

**SISTEMA DE MONITOREO PARA EL BANCO DE
VIBRACIÓN TORSIONAL**

LEONEL MORA CRUZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.004

**SISTEMA DE MONITOREO PARA EL BANCO DE
VIBRACIÓN TORSIONAL**

LEONEL MORA CRUZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

ALFONSO GARCIA CASTRO

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.004

DEDICATORIA

A Dios, por lograr superar un peldaño en mi ascenso a la carrera profesional.

A mis padres, en especial a mi madre **Carmen Cecilia** por su apoyo infatigable durante mi carrera.

LEONEL

AGRADECIMIENTOS

A Alfonso García Castro, ingeniero mecánico, director del proyecto quien me sugirió la realización del proyecto.

A Sandro Mora, ingeniero electrónico por su valiosa colaboración en la realización del proyecto.

A Milton Muñoz por sus aportes oportunos y préstamo de equipos.

A Carlos Jiménez, ingeniero electrónico por su colaboración en el diseño y ensamble de la tarjeta de adquisición de datos.

A mis padres, hermanos y familiares.

Leonel Mora Cruz.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	3
1.1. TIPOS DE SEÑALES	5
1.1.1. Acondicionadores de Señal o Interfases	7
1.2. SENSORES	7
1.2.1. Clasificación	9
1.2.2. Características Generales de los Sensores	10
1.2.2.1. Características Estáticas	10
1.2.2.2. Características Dinámicas	12
1.3. TRANSDUCTORES DE POSICIÓN	13
1.3.1. Detectores de Proximidad	13
1.3.1.1. Sensores Inductivos	14
1.3.1.2. Sensores Capacitivos	14
1.3.1.3. Sensores de Efecto Hall	15
1.3.1.4. Sensores Ópticos	16
1.3.1.5. Sensores Ultrasónicos	17
1.3.2. Medidores de Posición o Distancia	18
1.3.2.1. Potenciómetro	19
1.3.2.2. Encoders	20
1.3.2.3. Síncros	25
1.3.2.4. Resolvers	26
1.3.2.5. Sensores Láser	28
1.3.2.6. Sensores Ultrasónicos	29

1.3.2.7	Sensores Magnetoresistivos	29
2.	MEDICIÓN DE VIBRACIÓN TORSIONAL	30
2.1.	GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS (STRAIN GAGES)	31
2.2.	TORSIOGRAPH	36
2.3.	VIBROMETRO LASER	37
2.4.	SISTEMAS CON TRANSDUCTORES DE SEÑAL PORTADORA	39
2.4.1.	Sistemas de Frecuencia Modulada	41
2.4.2.	Sistemas de Amplitud Modulada	32
2.5.	SISTEMAS DE BANDAS LATERALES Y ANÁLISIS DE FRECUENCIA	43
2.6.	TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIÓN TORSIONAL	46
2.6.1.	Medición por Intervalos de Tiempo	46
2.6.2.	Medición sin Contacto	48
2.6.3.	Medición por Saturación de Pulsos	49
2.6.4.	Medición por Alineación de Tiempo	53
2.6.5.	Medición mediante Sensado Óptico	57
3.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO	61
3.1.	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	61
3.1.1.	Transductores	61
3.1.2.	Acondicionamiento de Señal	64
3.1.3.	Tarjeta de Adquisición de Datos	64
3.1.3.1.	Descripción de la tarjeta	65
3.1.3.2.	Descripción detallada	68
3.2.	INTERFAZ DE CONEXIÓN	71
3.2.1.	Comunicación Puerto Paralelo	71
3.2.2.	Comunicación Puerto Serie	72
3.3.	CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	73
3.3.1.	Sub VI DAC08	74
3.3.1.1.	Descripción del panel frontal	74

3.3.1.2.	Descripción detallada del VI	76
3.3.1.3.	Configuración del VI	79
3.3.1.4.	Modos de adquisición de datos	80
3.3.1.5.	Adquisición cíclica de datos analógicos	83
3.3.2.	Sub VI digital out	84
3.3.2.1.	Descripción del panel frontal el VI digital out	84
3.3.2.2.	Descripción detallada del VI digital out	85
3.3.2.3.	Escritura en el puerto con el VI digital out	85
3.4.	Computador	86
4.	PROGRAMACIÓN EN LABVIEW	87
4.1.	PREACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES A ADQUIRIR	87
4.1.1.	Filtrado	88
4.1.2.	Análisis frecuencial utilizando la FFT	89
4.1.3.	Ventaneo en el dominio de tiempo	90
4.2.	RECONSTRUCCIÓN DE LA SEÑAL A PARTIR DE SU ESPECTRO DE AMPLITUD Y FASE	91
4.3.	MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DE TORSIOLAB	92
4.3.1.	Ambiente	92
4.3.2.	Almacenamientos de archivos	93
4.3.3.	Requerimientos	93
4.3.4.	Utilidades	94
4.3.5.	Modificación de gráficos	97
4.3.6.	Mensajes de error	98
4.4.	MANUAL GENERAL DE LABVIEW 6i	98
5.	OPERACIÓN DEL BANCO DE VIBRACIÓN TORSIONAL	99
5.1.	CONEXIÓN DEL SISTEMA DE ACCIONAMIENTO	99
5.2.	EQUIPO UTILIZADO	100
5.3.	OPERACIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN	100

5.4	INSTALACIÓN DE LA CAJA ELECTRONICA	101
5.5.	SECUENCIA DE ENCENDIDO Y APAGADO	102
5.6.	RECOMENDACIONES DE LA EXPERIMENTACION	103
6.	EXPERIMENTCIÓN	105
6.1.	PLANILLA DE PRUEBAS	105
6.2	ANALISIS DE RESULTADOS	108
	CONCLUSIONES	116
	RECOMENDACIONES	117
	BIBLIOGRAFIA	118
	ANEXOS	120

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Sistema de control en lazo cerrado.	3
Figura 2. Modelo estructural de un sistema automatizado.	4
Figura 3. Tipos de señales.	6
Figura 4. Estructura genérica de un transductor.	8
Figura 5. Tipos de detectores inductivos.	14
Figura 6. Tipos de detectores capacitivos.	15
Figura 7. Detector de efecto Hall.	15
Figura 8. Detectores ópticos de salida análoga.	17
Figura 9. Tipos de detectores ultrasónicos.	18
Figura 10. Potenciómetro.	19
Figura 11. Disco óptico dentado.	22
Figura 12. Disposición del transductor óptico sobre el disco-eje	22
Figura 13. Partes del transductor óptico.	23
Figura 14. Campos de aplicación de los encoders.	24
Figura 15. Principio de funcionamiento de un sincro.	26
Figura 16. Esquema de un resolver tradicional.	27
Figura 17. Interferómetro láser.	28
Figura 18. Elementos básicos de una galga extensiométrica.	33
Figura 19. Circuito de puente lleno - Puente de Wheatstone.	34
Figura 20. Sección de eje con momento torsional.	34
Figura 21. Sección de eje con 4-galgas.	35
Figura 22. Instalación de Strain Gage en un eje.	35
Figura 23. Instalación típica del Torsiograph.	36
Figura 24. Sección transversal del Torsiograph.	37

Figura 25.	Esquema opto-electrónico del vibrómetro láser tipo 2523 de B&K.	38
Figura 26.	Señal portadora para medición de vibración torsional.	40
Figura 27.	Detección de la envolvente.	42
Figura 28.	Espectro de bandas laterales producido por V. T.	44
Figura 29.	Esquema del sistema de medición por intervalos de tiempo.	47
Figura 30.	Diagrama de tiempos del esquema de conteo.	47
Figura 31.	Esquema conceptual del método sin contacto.	49
Figura 32.	Unidad captadora de señal con sensor magneto-eléctrico.	50
Figura 33.	Principio básico del método de saturación de pulsos.	51
Figura 34.	Señales de pulso usadas como método de alineación de tiempo.	54
Figura 35.	Sistema de medición.	56
Figura 36.	Diagrama de bloques del sistema de medición.	59
Figura 37.	Esquema del procesamiento digital de las señales adquiridas.	60
Figura 38.	Conformación de un sistema de adquisición de datos.	61
Figura 39.	Circuito electrónico del transductor óptico.	63
Figura 40.	Circuito electrónico activador del disparo (Trigger).	63
Figura 41.	Tarjeta de adquisición de datos.	66
Figura 42.	Distribución de componentes de la tarjeta.	67
Figura 43.	Bus de adquisición para cables individuales.	69
Figura 44.	Bus de salida digital para cables individuales.	70
Figura 45.	Conexión puerto paralelo del PC, DB25F.	71
Figura 46.	Conexión puerto serie del PC, DB9.	72
Figura 47.	Descripción del panel frontal.	75
Figura 48.	Tab de selección del panel de ajuste.	76

Figura 49.	Selector de canal y modo de adquisición.	78
Figura 50.	Panel de adquisición de datos digitales.	82
Figura 51.	Captura en modo cíclico.	83
Figura 52.	Panel de ajustes y control.	84
Figura 53.	Icono para adquirir reportes de medición	92
Figura 54.	Menú principal de TORSIOLAB.	93
Figura 55.	Panel principal de análisis de datos, Adquirir.	95
Figura 56.	Controles del panel frontal de adquisición.	95
Figura 57.	Panel de ajustes del menú análisis.	96
Figura 58.	Modificación de graficas.	96
Figura 59.	Esquema general de conexión del prototipo.	98
Figura 60	Panel de control de la fuente de excitación.	99
Figura 61	Disposición de accesorios en la caja electrónica.	101
Figura 62.	Grafica de los modos de vibración del modelo.	107
Figura 63.	Modelo de experimentación fuera de resonancia. a) Oscilogramas de desplazamiento (grados) y velocidad (Rpm/s), y b) Espectros (Vrms/Hz). Sensor 1 y 2.	108
Figura 64.	Modelo de experimentación en su primera resonancia sin excitación. a) Oscilograma de desplazamiento (grados), b) Espectro (Vrms/Hz). Sensor 1 y 2.	111
Figura 65.	Modelo de experimentación en su primera resonancia con excitación. a) Oscilogramas de desplazamiento (grados) y velocidad (Rpm/s), b) Espectros (Vrms/Hz). Sensor 1 y 2.	113

LISTA DE TABLAS

		Pag.
Tabla 1.	Características estáticas de los sensores.	11
Tabla 2.	Características dinámicas de los sensores.	12
Tabla 3.	Comparación entre sensores de posición angular.	27
Tabla 4.	Descripción de los pines del conector serial.	72
Tabla 5.	Descripción de la fuente de alimentación y excitación.	101
Tabla 6.	Modos de vibración del modelo.	106
Tabla 7	Condiciones de operación para las pruebas en el modelo	107

LISTA DE ANEXOS

		Pag.
Anexo A.	Funciones de Bessel de cero y primer orden.	121
Anexo B.	MANUAL LABVIEW 6i	122
Anexo C.	Esquema de jerárquico de la programación del software.	152

NOMENCLATURA

NOTACIÓN

D	Resolución del movimiento angular, rad.
f_c	Frecuencia de la señal portadora, Hz.
f_m	Frecuencia de modulación (VT), Hz.
J_i	Número de Bessel.
N	Velocidad del eje, rpm.
n_i	Número de saturación de pulsos.
N_T	Número de dientes.
T_i	Periodo de un pulso, seg.
Z	Número de marcas u opacos

.

.

LETRAS GRIEGAS

α	Separación entre opacos, grados($^{\circ}$).
β	Índice de modulación.
ϵ	Desplazamiento angular de la vibración torsional, grados($^{\circ}$).
\dot{u}	Velocidad de vibración torsional, grados/s.
\dot{U}	Velocidad angular del eje, rad/s.

RESUMEN

TÍTULO:

SISTEMA DE MONITOREO PARA EL BANCO DE VIBRACIÓN TORSIONAL*

AUTOR:

Leonel Mora Cruz. **

PALABRAS CLAVES:

Medición de Vibración Torsional, Transductores ópticos, Velocidad angular, Maquinas Rotativas, LabVIEW.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es dotar a la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, en especial al laboratorio de vibraciones mecánicas de un sistema de monitoreo que pueda utilizarse como ayuda en el aprendizaje teórico-practico de la asignatura “vibraciones mecánicas”.

La adecuación e implementación de un sistema de transductores ópticos, adquisición de datos y la creación de un nuevo software de monitoreo para el banco de Vibración Torsional, mediante el método digital de alineación de tiempos, mostrando una medición más confiable y precisa; para lo cual se utilizó como lenguaje de programación **LabVIEW 6i**, por su facilidad y rapidez en la programación grafica e implementación de herramientas virtuales que facilitan el análisis y digitalización de los datos adquiridos mediante un entorno de fácil manejo por parte de los usuarios.

De esta manera se contribuye a las investigaciones hechas tiempo atrás, donde no se tenía un análisis de los datos de manera eficiente, real y con el máximo nivel de confiabilidad de lo obtenido. Mejorando mediante herramientas computacionales que agilizan la obtención y procesamiento de los resultados mediante la implementación de transductores ópticos, tarjetas de adquisición de datos y un software especializado como lo es LabVIEW.

Como resultado final se implementara una aplicación amigable, eficiente, actualizable, de bajo costo y capaz de facilitar las tareas de análisis y procesamiento de señales procedentes del banco de vibración torsional; permitiendo al usuario asimilar datos a través de un despliegue gráfico de la información proveniente de las mediciones.

Ayuda también a estudiantes y profesores a entender el fenómeno de la vibración torsional de una forma más sencilla y dinámica del comportamiento de las señales y los cambios que estas sufren al ser sometidas a procesos por los cuales deben pasar para transmitir las eficazmente de un lugar a otro a través de un sistema de monitoreo adecuado para tal efecto.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Alfonso García

SUMMARY

TITLE:

SYSTEM OF MONITOREO FOR TORSIONAL VIBRATION BANK *

AUTHOR:

Leonel Mora Cruz. **

KEY WORDS:

Torsional Vibration Measurement, Optical Transducers, Angular Velocity, Rotating Machines, LabVIEW.

DESCRIPTION:

The objective of this project is to equip the school with Mechanical Engineering of the Industrial University of Santander, in special to the laboratory of mechanical vibrations of a monitoreo system that can be used as it helps in the learning theoretical-practice of the subject "mechanical vibrations".

The adjustment and implementation of a system of optical transducers, data acquisition and the creation of the new software of monitoreo for the bank of Torsional Vibration, by means of the digital method of alignment of times, showing one more a more reliable measurement and needs; for which was used like programming language LabVIEW 6i, by its facility and rapidity in the graphical programming and implementation of virtual tools that facilitate the analysis and digitalization of the data collected by means of surroundings of easy handling on the part of the users.

This way time is contributed back to the done investigations, where an analysis of the data of efficient way was not had, real and with the maximum level of trustworthiness of the obtained thing. Improving by means of computational tools that make agile the obtaining and processing of the results by means of the implementation of optical transducers, cards of data acquisition and specialized software as it is LabVIEW.

As a result final a friendly, efficient application, updateable, was implemented of low cost and able to facilitate the analysis tasks and prosecution of signs coming from the bank of vibration torsional; allowing the user to assimilate data through a graphic unfolding of the information coming from of measurements.

