro de poder, en un signo.

- Dimensiones Espectrales Básicos VI
- Dimensiones del Espectro VI
- Filtro VI.

Las Opciones del panel frontal son las siguientes:

La medida espectral con las siguientes opciones:

- La magnitud de las medidas el espectro y despliegues los resultados por lo que se refiere a la amplitud máxima.
- La magnitud (RMS) las medidas el espectro y despliegues los resultados por lo que se refiere a RMS.
- El espectro de Poder mide el espectro y despliega los resultados por lo que se refiere al poder.
- La densidad espectral de Poder mide el espectro y despliegues los resultados por lo que se refiere a la densidad espectral de poder (PSD).

El resultado con las siguientes opciones:

- Los ingresos lineales son los resultados de las unidades originales.
- Decibeles devuelve los resultados a los decibelios.
- Ventana especifica la ventana para aplicar a la señal.
- Para el dominio del tiempo hay una ventana desplegada para la información sobre los coeficientes y parámetros para cada tipo de ventana.
- Promediando especifica si el VI Expreso realiza promedio.



El modo con las siguientes opciones:

- El vector computa el promedio de cantidades complejas directamente.
- RMS promedia la energía.
- El sostenimiento máximo realiza un promedio separadamente a cada línea de frecuencia, mientras retiene los niveles máximos de un FFT

Pesando con las siguientes opciones:

- Lineal especifica el promedio lineal del número de paquetes que se especifica en el Número de Promedios.
- Exponencial especifica el promedio exponencial del número de paquetes que se especifica en el Número de Promedios de una manera pesada.
- El promediando exponencial da más importancia a los paquetes más recientes en el promedio que a los paquetes más viejos.
- El Número de Promedios Especifica el número de paquetes para promediar. El valor por defecto es 10.

El Espectro del producto Contiene las siguientes opciones:

- Cada iteración devuelve el espectro después de la iteración del VI Expreso.
- Sólo cuando se ha promediado los ingresos completos el espectro se especifica en el Número de Promedios.

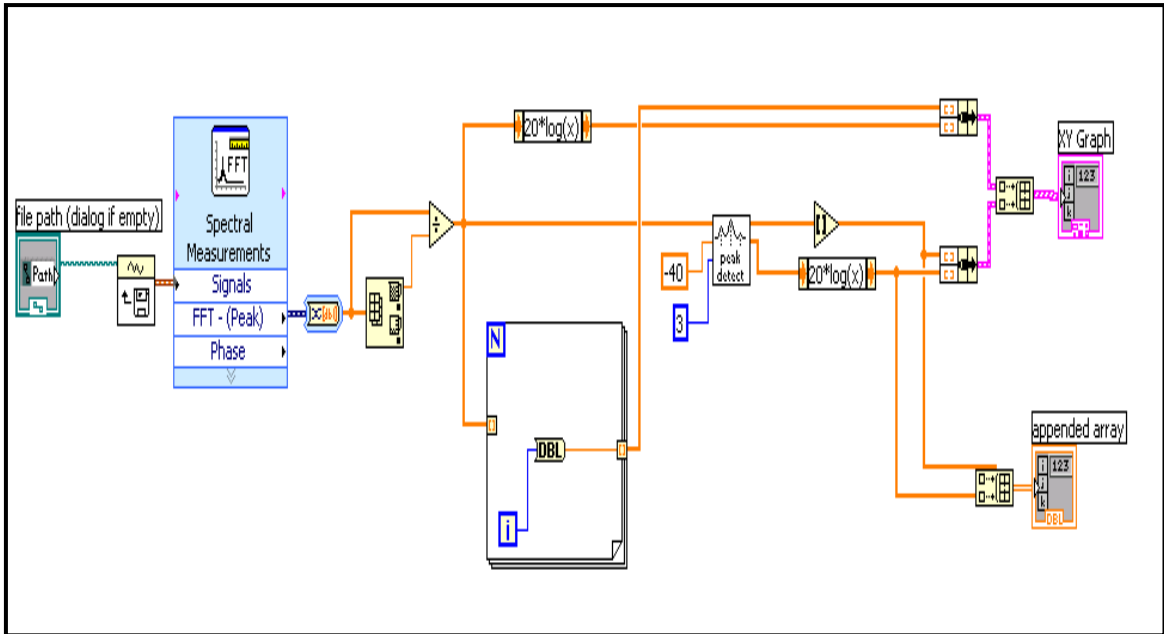
La fase Contiene las siguientes opciones:

- Desenvuelva los ingresos de la fase (la fase en los radianes).
- Convierta a grados (devuelve la fase en los grados).

#### **4.3.2 Programación de Análisis Espectral de Corrientes bajo LabVIEW.**

Lo que se desea realizar en este programa es normalizar la medición de las amplitudes de los armónicos. Es decir medir la evolución de los armónicos independientemente de la carga como se analiza en la figura 4.10. Mediante el empleo de valores por unidad y las variables eléctricas puedan ser comparadas. Para esto se mide la diferencia de amplitudes entre el armónico fundamental de la corriente y los armónicos característicos

de fallo sobre una escala logarítmica, y así se habrán normalizado los resultados con respecto al armónico fundamental. Con esto según la figura 4.9 las medidas serán independientes de la carga aplicada y de las amplitudes relativas de los distintos armónicos.