Aid also to students and professors to understand the phenomenon of the torsional vibration of one more a simpler and dynamic form of the behavior of the signals and the changes that these under go the being put under processes by which must happen to effectively transmit them from a place to another one through a system of adapted monitoreo for such effect.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Sciences Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Alfonso Garcia.

INTRODUCCIÓN

En la industria moderna, hay muchas máquinas rotativas. En algunos casos, el fallo de tales máquinas puede causar que la línea de producción se detenga por completo y producir grandes pérdidas para la empresa. Esta situación lleva a un creciente interés en el monitoreo en línea del funcionamiento de la máquina. El estado de funcionamiento de las máquinas rotativas normalmente es descrito por la vibración de los ejes.

Desde el punto de vista cinético, la vibración puede ser clasificada en tres categorías: longitudinal, transversal y vibración torsional. La vibración transversal normalmente se menciona como un factor clave y ha sido intensamente estudiada en muchos sistemas de monitoreo. Actualmente, se cree que un sistema de monitoreo es una parte inseparable en máquinas rotativas a gran escala. En contraste, la vibración torsional no había sido considerada durante mucho tiempo, hasta los años 70's cuando algunos fallos catastróficos propiciaron el surgimiento de la vibración torsional. Desde ese tiempo, muchos informes se han publicado indicando que la vibración torsional era un problema bastante serio en maquinaria rotativa, sobre todo en las máquinas muy grandes, como los generadores de turbinas a vapor, reflejando dicha necesidad.

Desde entonces, muchas investigaciones se han llevado a cabo para desarrollar una técnica de medición de vibración torsional. Como resultado, algunos sistemas de monitoreo en línea de vibración torsional fueron construidos y puestos en funcionamiento. Aplicando esos sistemas de monitoreo de vibración torsional, se pudo encontrar que dicha medición no es para nada fácil de tomar porque no está en dirección del radio del eje sino en dirección tangencial que es completamente diferente de la vibración transversal.

Es por ello que se adecuó e implementó un sistema de transductores ópticos, adquisición de datos y la creación de un nuevo software de monitoreo para el banco de Vibración Torsional, mediante el método digital de alineación de tiempos, demostrando confiabilidad y precisión en la medición; para lo cual se utilizó como lenguaje de programación **LabVIEW 6i**, por su facilidad y rapidez en la programación grafica e implementación de herramientas virtuales que facilitan el análisis y digitalización de los datos adquiridos mediante un entorno de fácil manejo por parte de los usuarios.

El capítulo 1 presenta una descripción general de los sistemas y tipos de señales que existen y la posibilidad de captarlos mediante los diferentes sensores adecuados para cada tipo de señal y forma de aplicación.

El capítulo 2 muestra los sistemas utilizados para la medición de la vibración torsional y al final se deja esbozado la forma de medición utilizada para el correspondiente sistema de monitoreo digital mediante la implementación de un software especializado.

El capítulo 3 muestra en detalle el hardware utilizado para la adquisición y procesamiento de los datos provenientes de los transductores ópticos.

En el capítulo 4 se hace una descripción del software desarrollado donde se muestra los diferentes paneles de control y sus utilidades mediante un ambiente amigable y de fácil manejo para los usuarios del laboratorio.

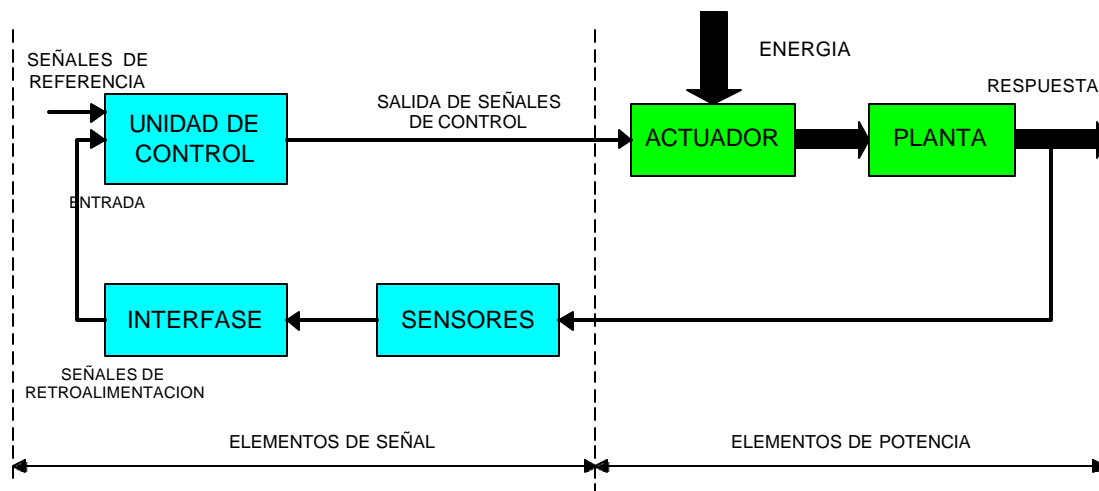
En el capítulo 5 y 6 se explica en detalle la forma de conexión del sistema para evitar fallos y malfuncionamiento en los equipos implementados y se verifica el correcto funcionamiento del sistema.

Además se anexa un manual de LabVIEW 6i como complemento de ayuda del software.

1. GENERALIDADES

El funcionamiento de todo sistema automático se basa en la comparación de la información de mando de las señales de referencia, que describe el programa deseado, con una información del estado de las señales de realimentación, comparación de la que se derivan las señales de control que se dan a los accionamientos que actúan sobre el sistema, modificando su estado. Para tal efecto se requiere de sensores que detecten el comportamiento de dicha planta y de interfaces para adaptar la señal de los sensores a la entrada del sistema de control. El diagrama de bloques es mostrado en la fig. 1. Este tipo de sistemas se denomina de lazo cerrado, por que muestra claramente una estructura con cadena directa y un retorno o retroalimentación, formando un lazo de control.

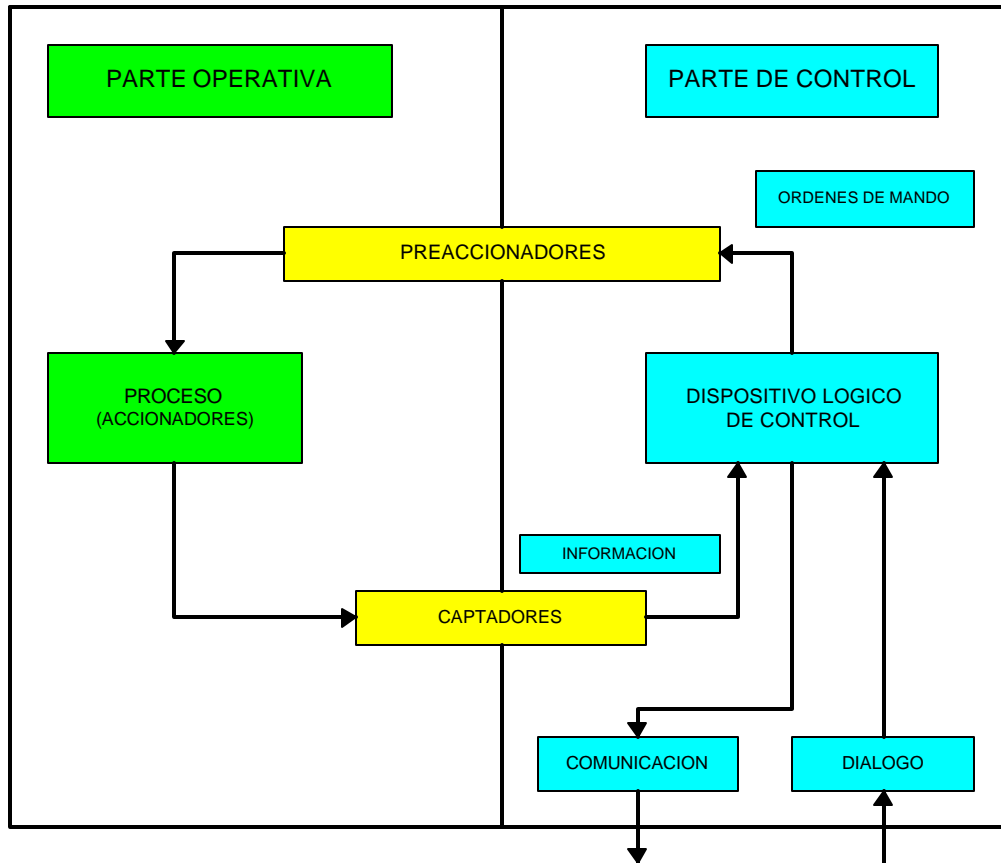
Figura 1. Sistema de control en lazo cerrado.



Un sistema automatizado se clasifica en dos partes plenamente definidas: por un lado la parte Operativa, formada por un conjunto de dispositivos, maquinas o subprocessos, diseñados para determinadas funciones de fabricación. Y la parte de Control o Mando, que es el dispositivo encargado

de realizar la coordinación de las diferentes operaciones encaminadas a mantener la parte operativa bajo control absoluto. Ver fig. 2.

Figura 2. Modelo estructural de un sistema automatizado.



- **Sensores o Captadores:** Son dispositivos encargados de mantener un continuo intercambio de información entre la parte operativa y la parte de control o mando. Dicho intercambio se hace a través de captadores o sensores que captan información de los valores de las magnitudes físicas a controlar, así como de sus cambios de estado, enviando dicha información a la parte de control para su tratamiento. La cadena de realimentación resulta imprescindible en muchos automatismos industriales para poder realizar un control de lazo

cerrado, con las conocidas ventajas en cuanto a cancelación de errores y posibilidades de regulación precisa y rápida.

- **Accionadores o Actuadores:** Son dispositivos que actúan sobre la parte operativa de la planta. La potencia necesaria para actuar sobre los accionamientos suele ser considerable y a veces no puede ser suministrada por la parte de control. En tal caso se requiere de elementos intermedios encargados de interpretar las señales y actuar sobre la parte de potencia. Dichos elementos se denominan preaccionamientos, permiten manejar mayores niveles de potencia, para suministrar la potencia requerida por los accionadores conectados en la parte operativa.
- **Dispositivo de control:** Son los encargados de enviar las señales de salida (señales de control) a los accionamientos de acuerdo a las señales de entrada que recibe (señales de referencia y de realimentación de los sensores) y a un programa previamente establecido por el usuario, para realizar control de las diferentes operaciones encaminadas a mantener la parte operativa, bajo un determinado funcionamiento preestablecido en las especificaciones de diseño.

Las funciones más comunes del dispositivo de control son:

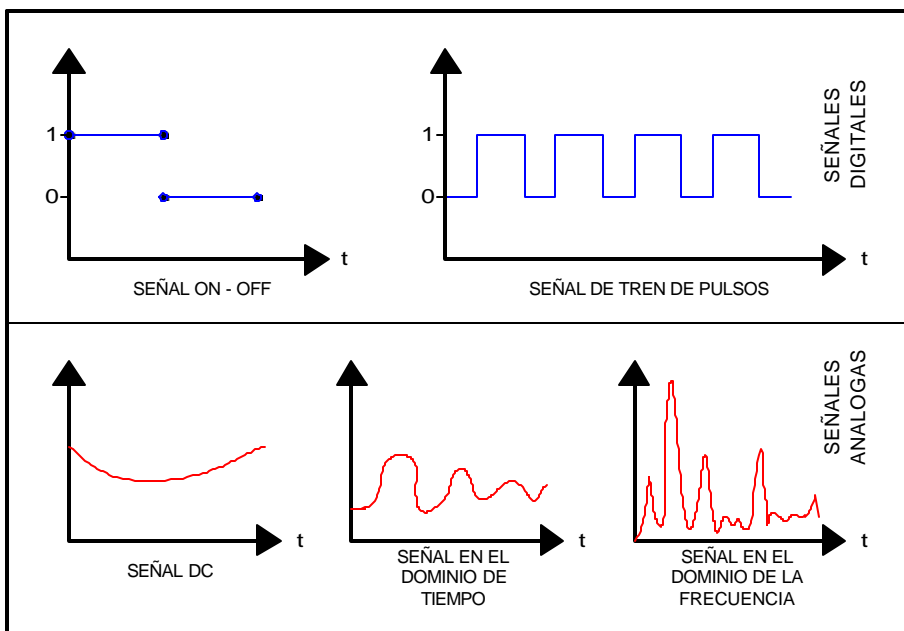
- Gestión de entradas / salidas.
- Tratamiento de ecuaciones lógicas.
- Tratamiento de funciones de seguridad.
- Tratamiento secuencial.
- Funciones de regulación.
- Funciones de cálculo para la optimización.
- Gestión de herramientas.
- Control de calidad.
- Gestión de mantenimiento.
- Operaciones de supervisión: monitoreo y diagnóstico de fallos.
- Seguimiento de la producción.

1.1. TIPOS DE SEÑALES:

Entre el dispositivo de control, sensores y accionamientos, viajan señales que tienen dirección; de esta manera pueden ser entradas, si la información proviene del proceso, pueden ser señales de salida, si son respuestas generadas en el control y tienen como objetivo el proceso.

Las señales según su comportamiento en el tiempo pueden clasificarse como señales digitales y señales analógicas. La señal digital solo maneja dos posiciones, una de nivel alto (1) y otra de nivel bajo (0). La señal analógica tiene una variación continua de su valor en el tiempo, de esta manera toma infinitas posiciones entre dos valores definidos. De acuerdo con la información por el comportamiento en el tiempo, las señales digitales y analógicas tienen subdivisiones. Hay dos tipos de señales digitales: las on-off, y el tren de pulsos (digital no booleana) y tres tipos de señales analógicas: de nivel, de frecuencia y de forma. Ver fig. 3.

Figura 3. Tipos de señales.



1.1.1. ACONDICIONADORES DE SEÑAL O INTERFASES

Su función es adaptar la señal de realimentación de los sensores a las entradas del dispositivo de control, debido a que las señales emitidas por los sensores son generalmente bajas, que al ser llevadas desde el sitio de trabajo al dispositivo de control encargado de procesarlas, se distorsiona el valor medido debido a las interferencias por ruido eléctrico y campos electromagnéticos, generados por máquinas en el interior de la planta. Es por ello que estas señales antes de ser leídas, deben ser preparadas o acondicionadas. Los tipos de acondicionamiento de señal son la amplificación, filtrado, aislamiento, excitación de sensores y linearización.

1.2. SENSORES

Un sensor es un dispositivo que recibe una señal, estímulo y responde a través de una señal eléctrica. Se entiende como estímulo la cantidad, propiedad o condición que es detectada y se transforma en señal eléctrica. Podemos decir, en otras palabras que un sensor es un " traductor" de un valor, generalmente no eléctrico, en un valor eléctrico; esto puede ser canalizado, amplificado y modificado a través de dispositivos electrónicos apropiados. La señal de salida puede presentarse en forma de corriente o carga eléctrica; éstos todavía pueden describirse en términos de amplitud, frecuencia y fase. Tal grupo de características es designado por el formato de la señal de salida.

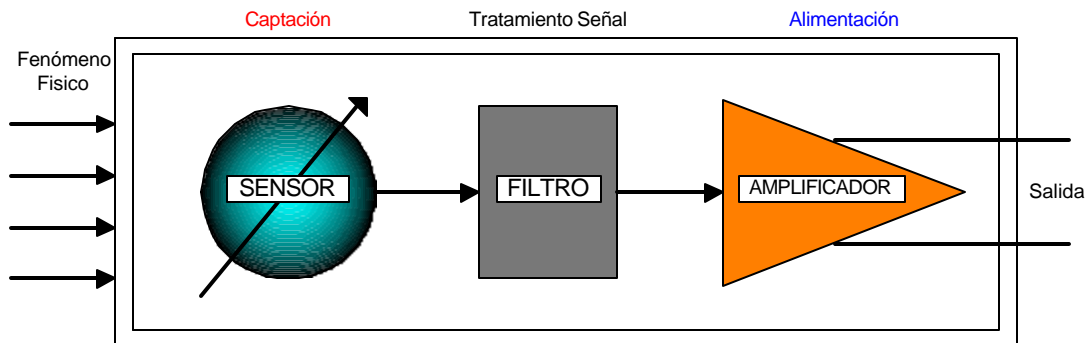
El término sensor no debe confundirse con transductor. Este último convierte un tipo de energía en otro, mientras que el primero transforma cualquier tipo de energía en energía eléctrica. Sin embargo, un sensor puede integrar en su constitución un transductor.

Aunque el término transductor es quizás más amplio, donde se incluye una parte sensible o “captador” y algún tipo de circuito de acondicionamiento de la señal detectada. Para los transductores cuya salida es una señal eléctrica, podemos definirlos como un dispositivo capaz de convertir el valor de una magnitud física en una señal eléctrica codificada, ya sea en forma analógica o digital.

Estos generalmente presentan una estructura como la que muestra la figura 4, en la cual podemos distinguir las siguientes partes:

- **Elemento sensor o captador:** Convierte las variaciones de una magnitud física en variaciones de una magnitud eléctrica o magnética que denominaremos señal.
- **Bloque de tratamiento de señal:** Si existe, suele filtrar, amplificar, linearizar y en general modificar la señal obtenida en el captador, por regla general utilizando circuitos electrónicos.
- **Etapas de salida:** Esta etapa comprende los amplificadores, interruptores, conversores de código, transmisores y en general todas aquellas partes que adaptan la señal a las necesidades de la carga exterior.

Figura 4. Estructura genérica de un transductor



1.2.1. CLASIFICACION

» **Analógicos:** Aquellos que dan como salida un valor de tensión o corriente variable en forma continua dentro del campo de medida. Es frecuente para este tipo de transductores que incluyan una etapa de salida para suministrar señales normalizadas de 0-10 V ó 4-20 mA.

» **Digitales:** Son aquellos que dan como salida una señal codificada en forma de pulsos o en forma de una palabra digital codificada en binario, BCD u otro sistema cualquiera.

» **Todo o nada:** Indican únicamente cuando la variable detectada rebasa un cierto umbral o limite. Pueden considerarse como un caso limite de los sensores digitales en los que se codifican solo dos estados.

Otro criterio de clasificación relacionado con la señal de salida, es el hecho de que el captador requiera o no una alimentación externa adicional para su funcionamiento. En el primer caso se denominan Sensores Pasivos y en segundo caso Activos o Directos.

Los sensores pasivos se basan, en la modificación de la impedancia eléctrica o magnética de un material bajo condiciones físicas o químicas (resistencia, capacidad, inductancia, etc). Este tipo de sensores, debidamente alimentado, provoca cambios de tensión o de corriente en un circuito, los cuales son recogidos por el circuito de interfaz como en un termopar o en un sensor piezoeléctrico.

Los sensores activos son generadores eléctricos generalmente de pequeña señal. Por ello no necesitan alimentación externa para funcionar, aunque suelen necesitarla para amplificar la débil señal del captador.

1.2.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SENSORES

El comportamiento de un sistema en lazo cerrado depende directamente de los transductores e interfaces empleadas en el lazo de realimentación. Aparte de las características de construcción de lazos de control y de las características particulares de construcción de cada transductor o de cada sistema de medida previsto como lazo de retroalimentación, es importante conocer y ver diversos aspectos genéricos de su comportamiento a fin de prever o corregir la actuación tanto estática como dinámica del lazo de control.

El transductor ideal sería aquel en el que la relación entre la magnitud de salida y la variable de entrada fuese puramente proporcional y de respuesta instantánea e inmediata para todos los elementos de un mismo tipo. Sin embargo la respuesta real de los transductores no es del todo lineal, tiene un campo limitado de validez, suele estar afectada por perturbaciones del entorno exterior y tiene un cierto retardo en la respuesta, por estas razones la relación salida/entrada debe expresarse por curva o una familia de curvas para transductores de un tipo y modelo.

1.2.2.1. Características Estáticas

Describen la actuación del sensor en régimen permanente o con cambios muy lentos de la variable a medir.

Tabla 1. Características estáticas de los sensores.

PROPIEDAD	FUNCIÓN
CAMPO DE MEDIDA	Rango de valores con magnitud de entrada comprendido entre el máximo y mínimo detectables por un sensor, con tolerancia de error aceptable.
RESOLUCIÓN	Capacidad del sensor para comprender entre valores muy próximos a la variable entrada. Es la mínima diferencia entre dos valores próximos que el sensor es capaz de distinguir. Se indica en términos de valor absoluto de la variable medida o en porcentaje respecto al fondo de escala a la salida.
PRECISIÓN	Define la máxima variación entre la salida real obtenida de un sensor en determinadas condiciones de entorno y el valor teórico de dicha salida de correspondencia, en idénticas condiciones, según modelo inicial (patrón). Se indica en valor absoluto o (%) respecto al fondo de escala de la salida.
REPETIBILIDAD	Indica la máxima desviación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces un mismo valor de entrada, con el mismo sensor y en idénticas condiciones ambientales.
LINEALIDAD	Un transductor es lineal, si existe una constante de proporcionalidad única que relaciona los incrementos de señal de entrada, en todo el campo de medida. La no-linealidad es la máxima desviación entre la respuesta real y la característica puramente lineal, referida al fondo de la escala.
SENSIBILIDAD	Indica la menor o mayor variación de la salida por unidad de la magnitud de entrada. Un sensor es tanto más sensible cuanto mayor sea la variación de la salida producida por una determinada variación de entrada; y esta definida como: $Sensibilidad = \frac{\Delta magnitud - Salida}{\Delta magnitud - Entrada}$
RUIDO	Perturbación aleatoria del propio transductor o del sistema de medida, que produce una desviación de la salida con respecto al valor teórico.
HISTÉRESIS	Es cuando la igualdad de la magnitud de entrada, a la salida depende de si dicha entrada se alcanza con aumentos en sentido creciente o decreciente. Se da en valor absoluto de la variable física o (%) sobre el fondo de escala. En sensores todo o nada, es la diferencia entre el valor de entrada que provoca el basculamiento de 0 a 1 y aquel que provoca el inverso de 1 a 0.

1.2.2.2. Características Dinámicas

Describen la actuación del sensor en régimen transitorio a base de dar su respuesta temporal ante determinados estímulos estándar o a base de identificar el comportamiento del transductor con sistemas estándar, e indicar la constantes de tiempo relevantes.

La mayor parte de los transductores tienen un comportamiento dinámico que se puede asimilar a un sistema de primer y segundo orden, es decir, con una o como máximo dos constantes de tiempo dominantes. Los sistemas que responden a modelos de segundo orden suelen ser sistemas sobre amortiguados, es decir sistemas en los que no hay rebosamiento en la respuesta a una señal escalón.

Tabla 2. Características dinámicas de los sensores.

PROPIEDAD		FUNCIÓN
VELOCIDAD DE RESPUESTA	Tiempo de Retardo	Tiempo transcurrido desde la aplicación del escalón de entrada hasta que la salida alcanza el 10% de su valor permanente.
	Tiempo de Subida	Tiempo transcurrido desde que la salida alcanza el 10% de su valor permanente hasta que llega por primera vez al 90% de dicho valor.
	Tiempo Establecimiento al 99%	Tiempo transcurrido desde la aplicación de un escalón de entrada hasta que la respuesta alcanza el régimen permanente, con una tolerancia del 1%.
	Constante de Tiempo	Para un transductor con respuesta de primer orden se puede determinar la constante de tiempo a base de medir el tiempo empleado para alcanzar el 63% de su valor de régimen permanente, cuando a la entrada se aplica un cambio de escalón.
RESPUESTA FRECUENCIAL		Relación entre la sensibilidad y la frecuencia cuando la entrada es una excitación senoidal. Se suele indicar gráficamente mediante un gráfico de bode.
ESTABILIDAD Y DERIVAS		Características que indican la desviación de salida del sensor al variar ciertos parámetros distintos del que se pretende medir, tales como condiciones ambientales, alimentación u otras perturbaciones.

1.3. TRANSDUCTORES DE POSICIÓN

Los transductores de posición permiten medir la distancia de un objeto respecto a un punto o ejes de referencia o simplemente detectar la presencia de un objeto a una cierta distancia. Precisamente su capacidad de medida o solo indicación de presencia y la capacidad de medir distancias más o menos grandes permiten establecer una división:

- *Detectores de presencia o proximidad*: Son sensores de posición todo o nada que entrega una señal binaria que informa la existencia o no de un objeto ante el detector, el más elemental es el interruptor final de carrera por contacto mecánico.
- *Medidores de distancia o posición*: Entregan una señal analógica o digital que permite determinar la posición lineal o angular respecto a un punto o eje de referencia.
- *Transductores de pequeña deformación*: Son sensores de posición especialmente diseñados para detectar pequeñas deformaciones o movimientos. Muchas veces se emplean adosados a piezas elásticas o con palpadores como transductores indirectos de fuerza o de par.

1.3.1. DETECTORES DE PROXIMIDAD

Por lo general se trata de sensores con respuesta todo o nada, con una cierta histéresis en la distancia de dirección y con salida a base de interruptor estático (transistor, tristor o triac), pudiendo actuar como interruptores de CC o CA.

1.3.1.1. Sensores inductivos

Sirven para la detección de la posición de piezas metálicas en un rango de distancias desde 1mm a 30mm, con resolución alrededor de una décima de milímetro.

- Forma A cilíndrica roscada con diámetro normalizado M8, M12, M18, M30. Existen además otros tipos sin rosca con tamaños de diámetro 4 y 8mm.
- Forma C de paralelepípedo con cabezal orientable. Generalmente son utilizadas para grandes distancias.

Figura 5. Tipos de sensores inductivos.



1.3.1.2. Sensores capacitivos

Las características y principio de funcionamiento son análogos a las descritas para los detectores inductivos, pero el elemento sensible es el condensador del circuito oscilante, formado por dos aros metálicos concéntricos situados en la cara sensible y cuyo dieléctrico es el material de la zona sensible.

Figura 6. Tipos de sensores capacitivos.

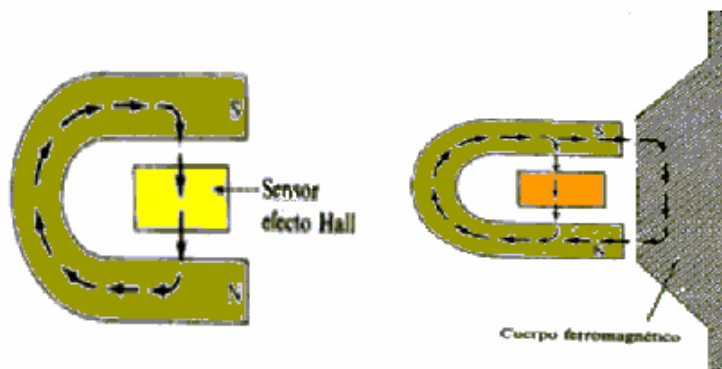


Este tipo de sensor permite detectar materiales metálicos o no, como materiales sólidos y líquidos pero su sensibilidad se ve afectada por el tipo de material y por el grado de humedad ambiental y el cuerpo a detectar.

1.3.1.3. Sensores de efecto hall

El efecto Hall relaciona la tensión entre dos puntos de un material conductor o semiconductor con un campo magnético a través del material. Cuando se utilizan por sí mismos, los sensores de efecto Hall sólo pueden detectar objetos magnetizados. Sin embargo, cuando se emplean en conjunción con un imán permanente en la configuración tal como la indicada en la figura, son capaces de detectar todos los materiales ferromagnéticos. Cuando se utilizan de dicha manera, un dispositivo de efecto Hall detecta un campo magnético intenso en ausencia de un material ferromagnético en el campo cercano.

Figura 7. Sensor de efecto Hall.



Cuando dicho material se lleva a la proximidad del dispositivo, el campo magnético se debilita en el sensor debido a la curvatura de las líneas del campo a través del material.

Los sensores de efecto Hall están basados en el principio de una fuerza de Lorentz que actúa sobre una partícula cargada que se desplaza a través de un campo magnético, dicha fuerza actúa sobre un eje perpendicular al plano establecido por la dirección de movimiento de la partícula cargada y la dirección del campo.

1.3.1.4. Sensores ópticos Emplean fotocélulas como elementos de detección. Algunos tipos disponen de un cabezal que incorpora un emisor de luz y la fotocélula de detección, actuando por reflexión y detección del haz de luz reflejado sobre el objeto que se pretende detectar. Otros trabajan a manera de barrera y están previstos para detección a mayores distancias con fuentes luminosas independientes del cabezal detector. Ambos tipos suelen funcionar con frecuencias luminosas en la gama de los infrarrojos.

Las características particulares de los detectores de proximidad ópticos respecto a los otros de proximidad son:

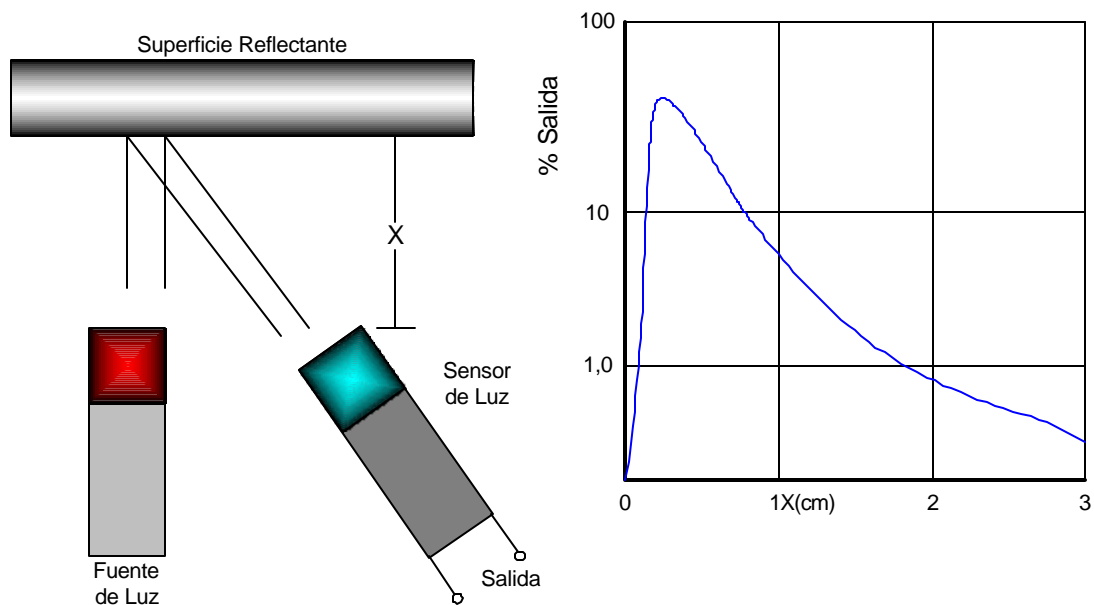
- Elevada inmunidad a perturbaciones electromagnéticas externas.
- Distancia de detección es grande respecto de los inductivos y los capacitivos. Se obtienen fácilmente hasta 500m en el modo barrera y hasta 5m por reflexión.
- Alta velocidad de respuesta y frecuencia de conmutación.
- Permite la identificación de colores.
- Capaces de detectar objetos del tamaño de décimas de milímetro.