*Figura 4.9 Diagrama de bloques Principal*

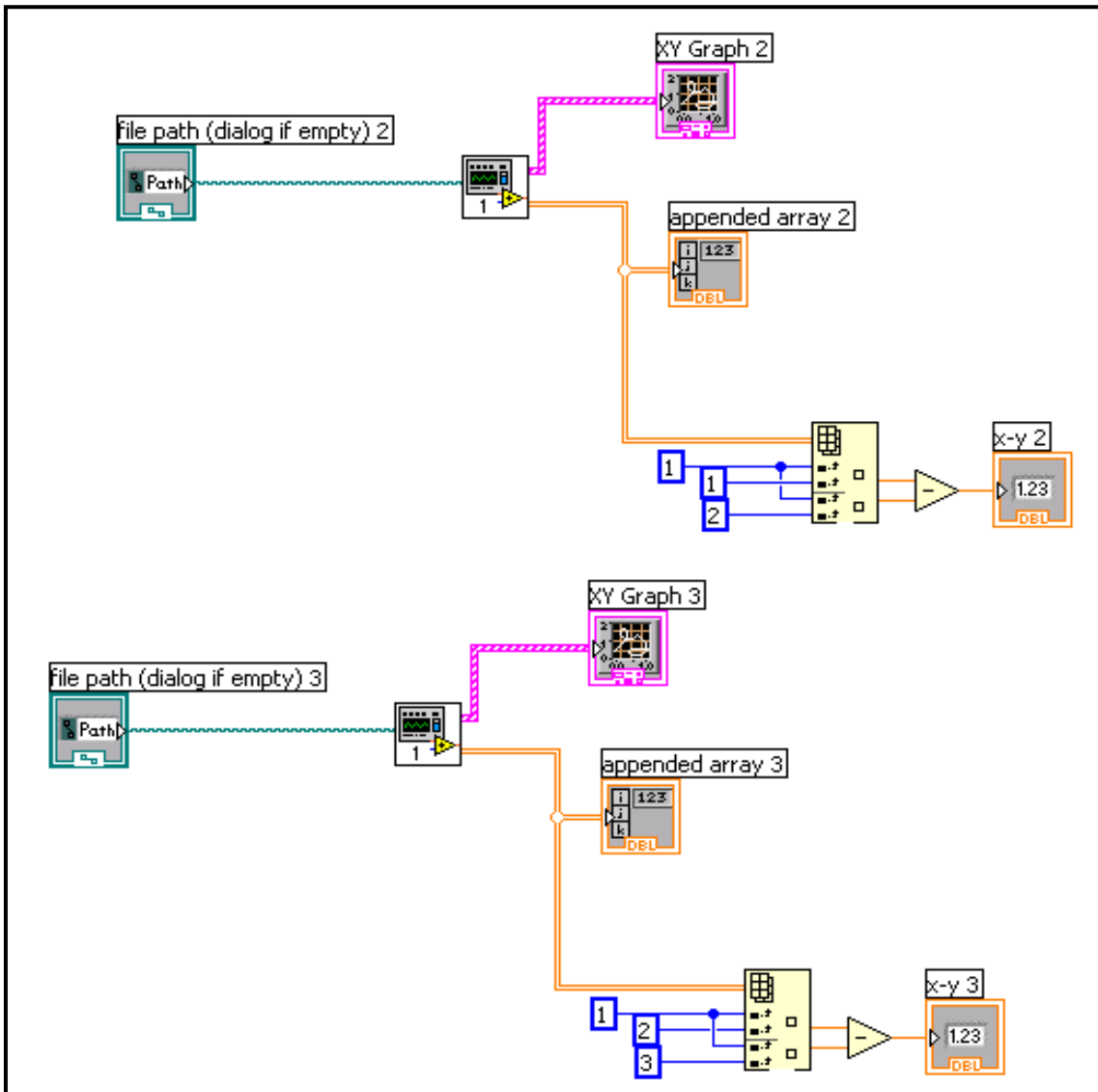


Figura 4.10 Diagrama de Bloques de los SubVI's del diagrama principal.

## **CAPITULO V**

### **ANÁLISIS MATEMÁTICO PRUEBAS Y VERIFICACIONES**

#### **5.1 INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS MATEMÁTICO**

Las muestras obtenidas de un dispositivo de DAQ constituyen la representación del dominio del tiempo. Algunas dimensiones, como la distorsión armónica, son muy difíciles de cuantificar inspeccionando la forma de onda de tiempo. Cuando el mismo signo se despliega en el dominio de frecuencia por un analizador de FFT, también conocido como un Analizador Señalado Dinámico, que se puede medir las frecuencias armónicas y amplitudes fácilmente. Es por esto que en esta sección se explica los principios de esta transformada y el análisis matemático que realiza FFT (transformada rápida de Fourier) bajo LabVIEW.

##### **5.1.1 Transformada discreta de Fourier (DFT)**

El algoritmo transforma muestras de los datos del dominio de tiempo en el dominio de la frecuencia, y es conocido como la transformada discreta de Fourier (DFT). DFT establece la relación entre las muestras de una señal en el dominio del tiempo y su representación en el dominio de frecuencia. DFT se usa ampliamente en los campos de análisis espectrográfico, mecánicas aplicadas, acústica, representación de imágenes médicas, análisis numérico, instrumentación, y telecomunicaciones.

En la figura 5.1 se ilustra la transformación de los datos del dominio de tiempo en el dominio de frecuencia, usando el DFT.

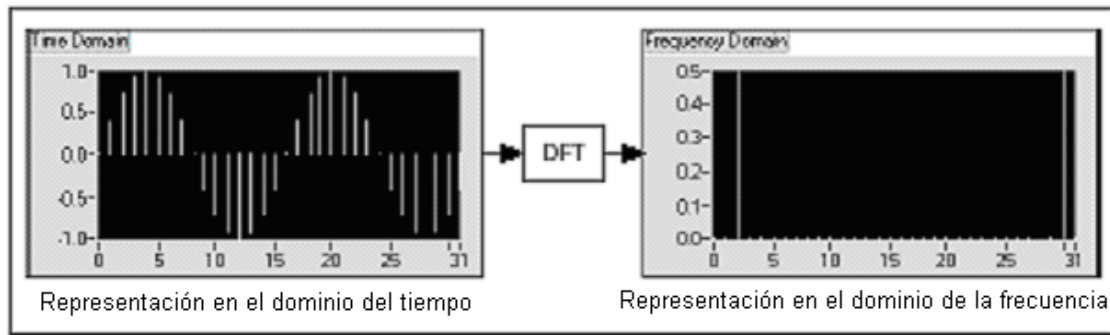


Figura. 5.1 Transformada discreta de Fourier

### 5.1.2 La relación entre las Muestras de Frecuencia y Dominio del Tiempo

En la muestra de una señal, el intervalo de tiempo entre las muestras, o intervalo de muestreo, se da por la ecuación 5.1.

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (5.1)$$

$\Delta t$  = Intervalo de muestreo

$f_s$  = Rango de frecuencia de la muestra en segundos

El DFT se da por lo siguiente la ecuación 5.2 y los resultados en  $X[k]$ , la representación del dominio de la frecuencia de la muestra de la señal.

$$X[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x[i] e^{-j2\pi i k / N} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5.2)$$

$x[i]$  = Dominio del tiempo de la muestra de la señal

$N$  = Número total de muestras.

$x$  = Dominio del tiempo

$X$  = Dominio de la frecuencia.

$X$  y  $x$  = Tienen un total de muestras  $N$

Análogo al espacio de tiempo de  $\Delta t$  entre las muestras de  $x$  en el dominio de tiempo, se tiene una resolución de frecuencia, entre los componentes de  $X$  en el dominio de frecuencia que se da por la ecuación 5.3.

$$\boxed{\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N\Delta t}} \quad (5.3)$$

$\Delta f =$  Resolución de frecuencia,

$f_s =$  Rango de la muestra,

$N =$  Número de muestras,

$\Delta t =$  Intervalo de muestreo,

$N\Delta t =$  Tiempo de adquisición total.

Para mejorar la resolución de frecuencia, es necesario un  $\Delta f$  menor, se debe aumentar  $N$  y debe guardar los  $f_s$  constante o  $f_s$  de disminución y  $N$  constante. Los dos de los acercamientos mejoran la resolución de frecuencia y es equivalente a  $N\Delta t$  creciente que es la duración de tiempo de las muestras adquiridas.