Existen algunas variantes de detectores ópticos previstas para aplicaciones especiales. Por ejemplo para ambientes luminosos se emplean barreras ópticas basadas en detección de luz polarizada. Otra variante son los de

fibra óptica, que tiene los puntos de emisión/recepción de luz, separados de la unidad generadora y unida a ella mediante la fibra. Tienen distancia de detección de 3mm hasta 10m, pudiendo detectar objetos muy pequeños como marca de 1mm sobre piezas que se mueven a gran velocidad (30m/s), u objetos estáticos de hasta 20 micras de diámetro.

También existen variantes de detectores ópticos con salidas análogas, que aun pueden tener problemas de repetibilidad frente a cambios de iluminación ambiental, ambientes polvorientos, etc, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Sensores Ópticos de salida análoga.



1.3.1.5. Sensores ultrasónicos

Se basan en la emisión-recepción de ondas ultrasónicas. Cuando un objeto interrumpe el haz, el nivel de recepción varía y el receptor lo detecta.

Como ventaja a las fotocélulas los detectores ultrasónicos pueden detectar fácilmente objetos transparentes, como cristal y plásticos, materiales que ofrecen dificultad para la detección óptica. Sin embargo y dado que los detectores utilizan ondas ultrasónicas que se desplazan por el aire no

podrían ser utilizados en lugares donde este circule con violencia (bocas de aire acondicionado, cercanía de puertas, etc.) o en medios de elevada contaminación acústica (prensas, choques entre metales, etc.), por lo demás y en cuanto a características de funcionamiento estos detectores son similares a las células fotoeléctricas.

Figura 9. Tipos de sensores ultrasónicos.



1.3.2. MEDIDORES DE POSICIÓN O DISTANCIA

Los transductores de posición los podemos distinguir en dos grandes grupos:

- Los indicadores de posición lineal o angular para grandes distancias, conocidos también como sistemas de medición de coordenadas.
- Los detectores de pequeñas deformaciones o detectores de presencia de objetos a una cierta distancia que dan una señal analógica o digital proporcional a dicha distancia.

Los medidores de coordenadas se utilizan por lo general, para determinar la posición relativa de partes móviles de un maquina. Se trata de transductores de desplazamiento relativo previstos de para medición indirecta de distancias, se dice medición indirecta por cuanto no permite determinar la distancia entre objetos estáticos, sino la posición relativa de un objeto con respecto a un origen de desplazamiento. Su característica esencial es que

permite medir grandes distancias con una excelente resolución y se usan, sobre todo en el campo de la robótica y la maquina herramienta. Se pueden distinguir dos tipos: absolutos e incrementales.

Los primeros dan en todo momento una indicación de la posición respecto a un origen, incluso en caso de perdida de alimentación. Los incrementales en cambio, detectan desplazamiento y obtienen la posición final a base de acumular dichos desplazamientos respecto a un origen.

1.3.2.1. Potenciómetro

Es un detector de posición angular, de tipo absoluto y con salida análoga. Consiste en una resistencia de hilo bobinado o en una pista de material conductor, distribuido a lo largo de un soporte en forma de arco y un cursor solidario a un eje de salida, que puede deslizar sobre dicho conductor, figura 10. El movimiento del eje arrastra el cursor provocando cambios de resistencia entre éste y cualquiera de los extremos. Así cuando se alimenta entre los extremos de la resistencia con una tensión constante, aparece en la toma de medida y un extremo una tensión proporcional al ángulo girado a partir del origen.

Figura 10. Potenciómetro



Existen también potenciómetros con carrera lineal, pero lo más frecuente, cuando se usan como detectores de posición, es utilizar los rotativos con o sin topes y de una o más vueltas. Para el caso de los segundos, el ángulo comprendido entre los extremos de la resistencia se denominan ángulos de

giro eléctrico y suele ser algo menor que el ángulo de giro mecánico entre topes.

1.3.2.2. Encoders

Son dispositivos formados por un rotor con uno o varios grupos de bandas opacas y traslúcidas alternadas y por una serie de captadores ópticos alejados en el estator, que detectan la presencia o no de la banda opaca frente a ellos. Existen dos tipos de encoder: los incrementales y los absolutos.

Los primeros dan un determinado número de impulsos por vueltas y requieren de un contador para determinar la posición a partir de un origen de referencia. Los absolutos, en cambio, disponen de varias bandas en el rotor ordenadas según un código binario. Los captadores ópticos detectan, pues, un código digital completo que es único para cada posición de rotor.

➤ Encoders Incrementales o Relativos.

Un encoder incremental consiste de una regla lineal o de un disco, movido por la parte cuya posición o velocidad va a ser determinada. Está constituido por diferentes regiones o sectores, cada uno de los cuales con una propiedad que los distingue. Estos están ordenados de manera alternada y equidistante. Las propiedades físicas que se usan para diferenciar entre un sector y otro pueden ser magnéticas, eléctricas u ópticas; cualquiera que sea el caso la salida básica obtenida es en forma de un tren de pulsos. El número de graduaciones determina la resolución por vuelta del encoder.

El dispositivo de lectura "testea" esta propiedad cambiante y transforma un incremento en posición en un cambio de salida.

Este tipo de encoders se emplean en un gran número de aplicaciones dada su simplicidad y "economía". Por otro lado las principales limitaciones con las que cuenta serían:

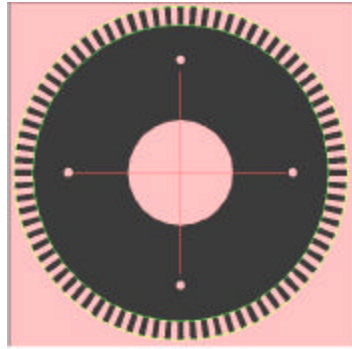
- La información acerca de la posición se pierde cuando la alimentación al sistema falla ó cuando es desconectado y cuando hay fuertes perturbaciones.
- Siempre es necesario un circuito contador para obtener una salida digital compatible con el puerto de entrada/salida de una computadora. Otra posible forma de hacerlo se basaría en software (alguna interrupción o programación de alta velocidad, tiempo real, para obtener el tiempo de cambio entre un sector y otro) especial según sea la aplicación específica.
- No es posible obtener la dirección del movimiento a menos que se le agregue un elemento adicional.

El modelo de encoders más utilizado son los *ópticos*. Estos constan de diferentes sectores que pueden ser opacos y transparentes, reflectivos y no reflectivos, y otros en interrupciones creadas por medio de perforaciones en un disco de lámina de metal muy delgada u otro material (acetato y acrílico para este caso). Las fuentes de error son minimizadas por el ASIC óptico. Otro tipo también muy usados son los magnéticos. Están equipados con un sistema de detección magnética sin contacto. La variación de campo magnético provocada por los dientes de una rueda de medida produce una onda de tensión senoidal. La electrónica del encoder transforma esta señal senoidal en una señal de onda cuadrada, triangular... A pesar de no ser los más usados presentan ventajas sobre los ópticos:

- Altamente resistentes al polvo, los golpes o las vibraciones.
- Funcionamiento en un amplio rango de temperaturas: -20°C a 85°C.

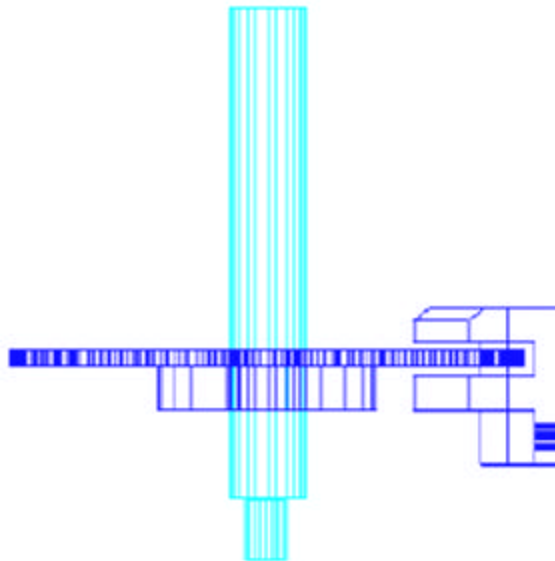
El funcionamiento para cualquiera de estos casos es el mismo. Se implementa mediante un disco delgado metálico con una serie de franjas equidistantes y homogéneas, por ejemplo con la forma de disco dentado fig. 11, que se acopla directamente al eje del motor fig 12.

Figura 11. Disco óptico dentado.



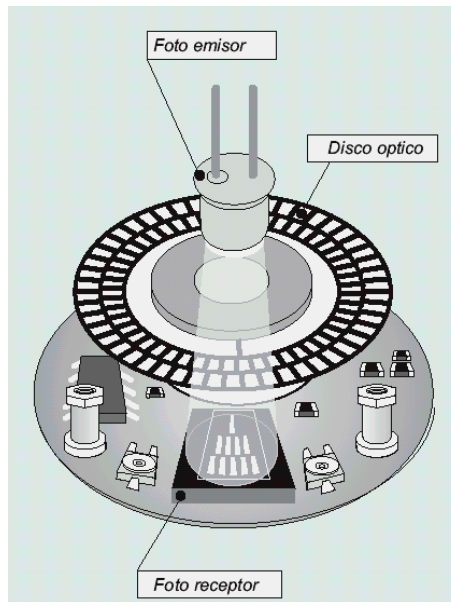
Este gira dentro de un switch óptico, que deja pasar e interrumpe un haz de luz infrarroja, ver fig. 13. Este haz de luz está suministrado por el led infrarrojo de la cabeza lectora fija. El sistema se completa con un fotodetector (LDR, celda fotoeléctrica o fototransistor).

Figura 12. Disposición del transductor óptico sobre el disco acoplado al eje.



El switch optoelectrónico está formado por un par de dispositivos, un emisor y un receptor de luz infrarroja, colocados en un paquete plástico uno frente a otro con una ranura entre ellos por donde gira libremente el disco dentado montado en el eje de la rueda. Ver *figura 13*.

Figura 13. Partes del transductor óptico.



El dispositivo receptor de luz de este paquete es un fototransistor con salida *Darlington* que está acoplado con un circuito formado por un inversor como buffer y enseguida de este un flip-flop S-R básico, hecho con "Nands", para evitar los rebotes, con lo que se obtiene a la salida un tren de pulsos eléctricos cuando gira el eje del motor.

Entre los principales campos de aplicación de estos transductores podríamos citar:

- Ejes CNC.
- Máquinas de empaquetamiento.
- Maquinas herramienta.
- Máquinas de inyección.
- Máquinas de corte.
- Maquinaria textil.
- Sistemas de motores.
- Robots.
- Aparatos de medición y control.

Figura 14. Campos de aplicación de los encoders.



▣ Principio de Funcionamiento

El encoder es un transductor rotativo que transforma un movimiento angular en una serie de impulsos digitales. Estos impulsos generados pueden ser utilizados para controlar los desplazamientos de tipo angular o de tipo lineal, si se asocian a cremalleras o a husillos.

Las señales eléctricas de rotación pueden ser elaboradas mediante controles numéricos (CNC), controladores lógicos programables (PLC), sistemas de control (tarjetas de adquisición de datos DAC), etc.

En los encoders incrementales, la detección del movimiento se ejecuta en base al principio de exploración fotoeléctrica. El sistema de lectura se basa en la rotación de un disco graduado con un reticulado radial formado por franjas opacas, alternadas con espacios transparentes. Este conjunto está iluminado de modo perpendicular por una fuente de rayos infrarrojos como se muestra en la figura 13. El disco proyecta de este modo su imagen sobre la superficie de varios receptores oportunamente enmascarados por otro reticulado que tiene el mismo paso del anterior llamado colimador. Los receptores tienen la tarea de detectar las variaciones de luz que se producen con el desplazamiento del disco convirtiéndolas en las correspondientes variaciones eléctricas.

La señal eléctrica detectada, para generar pulsos correctamente cuadrados y sin interferencias, debe ser procesada electrónicamente. Para incrementar la calidad y estabilidad de las señales, el sistema de lectura se efectúa

generalmente de manera diferencial, comparando dos señales casi idénticas, pero desfasados en 180° eléctricos. Su lectura se efectúa en base a la diferencia de las dos señales, eliminando de este modo las interferencias definidas “de modo común” porque están superpuestas de igual manera en toda forma de onda. Los encoders ópticos son dispositivos digitales, que usan LEDs como transmisores y receptores.

➤ **Encoders Absolutos**

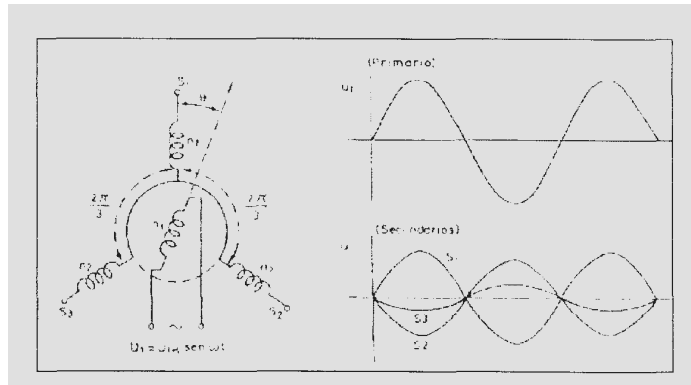
El funcionamiento básico de los **encoders absolutos** es similar al de los incrementales. Se tiene una fuente de luz con las lentes de adaptación correspondientes, un disco graduado y unos fotorreceptores. En este caso, el disco transparente se divide en un número determinado de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos según un código binario cíclico (normalmente código de Gray) que queda representado por zonas transparentes y opacas dispuestas radialmente. No es necesario ahora ningún contador o electrónica adicional para detectar el sentido del giro, pues cada posición (sector) es codificado de forma absoluta. Su resolución es fija, y vendrá dada por el número de anillos que posea el disco graduado. Las resoluciones habituales van desde 2^8 a 2^{19} bits (desde 256 a 524288 posiciones distintas).

1.3.2.3. Sincros

El sincro es una forma de transductor rotativo parecido a un pequeño motor de corriente alterna, empleado mucho como elemento de medición y control en que intervienen flechas rotativas o resumiendo se trata de un transformador con uno de sus devanados rotativo.

La bobina primaria está integrada en el rotor y se acopla magnéticamente a las bobinas secundarias en el estator. La conexión con las terminales externas es por medio de anillos con escobillas de conexión.

Figura 15. Principio de funcionamiento de un sincro.



El sincro normalmente tiene tres devanados secundarios separados 120° entre sí para dar corriente de voltaje variable mientras gira el devanado primario (fig. 15). El voltaje que energiza al rotor es un voltaje de referencia de corriente alterna a 50 Hz (o 400 Hz) y éste induce voltajes a través de cada bobina de estator, que dependen del ángulo instantáneo entre los ejes de las bobinas del rotor y el estator. El voltaje que atraviesa cualquier par de terminales de terminales del estator es, por lo tanto, la suma o diferencia, dependiendo de la fase, de los voltajes de las bobinas del estator.

Si en algún instante el ángulo de la flecha del sincro es θ y el voltaje de referencia del rotor es $V \sin \omega t$, los voltajes de la terminal del estator son:

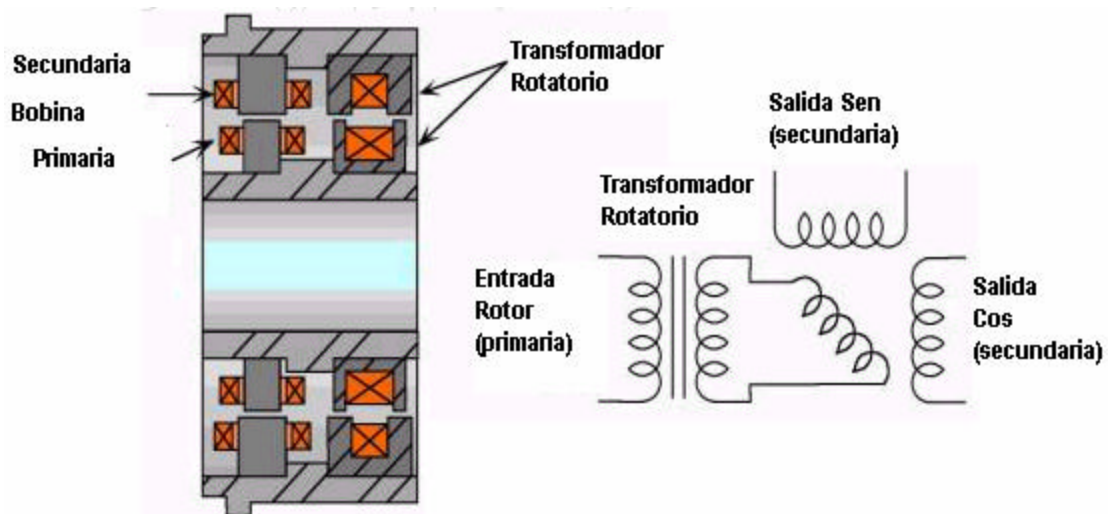
$$\begin{aligned}
 S_{1-3} &= V \sin \omega t \cos \theta \\
 S_{3-2} &= V \sin \omega t \sin(\theta + 120^\circ) \\
 S_{2-1} &= V \sin \omega t \sin(\theta + 240^\circ)
 \end{aligned}
 \quad \text{Voltajes de formato del sincro.}$$

1.3.2.4. Resolvers

El resolver (ver figura) es un transformador rotatorio, compuesto por un rotor con la primera bobina, y dos pares de espirales estatores como segunda bobina, estas últimas con una desviación de 90° eléctricos entre ellas. De esta manera se generan dos ondas de salida, una curva de seno para la primera bobina y una de coseno para la segunda. En todo momento, la posición del rotor genera un voltaje específico en relación a las dos bobinas. La información recogida es procesada en forma simultánea, permitiendo la

identificación de la posición absoluta del rotor. La dirección y velocidad de rotación pueden ser determinadas también por el análisis de las ondas obtenidas.

Figura 16. Esquema de un resolver tradicional.



Dentro de las ventajas del resolver se incluyen la fiabilidad y bajo ruido con un rango de señales de salida de 0-120 volts, la información de velocidad y una buena resistencia a las vibraciones. Entre sus desventajas es que son sistemas analógicos que funcionan a voltajes más altos, tamaño, cambios térmicos de impedancia y alto costo de los equipos de conversión análogo-digital. Estos aparatos se comportan igual que los encoders absolutos para determinar posiciones absolutas, también requieren de un tren de engranajes para el posicionamiento absoluto constante.

Tabla 3. Comparación entre sensores de posición angular.

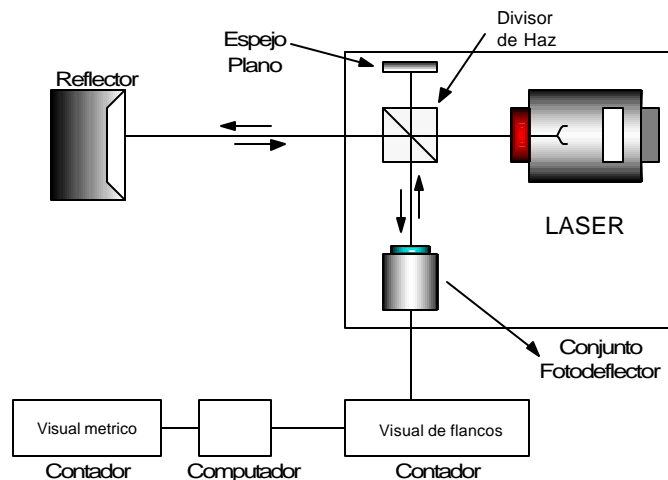
SENSOR	ROBUSTEZ MECANICA	RANGO DINAMICO	RESOLUCION	ESTABILIDAD TERMICA
ENCODER	mala	media	buenas	buenas
RESOLVER	buenas	buenas	buenas	buenas
POTENCIOMETRO	regular	mala	mala	mala

1.3.2.5. Sensores Láser

Se pueden utilizar como detectores de distancias, mediante técnicas de reflexión y triangulación parecidas a las de los otros detectores ópticos, permiten también su utilización como detectores de desplazamientos por análisis de interferencias en la emisión recepción de un mismo rayo (interferómetro láser).

En este último caso la medición se hace contando crestas y valles en la interferencia y por lo tanto por un principio similar al del encoder incremental. El principio de funcionamiento del interferómetro láser se basa en la superposición de dos ondas de igual frecuencia, una directa y una reflejada. Si las ondas están en fase, la superposición es positiva y si esta en contratase, sustractiva. La onda resultante de la superposición pasa por valores máximos y mínimos al variar la fase de la señal reflejada.

Figura 17. Interferómetro Láser.



Los sensores industriales basados en este principio generan un haz de luz que se divide en dos partes octogonales mediante un separador. Un haz se aplica directamente sobre un espejo plano fijo, mientras en el otro se refleja el objeto cuya distancia se quiere determinar. Los dos haces se superponen

de nuevo en el separador, de forma que al desplazarse los objetos a detectar se generan máximos y mínimos de amplitud a cada múltiplo de la longitud de onda del haz. El desplazamiento o diferencia relativa de posiciones, se determina contando dichas oscilaciones o franjas, obteniéndose una salida digital de elevada precisión con resoluciones del orden de longitud de onda de la luz empleada (50µm sensor industrial).

1.3.2.6. Sensores ultrasónicos

Estos emiten una señal de precisión hacia el objeto cuya distancia se pretende medir y mide el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso hasta la recepción del eco reflejado en dicho objeto. El más conocido es el “sonar” que incorporan los submarinos y actualmente los sistemas de ecografía o incluso en el medio natural la forma de detectar obstáculos en la oscuridad por parte de los murciélagos.

En el campo industrial se suelen emplear para controlar niveles de sólidos o áridos en silos, presencia de obstáculos en el campo de la robótica, etc. Las frecuencias de la perturbación emitida esta en el rango de 20 a 40Khz.

1.3.2.7. Sensores magnetoresistivos

Se basan también en la detección del eco de un impulso ultrasónico, generado por la deformación elástica que se produce en algunos materiales, bajo el efecto de un campo magnético.

Consisten básicamente de una varilla de material magnético en la que se genera una perturbación ultrasónica mediante una bobina inductora. Sobre la varilla se coloca un imán móvil que puede deslizarse. El imán provoca un cambio de permeabilidad del medio y esto provoca una reflexión de la onda ultrasónica, pudiéndose detectar la distancia al imán por el tiempo transcurrido en recibir el eco.

2. MEDICIÓN DE VIBRACIÓN TORSIONAL

Para la mayoría de la maquinaria rotativa a gran escala, la vibración torsional es uno de factores más importantes que afecta con seguridad su funcionamiento y es un asunto que debe ser de gran preocupación para todos los usuarios de turbomáquinas. Por tal razón, la vibración torsional es la causa principal de fallas en trenes de conducción en turbomáquinas, donde algunos de los efectos típicos de la vibración torsional descontrolada origina fallas en los acoples, ejes rotos, engranajes desgastados y la más común la rotura de dientes de engranajes.

La criticidad para realizar este tipo de análisis se eleva siempre que el sistema sea conducido por motores síncronos AC, ya que son una de las fuentes más notorias de problemas de vibración torsional debido a las pulsaciones del torque que estos producen durante el arranque. Las magnitudes de estas pulsaciones son normalmente sustanciales y los esfuerzos del eje resultantes son a menudo inferiores a los límites de resistencia de los materiales que hacen los ejes susceptibles a la fatiga.

Actualmente la vibración torsional no es una medición comúnmente realizada para el diagnóstico de turbomáquinaria o para un programa de mantenimiento general. Una razón es que la medición de vibración torsional es una labor difícil para hacer durante el funcionamiento de la maquina.

En contraste con el gran y completo número de sistemas de instrumentación que pueden comprarse para medir vibraciones laterales en maquinaria rotativa, sólo unos sistemas están disponibles comercialmente para la medición de vibración torsional

La mayoría de los sistemas disponibles comercialmente para la medición de vibración torsional requieren modificaciones significativas en las máquinas; que pueden ser inaceptables por razones de seguridad, confiabilidad y costo; o presentan limitaciones de aplicación o desempeño.

Un problema mayor en la medición de la vibración torsional es la dificultad para adquirir la señal correcta desde los ejes. Las técnicas de medición torsional pueden ser a través del monitoreo directo del eje o utilizando una instrumentación específica para medir la deformación del eje; según la manera de obtener las señales, dichos métodos de medición pueden ser clasificados en dos tipos de técnicas, sobre eje (por contacto) y sin contacto; donde las señales generadas pueden mandarse a través de radio o por transmisión óptica. A continuación se presentan los diversos sistemas existentes actualmente para la medición de vibración torsional.

2.1. GALGAS EXTENSIOMETRICAS (*STRAIN GAGES*)

El método más antiguo y probablemente el más ampliamente conocido para medición de vibración torsional utiliza galgas extensiometricas unidas a la superficie del eje y orientadas a lo largo de la dirección del esfuerzo principal.

Alternativamente, secciones de ejes prefabricados y precalibrados son comercialmente disponibles con galgas extensiometricas preinstaladas con juegos de anillos de deslizamiento o con la instalación de una antena de radiotelemetría. Estos dispositivos son significativos al reemplazar alguna sección existente del eje o acople del eje, en la máquina. Sin embargo, colocar tales dispositivos en una máquina plantea dudas de una posible pérdida de confiabilidad o seguridad de la máquina lo que conlleva a las siguientes desventajas prácticas:

- La señal debe transferirse del eje rotativo a un marco sin rotación, ya sea por el uso de anillos de deslizamiento o por radiotelemetría. Debido a que en la planta se presenta radio interferencia o ambientes contaminados que pueden producir bajas proporciones de ruido en la señal que afectarán la lectura de la vibración.
- El elemento que une a la galga puede ser deteriorado por condiciones ambientales, como humedad o agentes corrosivos del proceso.
- El montaje inadecuado de la galga pueden producir señales relacionadas con la flexión del eje en lugar de la torsión.

El principio básico de funcionamiento de una galga extensiométrica se basa en la variación de la resistencia eléctrica que ciertos metales exhiben ante un cambio originado por la deformación de su estructura física. Dicha variación se presenta de forma lineal según la ley de Hooke y dentro de los límites térmicos y mecánicos para los que fue diseñada la galga.

Como se muestra en la figura 18, el elemento activo de una galga es su rejilla de medición.

El factor de calibración de la galga, normalmente llamado "factor de galga", relaciona la proporción del cambio en su resistencia eléctrica con el esfuerzo medido, según la siguiente ecuación:

$$GF = \frac{(\Delta R / R_{nom})}{(\Delta L / L)} \quad (2.1)$$

donde:

ΔR = Cambio en resistencia de la rejilla (Ω)

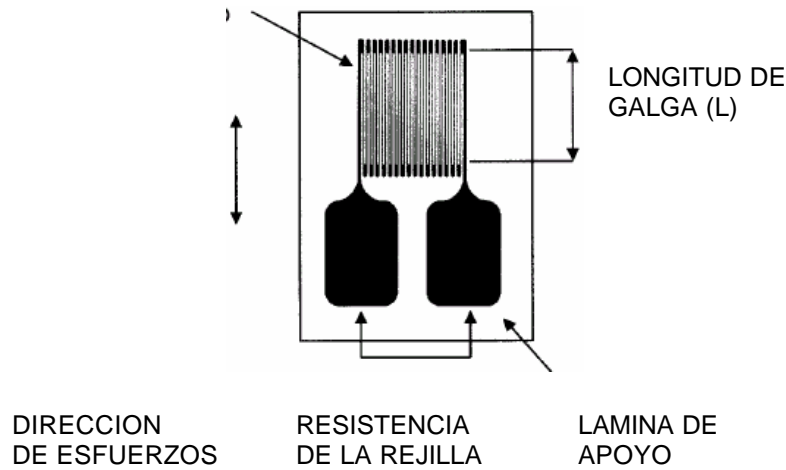
R_{nom} = Resistencia nominal de la rejilla (Ω)

ΔL = Cambio en la longitud de la rejilla (pulg.)

L = longitud nominal de la rejilla o "longitud de galga" (pulg.)

Figura 18. Elementos Básicos de una galga extensométrica (SG).

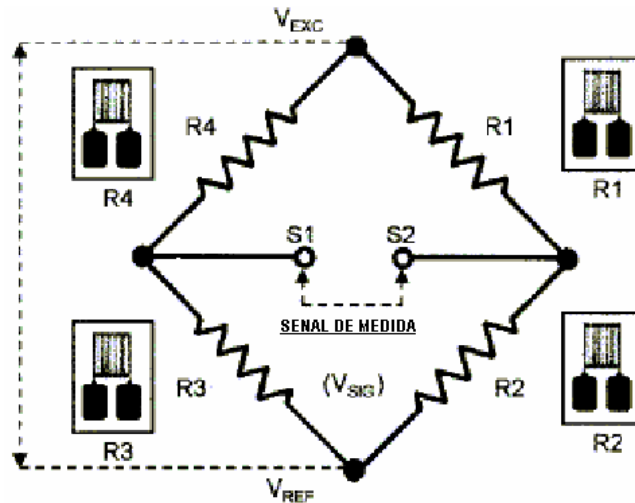
REJILLA DE SENSADO



Cuando se aplica tensión a una galga, su resistencia eléctrica aumenta debido a dos efectos. El primero es que el alargamiento del tensor aumenta la longitud eficaz de la galga. El segundo es que el efecto Poisson causa en el conductor un descenso de cuello, reduciendo su área de sección transversal. Debido a que la resistencia es directamente proporcional a longitud e inversamente proporcional al área de sección transversal, en ambos de estos fenómenos se produce un aumento en la resistencia.