### 5.1.3 La magnitud e Información de Fase

El número de muestras por el tiempo y las representaciones de frecuencia son el mismo. En la ecuación 5.2, cada componente de frecuencia tiene una magnitud y fase.

$$x[i \text{ de la señal de entrada}] = \text{real o complejo}$$

$$X[k] = \text{complejo, la parte imaginaria puede ser cero.}$$

Normalmente la magnitud del espectro se despliega. La magnitud es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las partes reales e imaginarias. La fase es al principio relativa a la salida del registro de tiempo o al arranque del registro de tiempo.

Las dimensiones de fase de un solo canal sólo son estables si la señal de entrada se activa. Las dimensiones de fase de dos canales computan los retrasos de fase entre los canales para que cuando los canales se prueben simultáneamente, mientras normalmente activar no es necesario.

La fase el arco-tangente de la proporción de las partes imaginarias y reales y normalmente es entre 180 y -180 grados. Para los signos reales (el  $x[i]$  real), como

aquéllos obtenidos del rendimiento de un canal de un dispositivo de DAQ, el DFT es simétrico con propiedades dadas por la ecuación 5.4.

$$\boxed{\begin{aligned} |x[K]| &= |x[n-K]| \\ \text{FASE}(x[k]) &= -\text{FASE}(x[n-K]) \end{aligned}} \quad (5.4)$$

Las condiciones describen esta simetría ya que la magnitud de  $X[k]$  incluso es simétrico, y la fase( $X[k]$ ) es impar simétrico. Incluso el signo simétrico es simétrico sobre el eje Y, considerando que un signo simétrico impar es simétrico sobre el origen.

#### 5.1.4 Frecuencia que existe entre las Muestras de DFT

Si el intervalo de muestreo  $\Delta t$ , y los primeros datos ( $k = 0$ ) están a 0 segundos, entonces los datos del  $k$ th donde el  $k > 0$  o un entero, está a segundos del  $k \Delta t$ . Si la resolución de frecuencia es  $\Delta f$  Hz, entonces los  $k$ th del DFT ocurren a una frecuencia de  $k \Delta f$  Hz. Sin embargo, esta sólo es válida para la primera la mitad de los componentes de frecuencia. La otra mitad representa los componentes de frecuencia negativos.

Dependiendo si el número ( $N$ ) de muestras es par o impar, se puede tener una interpretación diferente de la frecuencia que corresponde a la muestra del  $k$ th del DFT.

Una representación donde se ve las frecuencias positivas y negativas es conocido como la transformada de doble cara.

Cuando  $N$  es impar, no hay ningún componente a la frecuencia de Nyquist. Esto también es una transformada de doble cara porque se tiene las frecuencias positivas y negativas.

#### 5.1.5 Los Principios de FFT

La aplicación directa del DFT en las muestras de datos del número de muestras requiere los funcionamientos complejos y es un proceso que exige mucho tiempo. FFT es un algoritmo rápido por calcular DFT.

### 5.1.6 Los Componentes de Frecuencia

Cada componente de frecuencia es el resultado de un producto del punto de la señal del dominio del tiempo con el complejo exponencial en esa frecuencia y se da por la ecuación 5.5.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left[ \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right] \quad (5.5)$$

El componente de DC es según la ecuación 5.6:

$$\text{Comp DC} = x(n) * [\cos(0) - j \sin(0)] \quad (5.6)$$

La primera componente de frecuencia, es el producto de la ecuación 5.7:

$$f_1 = x(n) * \left[ \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right] \quad (5.7)$$

$$\cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) = \text{Un solo ciclo de la onda del coseno,}$$

$$\sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) = \text{Un solo ciclo de la onda sinusoidal.}$$

En general, el  $k$  de la componente de frecuencia es el producto del punto de  $x(n)$  con ciclos del  $k$  del coseno. Donde la parte real de  $X(k)$  y la onda sinusoidal para la parte imaginaria de  $X(k)$ .

El uso del FFT para el análisis de frecuencia implica dos relaciones importantes. La primera relación se une la frecuencia más alta que puede analizarse a la frecuencia de muestreo y puede darse por la ecuación 5.8.



$$\boxed{F_{\max} = \frac{f_s}{2}} \quad (5.8)$$

$F_{\max}$  = Frecuencia más alta que puede analizarse

$f_s$  = Frecuencia de muestreo.

La segunda relación se une la resolución de frecuencia al tiempo de adquisición total que se relaciona a la frecuencia de muestreo y el bloque clasifica según tamaño del FFT y se da por la ecuación 5.9.

$$\boxed{\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{f_s}{N}} \quad (5.9)$$

$\Delta f$  = la resolución de frecuencia,

$T$  = tiempo de adquisición,

$f_s$  = frecuencia de muestreo,

$N$  = tamaño del bloque del FFT.

### 5.1.7 Los Tamaños de FFT rápidos

Cuando el tamaño de la sucesión de la entrada es un poder de dos,  $N_0 = 2^m$  para  $m = 1, 2, 3$  se puede llevar a cabo el cómputo del DFT con aproximadamente  $N_0 = \log_2(N)$  funcionamientos que hacen el cálculo del DFT mucho más rápidos. La literatura de DSP se refiere a los algoritmos para el cálculo de DFT más rápido como la transformada rápida de Fourier (FFT). los Ejemplos de tamaños de la sucesión dónde se puede usar este algoritmo es para este tema de tesis. Las ventajas del FFT incluyen velocidad y eficacia de memoria porque los VI pueden computar el FFT al instante. Es decir, ningún pulidor de memoria adicional se necesita para computar el rendimiento. Recíprocamente, el DFT puede procesar cualquier sucesión del tamaño eficazmente pero puede ser más lento que el FFT y usa más memoria porque debe asignar los pulidores adicionales por guardar los resultados intermedios durante el proceso. En la suma, otro beneficio que el algoritmo DFTs usa es cortar longitudes 2, 3, 4, 5, 8, y 10. Como resultado, cuando el tamaño de la sucesión no es un poder de dos, pero puede factorizarse como se indica en 5.10

$$N = 2^m 3^k 5^j \quad (5.10)$$

$$m, k, j = 0, 1, 2, 3, \dots$$

El DFT puede computarse con las velocidades comparables a la base-2 FFT pero requiere más memoria. Se puede usar el algoritmo perfeccionado para la sucesión clasificada según tamaño como 640, 480, 1,000, y 2,000. Cuando el tamaño de la sucesión no puede factorizarse en tamaños que están en el juego de DFT corto.

### 5.1.8 FFT VIS

La paleta del dominio de frecuencia contiene dos VI's que computan el FFT de un signo, el FFT Real VI y los FFT Complejos VI. La diferencia entre los dos VI's es que el FFT Real VI computa el FFT de un signo de un valor real, considerando que el FFT complejo VI computan el FFT de un signo de un valor complejo. Sin embargo, tiene presente que los rendimientos de ambos VI's son complejos. La mayoría de los signos del mundo real son los valores reales. Por consiguiente, se puede usar el FFT Real VI para la mayoría de las aplicaciones. Claro, también se podría usar el FFT Complejo VI poniendo la parte imaginaria de la señal a cero.

### 5.1.9 El espectro de Poder

En la sección magnitud e Información de Fase, el DFT o FFT de un realmente señalado es un número complejo, mientras teniendo un real y una parte imaginaria. Se puede obtener el poder en cada componente de frecuencia representado por el DFT o FFT cuadrando la magnitud de ese componente de frecuencia. Así, el poder en el componente de frecuencia de *kth*, es decir, el elemento del *kth* del DFT o FFT, se da por la ecuación 5.11.

$$\boxed{\text{Espectro de poder} = |x[k]|^2} \quad (5.11)$$

$|X[k]| = \text{magnitud de la componente de frecuencia.}$

La exhibición de la parte el poder en cada uno de los componentes de frecuencia está conocido como el espectro de poder. Porque el DFT o FFT de una señal real es

simétrico, el poder a una frecuencia positiva de  $k\Delta f$  está igual que el poder en la frecuencia negativa correspondiente de  $k\Delta f$ .

#### 5.1.10 La pérdida de Información de fase

Ya que el poder se obtiene cuadrando la magnitud del DFT o FFT, el espectro de poder siempre es real. La desventaja de obtener el poder cuadrando la magnitud del DFT o FFT es que la información de la fase está perdida. Si se quiere la información de la fase, se debe usar el DFT o FFT que le dan un rendimiento complejo. Se puede usar el espectro de poder para calcular el poder armónico en una señal. Se puede aplicar una entrada sinusoidal a un sistema no lineal y puede ver el espectro de poder en el armónico al rendimiento del sistema.

#### 5.1.11 Usando el espectro de Poder VI

Se puede usar el espectro de Poder VI para calcular datos de muestras del dominio del tiempo. Simplemente como el DFT y FFT, el número de muestras del rendimiento del espectro de Poder VI es igual que el número de muestras de datos aplicado a la entrada. También, la frecuencia que está entre las muestras del rendimiento es dada por la ecuación 5.12.

$$\boxed{\Delta f = \frac{f_s}{N}} \quad (5.12)$$

$\Delta f$  = la resolución de frecuencia,

$f_s$  = frecuencia de muestreo,

$N$  = tamaño del bloque del FFT.

#### 5.1.12 Función de la respuesta en frecuencia

La respuesta de frecuencia de un sistema se describe por la magnitud,  $|H|$ , y escala de  $H$ , a cada frecuencia. La ganancia del sistema es igual a su magnitud y es la proporción de la magnitud del rendimiento a la magnitud de la entrada a cada frecuencia. La fase del sistema es la diferencia de la fase del rendimiento y fase de la entrada en cada frecuencia.

### 5.1.13 Aliasing

Según Shannon el teorema está probando, la frecuencia más alta que puede analizar en una sucesión de la entrada es la frecuencia de Nyquist. La frecuencia de Nyquist se da por la ecuación 5.13.

$$\boxed{f_n = \frac{f_s}{2}} \quad (5.13)$$

$f_n = \text{Frecuencia de Nyquist}$

$f_s = \text{Frecuencia de muestreo.}$

Cualquier frecuencia analógica mayor que el  $f_n$  después de probar aparece como una frecuencia entre 0 y  $f_n$ . Una frecuencia es conocida como un alias de la frecuencia real. No hay ninguna manera de distinguir las frecuencias alias de las frecuencias que realmente quedan entre 0 y  $f_n$ . Por consiguiente, las frecuencias alias necesitan ser quitadas de la señal analógica antes de pasar por el conversor de A/D. En orden al quitar las frecuencias alias se presentan superiores a las frecuencias que la frecuencia de Nyquist, se debe usar un filtro del lowpass analógico. En el anti-aliasing el filtro del lowpass analógico debe exhibir una respuesta en frecuencia del filtro pasa banda.

### 5.1.14 Windowing

En las aplicaciones prácticas, se obtiene sólo un número finito de muestras del signo. El FFT asume que este registro de tiempo se repite. Si se tiene un número íntegro de ciclos en su registro de tiempo, la repetición está lisa en los límites. Sin embargo, en las

aplicaciones prácticas, se tiene normalmente un número del nonintegral de ciclos. En el caso de un número del nonintegral de ciclos, la repetición produce las discontinuidades a los límites. Una señal que es periódica en el registro de tiempo está compuesta de ondas sinusoidales con los ciclos íntegros exactos dentro del registro de tiempo. El espectro de FFT modela el dominio de tiempo como si el registro de tiempo se repitiera siempre. Asume que el registro analizado es simplemente un periodo de un signo periódico infinitamente repetidor. Se puede usar el windowing para reducir el tamaño de la discontinuidad y de reducir el goteo espectral. Windowing consiste en multiplicar el signo del dominio del tiempo por otra forma de onda del dominio del tiempo, conocido como una ventana cuya amplitud adelgaza gradualmente y fácilmente hacia el cero a los bordes. El resultado es un signo enventanado con muy pequeño o ninguna discontinuidad, y por consiguiente reduce el goteo espectral. Se puede escoger de entre muchos tipos diferentes de ventanas. El que se escoge depende de la aplicación y un poco de conocimiento anterior de la señal que se está analizando.

### 5.1.15 Promediando para Mejorar la Medida

Las dimensiones sucesivas promediadas normalmente mejoran la exactitud de la medida. Normalmente se realizan promedios en los resultados de la medida o en los espectros individuales, pero no directamente en el registro de tiempo. Los modos de promedios más comunes son:

- **Promediando El RMS**

El RMS promediado reduce las fluctuaciones señaladas pero no el suelo del ruido. El suelo del ruido no está reducido porque RMS promedia la energía, de la señal. En el RMS promedio se computa las dimensiones según las ecuaciones 5.14 a 5.19.

$$\text{Espectro FFT} = \boxed{(X)} \quad (5.14)$$

$$\text{Espectro de poder} = \boxed{(X^*)(X)} \quad (5.15)$$

$$\text{Espectro cross} = \boxed{(X^*)*(Y)} \quad (5.16)$$

*Respuesta de frecuencia*

$$= H1 = \frac{(X^* * Y)}{(X^* * X)} \quad (5.17)$$

$$= H2 = \frac{(Y^* * Y)}{(Y^* * X)} \quad (5.18)$$

$$= H3 = \frac{(H1 + H2)}{2} \quad (5.19)$$

$X$  = FFT complejo de  $x$  señalado (el estímulo),

$Y$  = FFT complejo de  $y$  señalado (la contestación),

$X^*$  = complejo conjugado de  $X$ ,

$Y^*$  = complejo conjugado de  $Y$

- **El vector Promediando**

El vector promediado elimina el ruido de los signos síncronos. Computa el promedio de cantidades complejas directamente. La parte real se promedia separadamente de la parte imaginaria. Promediando la parte real separadamente de la parte imaginaria pueden reducir el suelo del ruido. Las partes reales e imaginarias se promedian separadamente, mientras reducen el ruido.

$$\text{Espectro FFT} = \boxed{(X)} \quad (5.15)$$

$$\text{Espectro de poder} = \boxed{(X^* \cdot X)} \quad (5.16)$$

$$\text{Espectro cross} = \boxed{(X^*) * (Y)} \quad (5.17)$$

$$\text{Respuesta de frecuencia} = \boxed{\frac{(Y)}{(X)} (H1 = H2 = H3)} \quad (5.20)$$

$X$  = FFT complejo de  $x$  señalado (el estímulo),

$Y$  = FFT complejo de  $y$  señalado (la contestación),

$X^*$  = complejo conjugado de  $X$ ,

$Y^*$  = complejo conjugado de  $Y$ , es el promedio del  $X$ , real y partes imaginarias que se promedian separadamente.