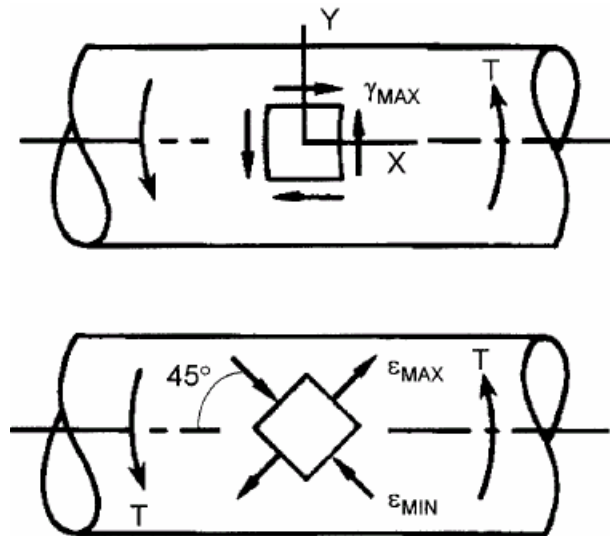
Para facilitar la medición de vibración torsional demandada por cambios pequeños en resistencia, se configuran típicamente eléctricamente galgas en lo que es normalmente conocido como un circuito Puente de Wheatstone completo, unido a la superficie del eje para medir la deformación cíclica. Una representación gráfica del puente de Wheatstone, aquí referida como el circuito de puente lleno, se presenta en la figura 19.

Figura 19. Circuito de Puente Lleno - Puente de Wheatstone.



Por los principios básicos de elasticidad, una sección de eje circular bajo la influencia de un momento torsional desarrolla esfuerzos de corte principal, máximo y mínimo que se orientan en ángulos de $\pm 45^\circ$ respecto al eje axial. La geometría simétrica del eje, así como la carga torsional aplicada, hacen que los dos esfuerzos principales (tensión y compresión) sean iguales en magnitud. Ver Figura 20.

Figura 20. Sección de eje con momento torsional.



Es evidente que las galgas se orientan a lo largo de la dirección de los esfuerzos principales (cero cortante), que está a 45° respecto del eje axial, para optimizar el sensado de la deformación mecánica y minimizar los esfuerzos transversales no deseados, como es mostrado en la figura 21.

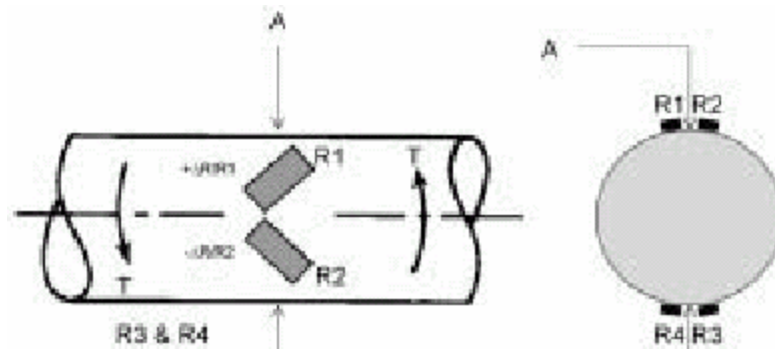
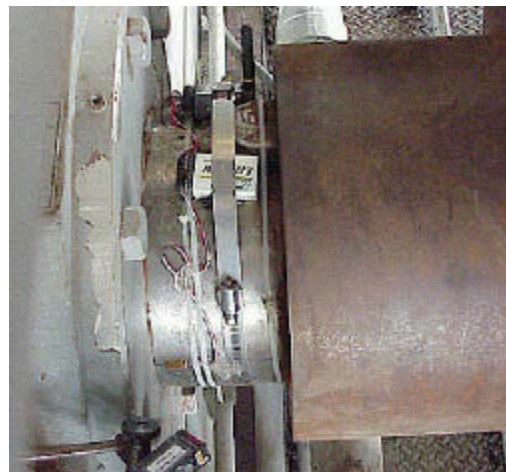


Figura 21.

Sección de eje con 4-galgas.

Este arreglo en particular elimina los efectos originados por flexión y cambios de temperatura en el punto donde se localiza la galga. Este método es bastante preciso cuando ha sido debidamente instalado y calibrado. Por consiguiente, está limitado para aplicaciones en donde sólo unos puntos son medidos y donde solo es necesario servir un corto tiempo.

Figura 22. Instalación de Strain Gage en un eje.



2.2. TORSIOGRAPH

Este instrumento es un tipo de sensor de desplazamiento rotacional que consiste de un volante inercial conducido mediante de una conexión elástica en el eje bajo prueba. Un indicador de aguja se conecta a la masa sísmica y al eje a través de un sistema de unión mecánica. Cualquier desplazamiento angular entre la masa sísmica y el eje rotando actúa en el indicador de aguja grabando el movimiento en papel químicamente sensibilizado sujeto a una sección que se sostiene momentáneamente contra la aguja. Obteniéndose un diagrama polar de la vibración del torsional y su amplitud leída en una escala transparente. Además estos diagramas permiten la determinación directa del "orden" de la vibración torsional, es decir, el número de ciclos de oscilación por revolución del eje, pero no proporciona información de frecuencia para lo cual se debe hacer una medición separada de velocidad angular de oscilación del eje el cual genera un voltaje proporcional. Este sistema tiene la desventaja de requerir un extremo del eje libre para su correspondiente montaje (figura 23), preferiblemente cerca de un anti-nodo o punto de oscilación torsional máximo para mejores resultados.

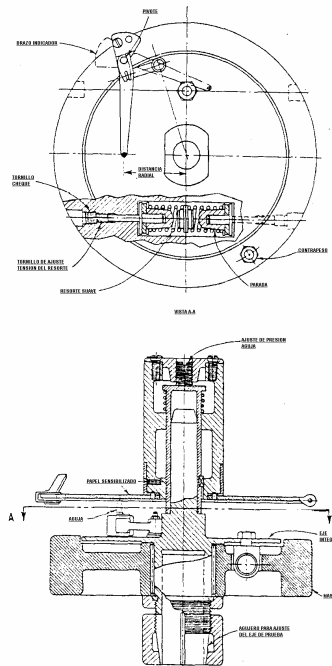
Figura 23. Instalación típica del torsio-graph.



Además se respuesta no es muy precisa a frecuencias menores de 10 Hz, con lo cual esta limitación resulta crítica en maquinaria pesada cuyas frecuencias de interés oscilan por ese orden, aunque ya hay equipos que vienen para un rango de frecuencias de 3 a 1000 Hz aprox..

Para la medición de oscilaciones torsionales, el análisis torsional debe normalizarse basado en dichas mediciones para evaluar bs esfuerzos en el sistema.

Figura 24. Sección transversal del Torsiograph.

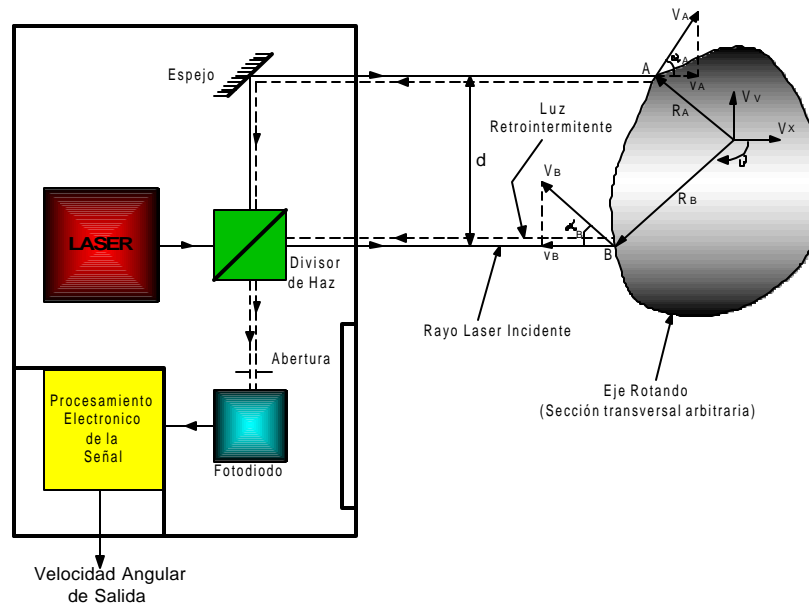


2.3. VIBROMETRO LASER

El estudio de la vibración torsional ha sido facilitado por la invención del vibrómetro torsional láser que mide el desplazamiento y la velocidad angular a través de la emisión de un rayo láser, dividido en dos de igual intensidad, paralelos, con una geometría óptica aplicada sobre un eje de sección transversal arbitraria e insensible a los movimientos del cuerpo sólido.

El haz de frecuencia desde el láser se somete a un efecto Doppler cuando es reflejado por la superficie, dichos rayos reflejados se dirigen hacia la superficie de un fotorreceptor (fotodiodo), donde la corriente de salida es modulada produciendo pulsaciones en la frecuencia que es directamente proporcional a la velocidad angular. Ver figura 25.

Figura 25. Esquema opto-electrónico del vibrómetro láser tipo 2523 de B&K



El rayo láser es dividido en dos rayos paralelos de igual intensidad separados por una distancia d , (donde $d = R_A \cos \alpha_A + \cos \alpha_B$). Los rayos golpean la superficie del eje en los puntos A y B, donde la velocidad es V_A y V_B , respectivamente. En cada rayo se ve sólo la velocidad en dirección x:

$$\begin{aligned} V_A &= -V_A \cos \alpha_A - V_X = -\omega R_A \cos \alpha_A - V_X \\ V_B &= V_B \cos \alpha_B - V_X = \omega R_B \cos \alpha_B - V_X \end{aligned} \quad (2.2)$$

y su frecuencia cambia así:

$$f_A = \frac{2v_A}{\lambda} \quad (2.3) \quad \text{y} \quad f_B = \frac{2v_B}{\lambda} \quad (2.4)$$

Entonces el haz de retorno del divisor, da una corriente de salida de frecuencia modulada de la pulsación, f_n , que es la diferencia entre las frecuencias de los rayos cambiantes Doppler:

$$f_D = f_B - f_A = \frac{2}{l}(v_B - v_A) = \frac{2\omega l}{l} \quad (2.5)$$

Así, la frecuencia de choque es directamente proporcional a la velocidad del eje (ω) y es independiente de cualquier movimiento del cuerpo sólido ($V_x + V$) del eje.

Si el plano del rayo del láser no es perpendicular al eje axial, entonces f_D también es una función de $\cos \theta$, donde θ es el ángulo entre el plano del rayo láser y el plano perpendicular al eje de rotación del eje.

Este instrumento también puede usarse para proporcionar una señal proporcional en tiempo real de la velocidad de rotación, cuando sea necesario el estudio de vibraciones radiales.

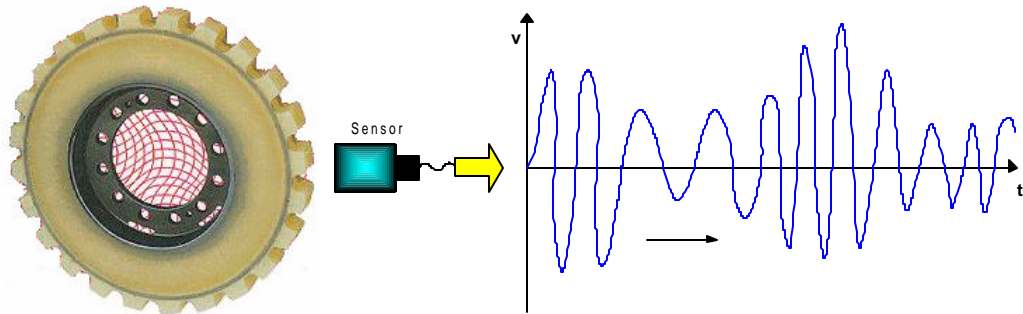
2.4. SISTEMAS CON TRANSDUCTORES DE SEÑAL PORTADORA

Si en un sistema a analizar están presentes engranajes, estos ofrecen una fuente ideal de señal portadora, la cual facilita la medición de vibración torsional.

La señal portadora debe ser generada ya sea mediante un transductor magnético o sensor de proximidad instalado cerca de los dientes de un determinado engranaje (figura 26), desde donde se genera esta señal.

La frecuencia predominante en la señal portadora es la frecuencia del paso de los dientes del engranaje.

Figura 26. Señal portadora para medición de vibración torsional.



Mediante la demodulación de la amplitud o de la frecuencia de la señal se puede obtener las características de la vibración torsional, suministrando las frecuencias de interés, las cuales son mucho más bajas que la frecuencia de la señal portadora.

En un sensor de proximidad se genera un voltaje de salida proporcional a la distancia existente entre el sensor y el diente; la amplitud de la señal portadora no es modulada por la vibración torsional, solo la frecuencia de paso de los dientes es modulada.

En un transductor magnético la señal es doblemente modulada (en amplitud y frecuencia) ya que el transductor produce un voltaje proporcional a la velocidad instantánea del diente del engranaje.

Las ventajas de un sensor magnético consisten en que estos no requieren fuente de poder externa, su señal de salida es generalmente limpia y con bajos niveles de ruido y además producen una señal fuerte la cual a menudo no requiere de amplificación.

Una señal portadora de frecuencia modulada puede también ser generada ópticamente mediante un encoder y un sensor óptico o fotocelda.

2.4.1 Sistemas de frecuencia modulada.

Ya que la vibración torsional es simplemente una variación cíclica de la velocidad del eje, esta produce una variación en la frecuencia de la señal portadora. Una clase de sistemas de instrumentación utiliza la modulación de la frecuencia de esta señal para producir una señal análoga con una amplitud DC, proporcional a la velocidad instantánea del eje y en la que su componente AC corresponde a la velocidad de vibración torsional la cual puede ser integrada para obtener el desplazamiento de la vibración.

El componente central y más crítico de este tipo de sistema es la caja electrónica, que desempeña la demodulación de frecuencia y el acondicionamiento de la señal. El principio general de un circuito de este tipo es el siguiente: Cada pulso de la señal portadora dispara un multivibrador monoestable que genera un pulso cuadrado de amplitud y periodo preciso. El tren de pulsos de onda cuadrada resultante es integrado por un filtro de paso bajo, el cual produce una salida de voltaje DC, estable cuando la velocidad del engranaje es constante.

Si existe vibración torsional a una frecuencia que se encuentre dentro de la banda de filtro, la frecuencia portadora oscila alrededor de su valor principal y la salida DC del filtro de paso bajo oscila acordeamente.

Este proceso electrónico es llamado conversión de frecuencia a voltaje y en este caso el voltaje es proporcional a la velocidad de rotación instantánea del eje. Su precisión es bastante alta, los máximos errores que se presentan son del 4%.

2.4.2 Sistemas de amplitud modulada.

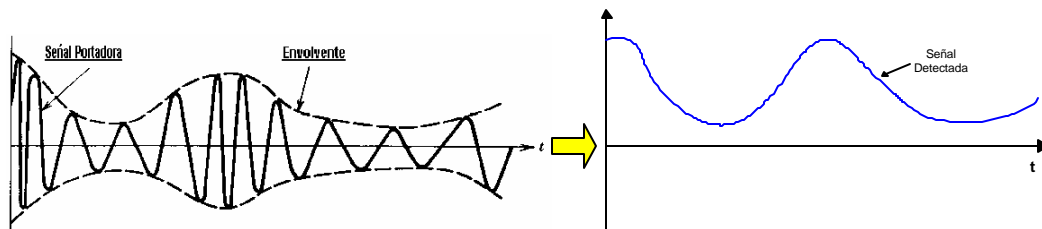
Se dijo ya que si se instala un transductor magnético que capte el paso de los dientes de un engranaje se produce una señal con amplitud y frecuencia modulada por la velocidad instantánea del engranaje.

Un proceso electrónico conocido como detección de envolvente puede ser usado para producir un voltaje análogo a la velocidad de la vibración torsional, como se muestra en la figura 27.

En el circuito procesador de la señal portadora, esta es rectificadora con un diodo detector bipolar de alta precisión y un amplificador operacional; la onda rectificadora pasa luego a través de un filtro de pasa bajos en donde se promedia su nivel y de donde se obtiene un nivel de voltaje DC, proporcional a la velocidad media y una componente AC que representa la vibración. La salida es finalmente pasada a través de otro filtro de pasa bajos para reducir la componente de velocidad inducida por la inevitable desviación de los dientes del engranaje.

En este método se producen errores debido al efecto de vibración lateral, dando como resultado señales considerables al 1X RPM y sus armónicos, los cuales tienden a enmascarar la señal de vibración torsional. Se han obtenido errores de hasta del 18%, lo cual lo hace poco recomendable.

Figura 27. Detección de la envolvente.



2.5. SISTEMAS DE BANDAS LATERALES Y ANALISIS DE FRECUENCIA

Este sistema se apoya en el uso de un transductor que produce una señal portadora de frecuencia modulada (transductor magnético o proximitor), junto con el uso de un analizador de espectro con capacidad de expansión sobre cualquier frecuencia central (zoom).

Si se parte de la premisa que cualquier sistema de instrumentación debe tener un analizador de espectro con capacidad de zoom, este sistema sería el más simple y menos costoso, ya que solo necesitaría el transductor y los engranajes para producir una señal portadora de frecuencia modulada.

El principio de operación es el siguiente:

La forma más simple de representar una señal portadora de frecuencia modulada es:

$$V_{(t)} = V_0 \cos(2\pi f_c t + b \sin 2\pi f_m t) \quad (2.6)$$

donde f_c es la frecuencia de la señal portadora básica, f_m la frecuencia de modulación (frecuencia de la vibración torsional) y b es el índice de modulación.

Si la señal portadora proviene de un engranaje con N_T dientes a una velocidad del eje N en rpm, el desplazamiento angular de la vibración torsional θ , está dado por:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(t) &= \mathbf{q}_0 \cos \mathbf{w} \\ f_c &= N_T N / 60 \\ f_m &= \mathbf{w} / 2\mathbf{p} \\ \mathbf{b} &= N_T \mathbf{q}_0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

La ecuación (2.6) puede ser expresada en series matemáticas conocidas como funciones de Bessel de la siguiente manera:

$$V(t) = V_0 \left\{ \begin{aligned} &J_0(N_T \mathbf{q}_0) \cos 2\mathbf{p} f_c t + J_1(N_T \mathbf{q}_0) \cos 2\mathbf{p}(f_c + f_m)t - J_1(N_T \mathbf{q}_0) \cos 2\mathbf{p}(f_c - f_m)t \\ &+ J_2(N_T \mathbf{q}_0) \cos 2\mathbf{p}(f_c + 2f_m)t + J_2(N_T \mathbf{q}_0) \cos 2\mathbf{p}(f_c - 2f_m)t + \dots \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

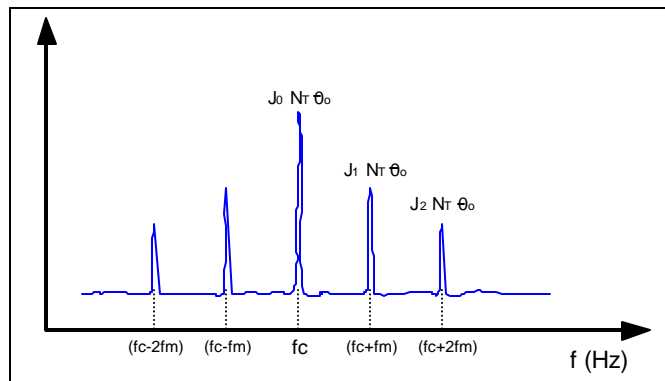
La cantidad $\hat{a} = N_T \dot{\theta}_0$ es llamado índice de modulación de las funciones de Bessel $J_i(N_T \dot{\theta}_0)$ de orden i th, donde $i = 1, 2, 3, \dots$. Los valores numéricos de las funciones de Bessel están tabulados en un gran número de handbooks publicados y por tanto no deben ser calculados. Varios de los valores útiles en esta aplicación se dan en el anexo A.

Ahora sabiendo esto se puede usar el analizador de espectro para determinar la frecuencia y magnitud de la vibración torsional, sin la ayuda de equipo adicional.

Conectando la señal del transductor directamente al analizador de espectros y realizando un zoom en la frecuencia central (señal portadora), aparecerá un pico en el centro de la pantalla, rodeado de un arreglo simétrico de picos con magnitud decreciente (ver figura 28).

Las componentes de cada costado son llamadas bandas laterales y se deben a la transformación en series de Fourier de la onda modulada por frecuencia. Un examen de la ecuación (2) ayudara a clarificar lo anterior, observándose la presencia de componentes a la frecuencias $(f_c + f_m)$, $(f_c - f_m)$, $(f_c + 2f_m)$, \dots

Figura 28. Espectro de bandas laterales producido por vibración torsional.



La frecuencia de vibración determina como la diferencia entre la frecuencia portadora (pico central) y la frecuencia de cualquiera de las bandas laterales de primer orden, las cuales están equidistantes de la frecuencia portadora.

Retomando a las funciones de Bessel, la magnitud de todos estos picos, incluyendo el central o pico de la frecuencia portadora, están relacionados entre si pues todos estos son funciones de Bessel del mismo índice de modulación, $N_T \dot{\epsilon}_0$. Para determinar la amplitud $\dot{\epsilon}_0$ de la vibración torsional se necesita obtener la relación entre la amplitud de las bandas laterales de primer orden y el pico central o de orden cero. Esta relación de amplitudes es el cociente de $J_1(\hat{a}) / J_0(\hat{a})$, donde \hat{a} es igual a $N_T \dot{\epsilon}_0$. En el anexo A de funciones de Bessel se busca el valor del índice de modulación \hat{a} a partir de los valores de $J_0(\hat{a})$ y $J_1(\hat{a})$ que cumplan con la relación $J_1(\hat{a}) / J_0(\hat{a})$. Ya que \hat{a} es igual a $N_T \dot{\epsilon}_0$ y el número de dientes N_T en el engranaje es conocido, la amplitud pico en radianes puede ser calculada.

La modulación en amplitud que se presenta en señales de frecuencia modulada generadas en un transductor magnético, introduce un pequeño error en el cálculo anterior.

Es importante destacar que algunas de las mediciones realizadas en maquinaria con problemas de vibración torsional deben ser hechas en estados transitorios (arranque de una maquina), en donde la velocidad de la maquina esta aumentando, ya que el sistema de bandas laterales no es aplicable a mediciones transitorias en aparatos electrónicos disponibles hoy día, porque la frecuencia central se mueve rápidamente durante el periodo de arranque y generalmente es independiente de las frecuencias de vibración torsional.

2.6. TECNICAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIÓN TORSIONAL.

2.6.1. Medición por Intervalos de Tiempo.

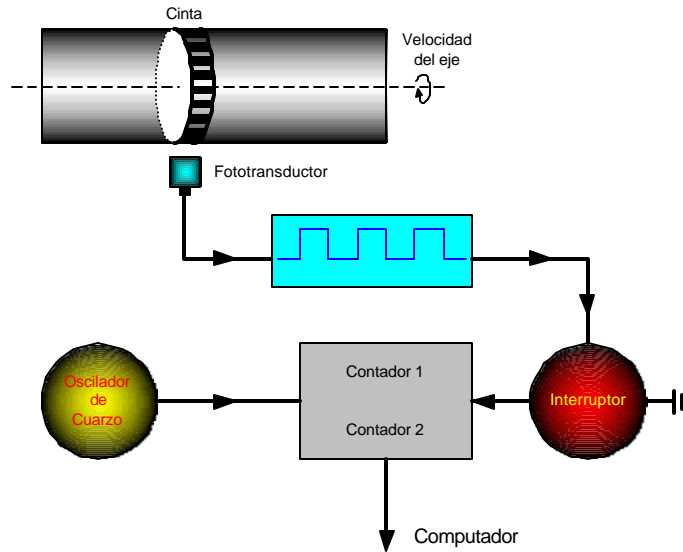
Cuando no se dispone de engranajes o ruedas dentadas para producir una señal portadora mediante transductores magnéticos o proximidores, es posible utilizar una cinta reflectiva con franjas blancas y negras alternadas, que se enrolla en el eje de la maquina y que puede ser colocada en cualquier parte del eje del sistema mecánico; además un transductor óptico para generar una señal portadora de forma cuadrada.

La base del sistema de medición de intervalos de tiempo consiste en la medición de la duración en tiempo de cada pulso cuadrado de la señal portadora. Este nuevo sistema de medición de vibración torsional es especialmente empleado para medir fenómenos transitorios que cambian rápidamente, como la puesta en marcha de una máquina.

La figura 24 ilustra la conceptualización del sistema. Un transductor óptico produce una onda cuadrada la cual habilita (durante su estado alto) la operación de conteo por parte de unos contadores. Cuando los contadores son habilitados estos cuentan el número de pulsos provenientes de un oscilador de cristal de alta frecuencia utilizado como unidad patrón; es decir, son contados el número de pulsos de periodo conocido contenidos en cada pulso de la onda cuadrada proveniente del transductor óptico (ver figura 30). Ya finalizado el proceso de conteo (la onda pasa a estado bajo) la información de los contadores es registrada en latches que almacenan estos números en binario. Un inversor adecua la señal para determinar que dura el estado bajo de cada pulso, de forma similar a la explicada anteriormente. Los datos almacenados en los latches son leídos luego por un computador. Los números registrados son equivalentes al tiempo que tarda en pasar cada franja de la cinta (transparente u opaca) por el punto del sensor. El inverso de este tiempo multiplicado por el ángulo de barrido

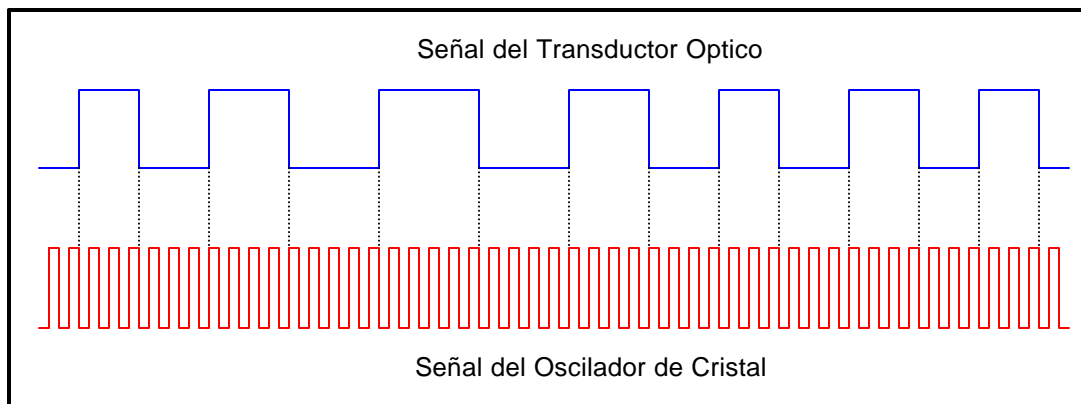
de cada franja, determina la velocidad media de rotación para cada franja de la cinta.

Figura 29. Esquema del sistema de medición por intervalos de tiempo.



En la figura 30 se muestra como queda determinado el tiempo de duración de cada pulso.

Figura 30. Diagrama de tiempos del esquema por conteo.



La información leída por el computador es procesada para obtener los

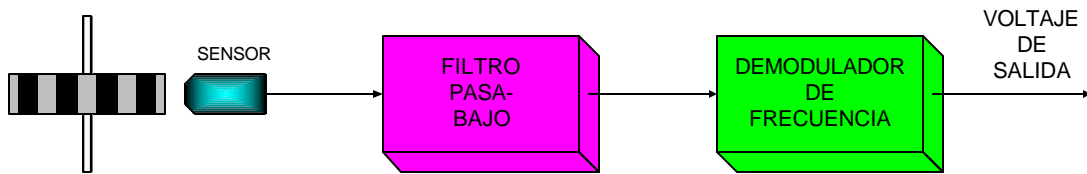
valores de velocidad de la maquina, con los cuales se puede generar una gráfica de velocidad en función del tiempo para analizar su comportamiento. (Ver anexo).

2.6.2. Medición Sin Contacto.

Comparado con la medición de vibración transversal, es mucho más difícil de medir la vibración torsional de un eje, debido a que no es fácil conseguir la señal de voltaje de un transductor sin contacto que refleje directamente el desplazamiento relativo entre el eje y el transductor. Sin embargo en la condiciones de vibración torsional, el sensado sin contacto no es de ningún modo fácil porque la vibración torsional no está en dirección del radio pero si en la dirección tangencial que es completamente diferente de la vibración transversal. En el efecto de Doppler Cruzado, el movimiento en dirección tangencial de la superficie del eje puede ser captado por un sistema de láser. Pero este método no es práctico para aplicaciones de campo porque el sistema de medición es complejo, de baja confiabilidad y costoso.

La técnica sin contacto es un método práctico para medir la vibración torsional, mediante un transductor de sensado remoto que se instala en el pedestal de la máquina. Cuando el eje está rotando, una señal se origina en el transductor desde el engranaje o una parte similar en el eje, donde la baja frecuencia de la señal dependerá del paso proporcional de los dientes. Al mismo tiempo, este es modulado por la vibración torsional del eje, después de pasar a través de un filtro pasa bajos (LPF), en donde la señal se convierte en una señal armónica de frecuencia modulada por la vibración torsional. Luego mediante un filtro demodulador de frecuencia (DMF), con un voltaje de referencia a la salida la vibración torsional se puede obtener, ver figura 31.

Figura 31. Esquema conceptual del método sin contacto.



El método sin contacto generalmente se utiliza en mediciones de vibración en plantas porque los transductores son fáciles de instalar y de fácil mantenimiento. La ventaja más significativa es que el sistema de medición es confiable y la perturbación externa a la medición puede ser mínima cuando esta técnica se aplica a la medición de maquinaria rotativa a gran escala, como un grupo de generadores de turbinas a vapor.