- **El Sostenimiento máximo**

El sostenimiento promediado máximo retiene los niveles máximos de las cantidades promediadas. El sostenimiento máximo está dado según la ecuación 5.21 separadamente a cada línea de frecuencia, mientras reteniendo los niveles máximos de un FFT graba al próximo.

$$\begin{array}{l} \text{Espectro FFT } \text{MAX} \sqrt{(X^* * X)} \\ \text{Espectro de poder } \text{MAX} (X^* * X) \end{array} \quad (5.21)$$

$X$  =FFT complejo de  $x$  señalado (el estímulo),

$X^*$  = complejo conjugado de  $X$ .

## 5.2 PRUEBAS Y VERIFICACIONES.

Para esta sección se realizó una comparación entre las señales tomadas de un motor sano con uno con avería, en distintas etapas de averías.

El espectro del motor en óptimas condiciones en vacío que se observará en la figura 5.2 en la sección de presentación de datos es analizado para verificar que cuando el motor no tiene carga los armónicos laterales se superponen al armónico fundamental.

El espectro del motor con alta impedancia en vacío no es necesario presentarlo ya que no se puede visualizar las fallas porque no se observan los armónicos laterales, debido a que por estar sin carga no se puede visualizar los armónicos laterales, y no existe mucha diferencia de amplitud entre los armónicos con respecto a la del motor en óptimas condiciones

Aún cuando en el espectro del motor en vacío con por lo menos una barra rota la diferencia de amplitudes de los armónicos es considerablemente variable con respecto al motor en buenas condiciones, tampoco es necesario visualizarlo ya que al trabajar sin carga no se observa dichos armónicos en la pantalla

En el espectro de corrientes del motor en buenas condiciones con carga nominal que se visualiza en la figura 5.3, se presentan claramente los armónicos laterales alrededor del

armónico fundamental, por lo que en base a este espectro se comparan los espectros de los motores con distintas clases de averías.

El espectro del motor con alta impedancia a una carga nominal, como se observará en la figura 5.4 ya se presentan armónicos laterales con deferencias con respecto a los del espectro del motor en buenas condiciones.

En el espectro del motor con una barra rota a la carga nominal, visualizado en la figura 5.6 se observa claramente la diferencia de amplitudes entre armónicos

Si se toman medidas de las diferencias entre las amplitudes de los armónicos laterales y el fundamental casi no existe ninguna variación entre el 50% y 85% de carga.

### **5.3 PRESENTACIÓN Y DIAGNOSTICO DE DATOS.**

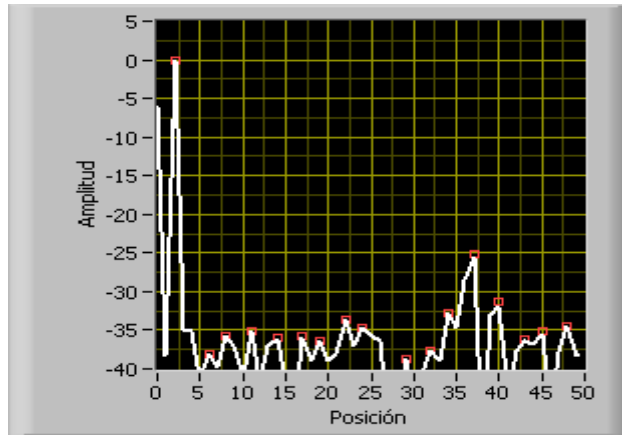
Para el diagnóstico se invocan los datos obtenidos en las subrutinas de adquisición y análisis de datos y estas a su vez envían la información referente a las pruebas realizadas

Se realizará el análisis espectral de corriente del motor de inducción jaula de ardilla mediante la adquisición de señales de frecuencia, obtenidas por medio del equipo de adquisición de datos especificado en la tabla 4.1

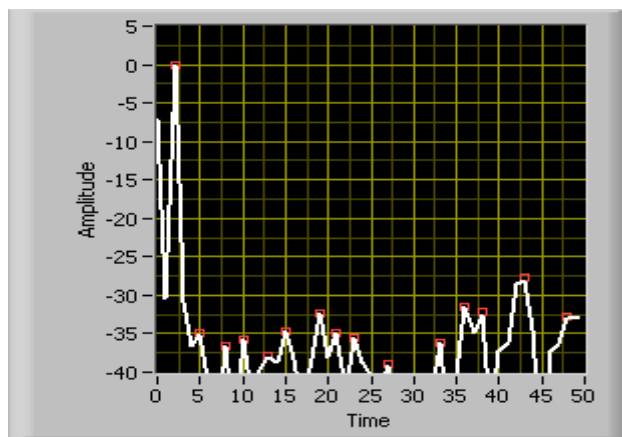
Se visualizará y analizará las señales del análisis espectral de corrientes obtenidas en la tarjeta NI-PCI 6014 en el programa gráfico LabVIEW.

En la fase S con la figura 5.2, en la fase R con la figura 5.3, en la fase T con la figura 5.4 se puede apreciar el motor cuando gira en vacío

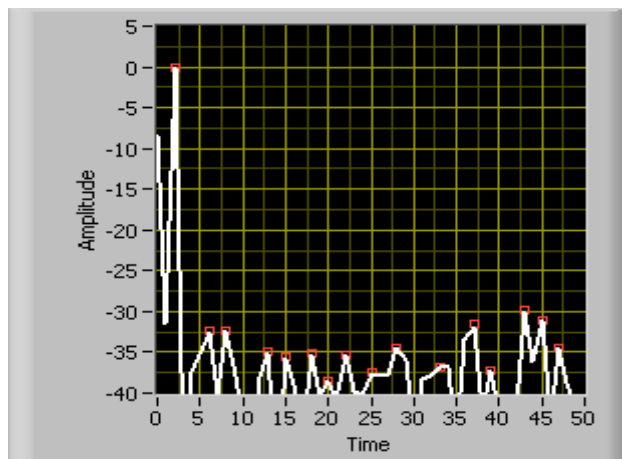




*Figura 5.2 Espectro de corrientes del motor en óptimas condiciones sin carga fase R*



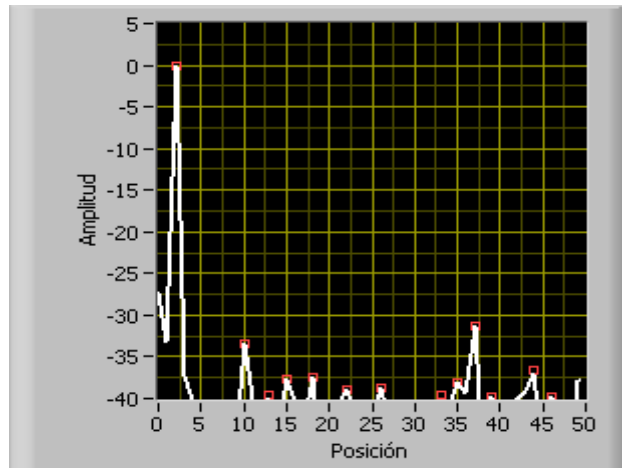
*Figura 5.3 Espectro de corrientes del motor en óptimas condiciones sin carga fase S*



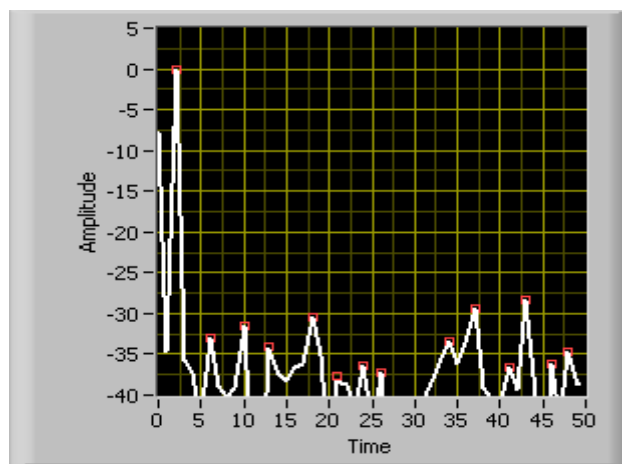
*Figura 5.4 Espectro de corrientes del motor en óptimas condiciones sin carga fase T*

A continuación se presentan los resultados obtenidos en diferentes rangos de valores para las amplitudes de los armónicos de las corrientes y su relación con el grado de avería en un motor con carga.

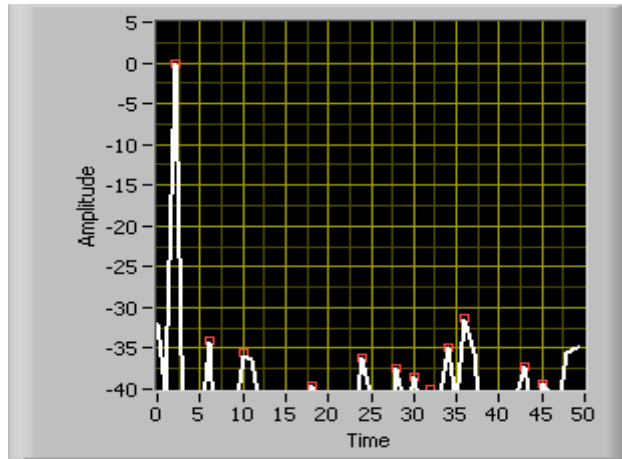
Se muestra el espectro de corrientes alrededor del armónico fundamental para el caso del motor sano con carga a una frecuencia de 60Hz., en la fase R con la figura 5.5, en la fase S con la figura 5.6, en la fase T con la figura 5.7



*Figura 5.5 Espectro de corrientes del motor con carga fase R*

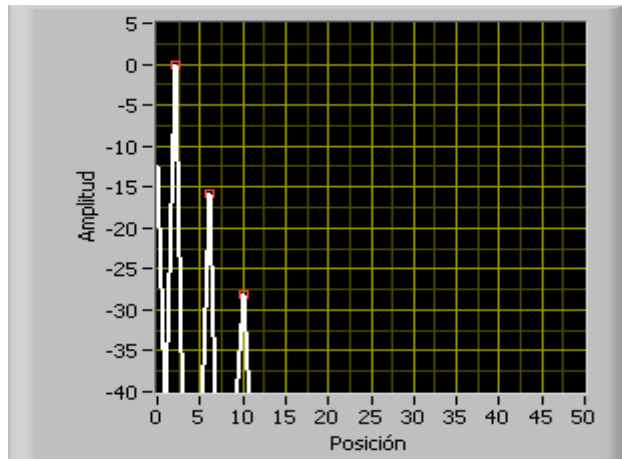


*Figura 5.6 Espectro de corrientes del motor con carga fase S*

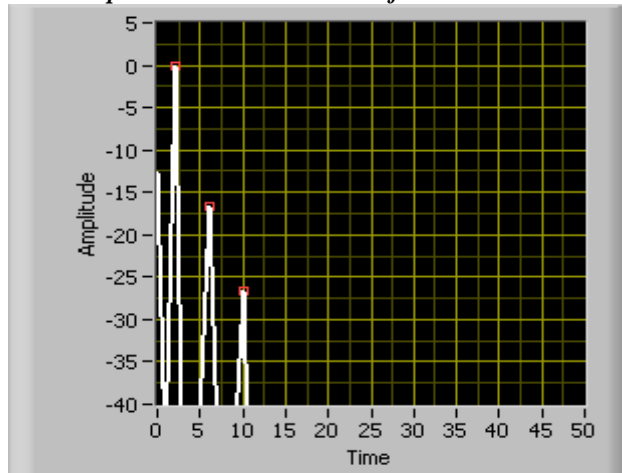


*Figura 5.7 Espectro de corrientes del motor con carga fase T*

Se observa el espectro de corrientes alrededor del armónico fundamental para el caso del motor con una avería en la fase S (rotura de barra). En la fase R visualizado a través de la figura 5.8, y en la fase T a través de la figura 5.9.

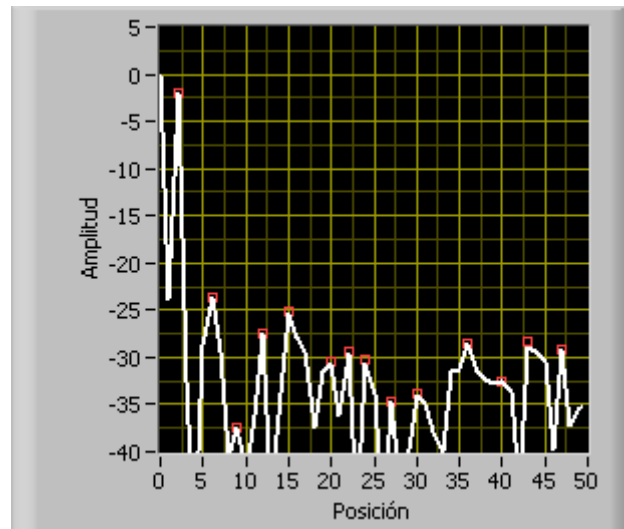


*Figura 5.8 Espectro de corrientes de la fase S con rotura de barra*

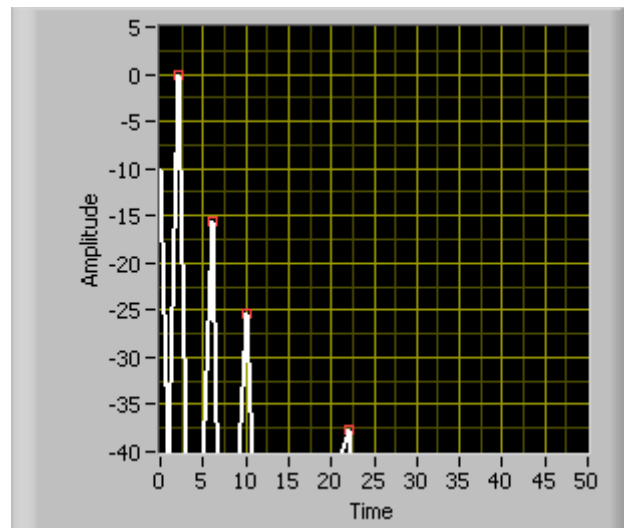


*Figura 5.9 Espectro de corrientes del motor de la fase T con rotura de barra*

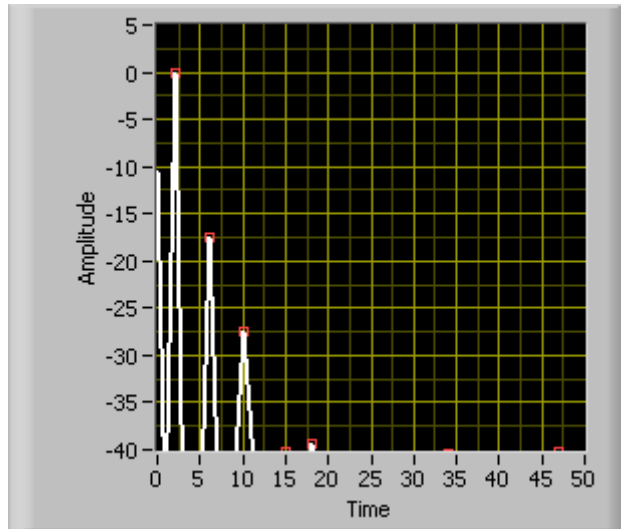
En la figura 5.10 se muestra el espectro de corrientes alrededor del armónico fundamental para el caso del motor con alta impedancia en una fase. Este caso se produce cuando existe una pequeña rotura en la barra, no se produce un incremento substancial en la amplitud de los armónicos laterales ya que mientras exista una sección para la circulación de corriente por una barra, no habrá gran distorsión del campo magnético.



*Figura 5.9 Espectro de corrientes con alta impedancia fase en R*



*Figura 5.9 Espectro de corrientes con alta impedancia fase S*



*Figura 5.9 Espectro de corrientes con alta impedancia fase T*

## **CAPITULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Luego del trabajo desarrollado para el cumplimiento de la Tesis llamada “Diagnóstico de Motores Eléctricos de Inducción Jaula de Ardilla Mediante el Análisis Espectral de

Corrientes bajo LabVIEW” se ha llegado a las siguientes conclusiones y recomendaciones necesarias para la aplicación del proyecto.

## 6.1 CONCLUSIONES:

- Las asimetrías en la jaula rotórica de un motor de inducción suelen estar relacionadas con las altas temperaturas alcanzadas en el rotor y con las elevadas fuerzas centrífugas que soportan tanto barras como anillos, especialmente bajo los regímenes de funcionamiento transitorio.
- La presencia de una barra rota en un motor de inducción produce una alteración en el campo que se concentra entorno a ella, que pueden descomponer en una serie de armónicos que giran en sentido directo y otra que lo hacen en sentido inverso, apareciendo superpuestos a los armónicos de funcionamiento normal del motor
- Los armónicos inducen fuerzas electromotrices en el estator que se traducen en el incremento de las amplitudes de ciertos armónicos de las corrientes estatóricas.
- Por encima del 50% de la corriente nominal del motor ya se pueden emitir diagnóstico, pero al incrementar la carga aplicada al motor la corriente circulante por el rotor aumenta, con lo que la distorsión causada por la avería se hace más apreciable. Y los armónicos laterales incrementan su valor.
- La utilización de los armónicos lateral inferior y lateral superior de la corriente estatórica del motor es uno de los métodos para la detección de la rotura de barras.
- Por la variación de las amplitudes de los armónicos con la carga del motor y la influencia del tamaño y características constructivas, el parámetro para indicar el grado de avería es la diferencia de entre las amplitudes del armónico fundamental y los laterales.

- Armónicos de mayor frecuencia encontrados en forma de bandas laterales de los armónicos de las corrientes estáticas, cuya sensibilidad para la detección de fallo es similar a la de los anteriores.
- En el motor al realizar un diagnóstico, el origen de cada uno de los armónicos debe ser tomado en cuenta y valorado, especialmente si se trata de detectar la avería en un estado de inicio.
- Gracias a la funcionalidad de LabVIEW y su potente librería de análisis fue posible desarrollar la aplicación en un tiempo relativamente corto. Ya que menudo en un laboratorio ya existen instrumentos y dispositivos programables (no computarizados), por ejemplo osciloscopios, multímetros, analizadores de espectros, fuentes de poder, contadores de frecuencia, switches, etc., que funcionan ya sea independientemente o integrados en un sistema de pruebas.
- La mayor ventaja de los sistemas de adquisición de datos es su flexibilidad. Debido a que el instrumento es un programa, se puede cambiarlo hasta ajustarlo a las necesidades del usuario y por lo tanto no está limitado al diseño del fabricante, como ocurre con los instrumentos tradicionales de fábrica.
- Una ventaja es su capacidad de reconfiguración y ampliación. Puesto que a un computador se lo puede equipar con distintas herramientas, resulta fácil y accesible ampliar su funcionalidad para crear aplicaciones a partir de proyectos sencillos y de bajo costo.
- Los sistemas computarizados son una solución de bajo costo, de alta flexibilidad y escalables para desarrollar e integrar sistemas de adquisición de datos, instrumentos, automatizar bancos de prueba y presentar reportes. Estos sistemas son aplicables a cualquier proyecto que incluya adquisición de señales de sensores, comunicaciones con instrumentos, automatización de pruebas, instrumentación y metrología, análisis de datos y presentación de resultados.

- Se logró configurar un sistema confiable de adquisición de datos bajo la plataforma SCC y se desarrolló una aplicación basada en labVIEW, que permite analizar los espectros de las señales de corriente de suministro al estator, para identificar las componentes asociadas a problemas en el motor y luego registra la información.
- Se desarrolló un sistema que ayuda al diagnóstico de las fallas más comunes de los motores eléctricos de inducción con rotor jaula de ardilla, mediante el diseño y acondicionamiento de la interfase, con la configuración de Hardware y Software de adquisición de datos en entorno labVIEW, para el laboratorio de máquinas eléctricas.

## **6.2 RECOMENDACIONES:**

- Para presentar una relación entre la amplitud de las frecuencias de los armónicos que deben aparecer en el espectro de corriente como consecuencia de la rotura de barras y el grado de avería se debe normalizar la medición de las amplitudes, permitiendo aplicar el procedimiento de diagnóstico en un amplio rango de funcionamiento del motor.
- Se deberá realizar el diagnóstico con el motor trabajando lo más cerca de su carga nominal para ya que la corriente por el rotor será la máxima y así el efecto de la avería más apreciable.
- Para evitar los efectos producidos por la inercia del motor se recomienda utilizar como referencia para el diagnóstico la suma de las amplitudes de ambos armónicos, inferior y superior, ya que la reducción de uno y el incremento del otro quedan compensados.
- Para el análisis de cada motor de inducción jaula de ardilla se recomienda tomar muy en cuenta los datos técnicos de voltaje y corriente con los que trabaja el motor a su carga nominal para su correcto diagnóstico con el programa desarrollado.
- Es necesario encontrar un convenio de la Escuela con empresas interesadas para que se creen proyectos que puedan realizar alumnos egresados o del último nivel en los laboratorios de la Carrera, de tal manera que se asuma como experiencia laboral.



## • GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS

- 
- FEM Fuerza Electromotriz
- FMM Fuerza Magnetomotriz
- DAQ Adquisición de datos
- IRED Diodo emisor de infrared
- CMRR Error despreciable offset
- DMMs Multímetros digitales
- RSE Conexión a tierra de referenciación simple
- DIFF Conexión a tierra en modo diferencial
- PFI Función de entrada programable
- LAN La red de comunicación
- WAN Comunicación a nivel superior de red
- MCSA Análisis Espectral de un Motor de Corriente
- Armónica Frecuencia de la red
- VI's Instrumentos Virtuales
- SubVI Es un subprograma en lenguaje de programación de un VI
- Array Arreglo numérico de datos del mismo tipo
- String Colección de caracteres ACCII
- Cluster Colección ordenada de uno o más elementos
- DDE Intercambio Dinámico de Datos
- PPC Comunicación de programa a programa
- FFT Transformada Rápida de Fourier
- DFT Transformada Discreta de Fourier

## BIBLIOGRAFIA

- KOSOW, Irving L, Máquinas Eléctricas y transformadores, II Edición, Capítulo 9.
- FITZGERAL, Máquinas Eléctricas. IV Edición , Capítulo 1-2-3.
- Colección Océano I, Máquinas Eléctricas y transformadores, III Edición.
- [www.ni.com/sigcon](http://www.ni.com/sigcon)
- <http://www.ni.com/sigcon>
- <http://www.itlp.edu.mx/publica/tutoriales/electronica/index>
- [http://prof.usb.ve/jaller/Guia\\_Maq\\_pdf/](http://prof.usb.ve/jaller/Guia_Maq_pdf/)
- <http://www.abcdatos.com/tutoriales/electronicayelectricidad/electronica>
- <http://electronicosonline.com/directorio>
- <http://digital.ni.com/express.nsf/express?openagent&code=exnft>

# **ANEXO A**

## Tipos de datos

Control	Indicator	Data Type	Default Values
		Single-precision, <a href="#">floating-point</a> numeric	0.0
		Double-precision, floating-point numeric	0.0
		Extended-precision, floating-point numeric	0.0
		<a href="#">Complex</a> single-precision, floating-point numeric	0.0 + i0.0
		Complex double-precision, floating-point numeric	0.0 + i0.0
		Complex extended-precision, floating-point numeric	0.0 + i0.0
		8-bit <a href="#">signed integer</a> numeric	0
		16-bit signed integer numeric	0
		32-bit signed integer numeric	0
		8-bit <a href="#">unsigned integer</a> numeric	0
		16-bit unsigned integer numeric	0
		32-bit unsigned integer numeric	0
		<64.64>-bit time stamp	date and time (local)
		Enumerated type	—
		Boolean	FALSE
		String	empty string
		Array—Encloses the data type of its elements in square brackets and takes the color of that data type.	—
		Cluster—Encloses several data types. Cluster data types are brown if all elements in the cluster are numeric or pink if all the elements of the cluster are different types.	—
		Path	empty path
		Dynamic—(Express VIs) Includes data associated with a signal and the attributes that provide information about the signal, such as the name of the signal or the date and time the data was acquired. Refer to the <i>Dynamic Data Type</i> section of Chapter 5, <i>Building the Block Diagram</i> , in the <a href="#">LabVIEW User Manual</a> for more information about using the dynamic data type.	—
		Waveform—Carries the data, start time, and $\Delta t$ of a waveform. Refer to the <i>Waveform Data Type</i> section of Chapter 12, <i>Graphs and Charts</i> , in the <a href="#">LabVIEW User Manual</a> and to the <i>Waveform Control and Digital Waveform Control</i> section of Chapter 5, <i>Typical Measurement Application</i> , in the <a href="#">LabVIEW Measurements Manual</a> for more information about using the waveform data type.	—
		Digital waveform—Carries start time, delta x, the digital data, and any attributes of a digital waveform. Refer to the <i>Digital Waveform Data Type</i> section of Chapter 12, <i>Graphs and Charts</i> , in the <a href="#">LabVIEW User Manual</a> for more information about the digital waveform data type.	—
		Digital—Encloses data associated with digital signals. Refer to the <i>Digital Waveform Graphs</i> section of Chapter 12, <i>Graphs and Charts</i> , in the <a href="#">LabVIEW User Manual</a> for more information about digital data.	—
		Reference number (refnum)	—
		Variant—Includes the control or indicator name, the data type information, and the data itself. Refer to the <i>Handling Variant Data</i> section of Chapter 5, <i>Building the Block Diagram</i> , in the <a href="#">LabVIEW User Manual</a> for more information about the variant data type.	—
		I/O name—Passes resources you configure to I/O VIs to communicate with an instrument or a measurement device. Refer to the <i>I/O Name Controls and Indicators</i> section of Chapter 4, <i>Building the Front Panel</i> , in the <a href="#">LabVIEW User Manual</a> for more information about the I/O name data type.	—
		Picture—Displays pictures that can contain lines, circles, text, and other types of graphic shapes. Refer to the <i>Using the Picture Indicator</i> section of Chapter 13, <i>Graphics and Sound VIs</i> , in the <a href="#">LabVIEW User Manual</a> for more information about the picture data type.	—