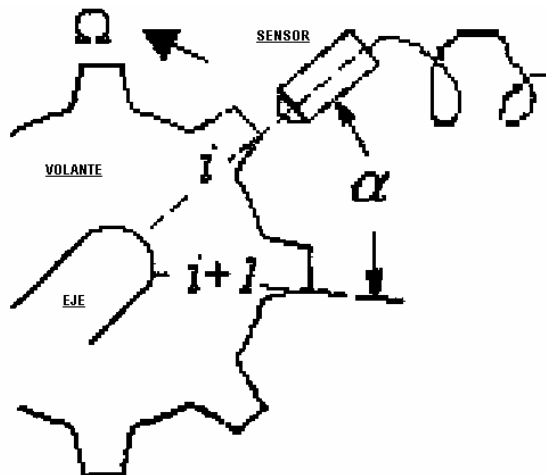
Hay un factor que limita la aplicación de esta técnica de medición. Es decir, un error en la distribución desigual de los dientes puede afectar la señal de la misma manera que la vibración torsional del eje cuando el engranaje no se fabrica perfectamente. Esto generará un error en los resultados de la medición en la misma proporción. Por lo tanto, se requieren engranajes precisos o discos exactamente codificados en el eje de medición. La exactitud de medición no sería mejor que la de los engranajes porque en la mayoría de los casos, la amplitud de la vibración torsional es tan pequeña como unos pocos porcentajes de un grado, aun más pequeño que el error permitido para la distribución desigual de los dientes en la mayoría de los engranajes del eje, por lo tanto sólo unos puntos pueden ser necesarios para ejecutar la medición.

2.6.3. Medición por Saturación de Pulsos.

Hay muchas técnicas para medir velocidad angular de un eje rotativo incluyendo mecánicas, magnéticas, ópticas, o combinaciones de ellas. Uno de las técnicas más simples y económicas incluye poner marcas en el eje o

en un volante asociado y detectarlas usando sensores magneto-eléctricos u ópticos, capaces de producir un pulso siempre que la marca pase por su proximidad. Puesto que los pulsos iniciales generados por las marcas pueden tener formas complicadas, sus formas se requieren para un extenso procesamiento de la señal. Además, puesto que el número de pulsos es directamente proporcional al número de marcas Z en el eje y a la velocidad angular \dot{U} del eje, un pulso múltiple puede requerirse para aumentar la exactitud del sistema porque ambos Z están limitados por el tamaño de las marcas en el volante y \dot{U} está limitada por la aplicación, como se muestra en la figura 34.

Figura 32. Unidad captadora de señal con un sensor magneto-eléctrico.



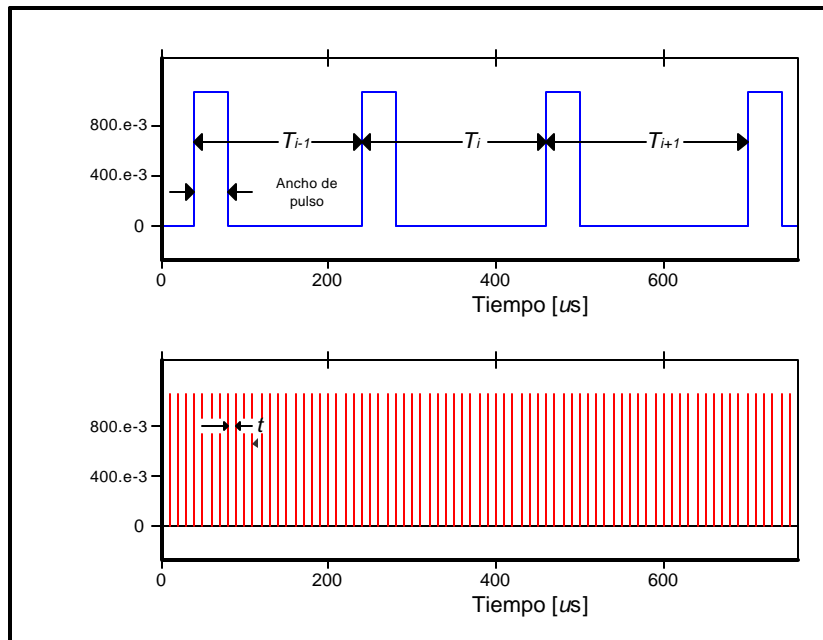
En la figura 34, las marcas son protusiones (dientes u opacos en el disco, en este caso) en el volante y el sensor consiste de un par de diodos ópticos y un circuito de interfase frontal. La velocidad angular media del eje del motor se denota a través de \dot{U} , expresada en revoluciones por segundo (rps), y α indica la separación angular en grados entre dos marcas adyacentes en el volante.

Si permitiéramos que la velocidad de vibración torsional de un sistema eje-engranaje de motor sea \dot{u} , con las mismas unidades que \dot{U} , entonces

podemos representar la velocidad angular del eje principal en un tiempo t como $\dot{U} + \dot{u}$. Además, podemos ver en la figura 34, que el periodo i th de un pulso del eje es $T_i = t_i - t_{i-1}$, los cuales deben reflejar cualquier cambio de la velocidad de vibración torsional \dot{u} bajo una velocidad angular constante del eje principal.

Si Z es demasiado pequeño, no podremos lograr una rata de pulsos del eje alta para extraer \dot{u} desde T_i con una alta exactitud.

Figura 33. Principio básico del método de saturación de pulsos.



La separación constante entre las marcas o entre cualquiera de dos pulsos del eje adyacente es dada por

$$\mathbf{a} = \frac{360^\circ}{Z} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} 360^\circ * \{\Omega + \mathbf{w}\} * dt \quad (2.12)$$

donde i es un número entero positivo en el rango $\{1, 2, 3, \dots, Z\}$.

Si en el eje principal la velocidad angular \dot{U} permanece constante, podemos derivar una expresión del incremento de la vibración torsional dentro del i th

del periodo de pulso del eje cambiando la Eq. (2.12) en una nueva expresión como sigue:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{j}_i(t) &= \int_{t_{i-1}}^{t_i} 360^\circ * \mathbf{w}^* dt \\
 \mathbf{j}_i(t) &= 360^\circ * \left\{ \frac{1}{Z} - \Omega * T_i \right\} \\
 \mathbf{j}_i(t) &= 360^\circ * \left\{ \frac{1}{Z} - \Omega * \mathbf{t} * n_i \right\}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

donde n_i es el número de saturación de pulsos entre dos pulsos sucesivos del eje y t corresponde a $[t_i, t_{i-1}]$.

Se nota que cuando aumentan se incrementa la anterior vibración torsional, luego la amplitud de vibración torsional en un tiempo t_k pueden representarse por:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{j}(t_k) &= \int_k^{t_k} 360^\circ * \mathbf{w}^* dt \\
 \mathbf{j}(t_k) &= \sum_{i=1}^k \Delta_i(t) \\
 \mathbf{j}(t_k) &= \sum_{i=1}^k \int_{t_{i-1}}^{t_i} 360^\circ * \mathbf{w}^* dt \\
 \mathbf{j}(t_k) &= \sum_{i=1}^k 360^\circ * \left\{ \frac{1}{Z} - \Omega * \mathbf{t} * n_i \right\}
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

donde t_k es el tiempo al que los pulsos k th del eje ocurren.

Velocidad angular media del eje principal

Antes de usar la Eq. (2.14) para calcular la vibración torsional, la velocidad angular media del eje del motor tiene que ser obtenida.

Desde que el número de marcas en el volante Z sea conocido, podemos obtener fácilmente el tiempo medio de una sola revolución del eje principal acumulando los pulsos del eje.

Así, la velocidad angular media del eje principal puede representarse por

$$\Omega = \frac{1}{\frac{1}{2} * \sum_{i=1}^{2Z} T_i} = \frac{1}{\frac{1}{2} * t * \sum_{i=1}^{2Z} n_i} \quad (2.15)$$

donde el límite superior de la suma debe ser dos veces más grande que el número de marcas porque la frecuencia de vibración torsional más baja puede ser la mitad de la velocidad angular \dot{U} del eje principal.

Sustituyendo la ecuación anterior en la Eq. (2.14), se obtiene

$$\begin{aligned} \mathbf{j}(k) &= \sum_{i=1}^k 360^\circ * \left\{ \frac{1}{Z} - \frac{n_i}{\frac{1}{2} * \sum_{i=1}^{2Z} n_i} \right\} \\ \mathbf{j}(k) &= \sum_{i=1}^k 360^\circ * \frac{1}{Z} * \left\{ 1 - \frac{n_i}{N_0} \right\} \\ \mathbf{j}(k) &= \sum_{i=1}^k \bar{\mathbf{j}}(i) \end{aligned} \quad (2.16)$$

donde
$$N_0 = \frac{1}{2Z} * \sum_{i=1}^{2Z} n_i \quad (2.17)$$

y
$$\bar{\mathbf{j}}(i) = 360^\circ * \frac{1}{Z} * \left\{ 1 - \frac{n_i}{N_0} \right\} \quad (2.18)$$

desde luego que todos los cálculos sólo se llevan a cabo cuando ocurre un pulso del eje, el tiempo t_k en la Eq. (2.16) es reemplazado por k .

2.6.4. Medición por Alineación de Tiempo.

Este método también utiliza las señales generadas desde los transductores sin contacto, pero apartándose del componente de vibración torsional de las señales del procesamiento digital de señal.

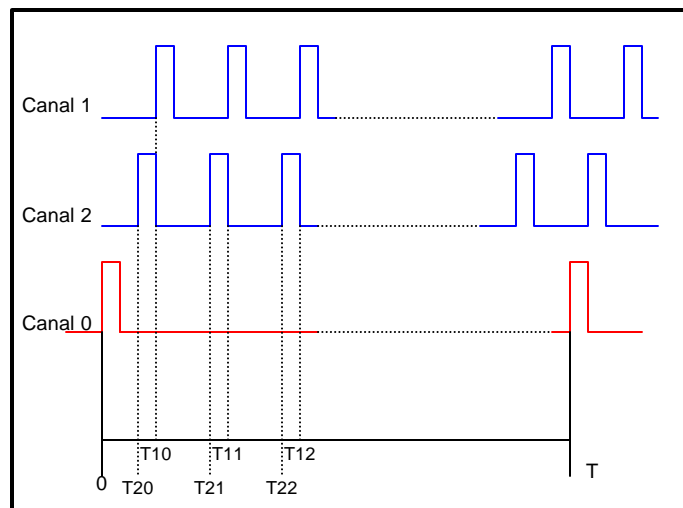
Cuando un eje rota, está en un estado de vibración torsional estable, su movimiento angular sería teóricamente:

$$\Phi(z, t) = \mathbf{w} + A(z) \text{sen}(\mathbf{w}_t + \mathbf{q}(z)) \quad (2.9)$$

donde, ω denota la frecuencia angular de rotación del eje, ω_t es la frecuencia angular de la vibración torsional; A y q representa la amplitud y la fase inicial de la vibración torsional respectivamente; z indica la localización de los puntos de medición a lo largo de la dirección axial del eje.

Suponga que hay un engranaje o un disco codificado en el eje, mediante un transductor de sensado de remoto, podemos obtener una señal del eje rotando. Usando un comparador de voltaje, la señal puede convertirse en una serie de pulsos, como se muestra en la figura 32. Otro transductor es necesario el cual solo toma un pulso por cada giro del eje. Este pulso por giro se define como la señal de partida del periodo de rotación y se indica en el canal 0, de la figura 34. Las posiciones de cada pulso pueden representarse en el tiempo cuando aparece cada pulso con un contador digital, este tiempo puede ser definido precisamente. El contador se activa una vez por cada pulso de giro. Las posiciones medidas representan la distribución de la circunferencia de los dientes mientras el eje gira constantemente sin vibración. Cuando la vibración torsional tiene lugar, esas posiciones se cambiarían y se extrae la información de la vibración torsional en las señales obtenidas.

Figura 34. Señales de pulso usadas como método de alineación de tiempo



En otras palabras, la vibración torsional lleva a un cambio de fase de las señales del pulso que luego se comparan las señales obtenidas de un eje rotando constantemente con aquéllas cuando el eje esta vibrando torsionalmente y así los cambios en las posiciones del pulso pueden descubrirse. Si T_{ji} es usado para representar el tiempo, donde i es el pulso y j el canal, el cambio de la posición del pulso puede ser expresado por $T_{ji} - T_{ji}^0$, donde la variable con exponente 0 indica la posición inicial del pulso sin vibración torsional, el subíndice j es el número del canal de la señal, i se define como el número del transductor que produce la señal.

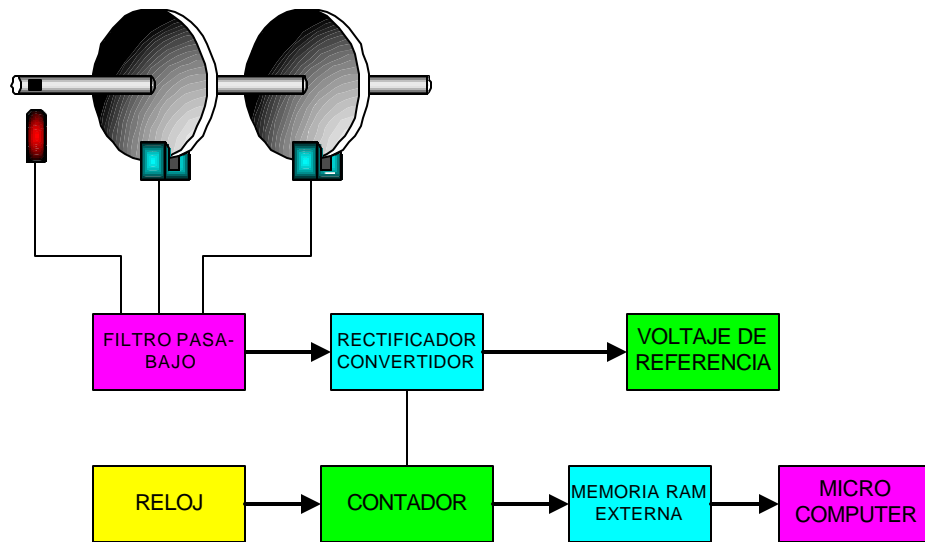
Considerando la velocidad de rotación en el mismo momento, es fácil deducir la amplitud de la vibración torsional del eje en el mismo instante y lugar de medición, las cuales son:

$$V_{ji} = -(T_{ji} - T_{ji}^0)\omega \quad \begin{array}{l} i = 0,1,2,\dots |j -1; \\ j = 1,2,3,\dots J \end{array} \quad (2.10)$$

De la ecuación anterior, se asume que hay $|j$ pulsos en el canal j dentro de un giro y que totalmente se emplean J transductores para realizar la medición. Con este método, una sucesión numérica de los pulsos puede reconstruirse la cual es consistente del mismo significado con la sucesión numérica adquirida de otra señal de vibración por la técnica de discretización normal.

Como resultado final la señal de vibración torsional se obtiene por comparación de la posición del pulso, dicho método puede ser llamado como *método de alineación de tiempo*, donde este sistema de medición es representado en la figura 35.

Figura 35. Sistema de medición



Hay dos efectos que deben ser considerados:

- Cuando existen cambios en la velocidad de rotación, la distancia entre cualquiera de los dos pulsos cambia con una misma proporción. Esta situación es como la deformación de un metro de caucho: cuando el metro se hala o se comprime a sus dos extremos, el tamaño entre cualquiera de sus dos divisiones cambiaría exactamente igual la misma proporción que todo el metro. Esto puede llamarse como *efecto de cambio de velocidad*.
- La vibración torsional del eje puede desplazar la posición una vez por el pulso del giro. Esto llevará a un cambio de toda la información almacenada desde que este pulso se usa para activar el contador. Esto es llamado como *efecto de traslado del punto de referencia*.

Estos dos efectos pueden ser separados y eliminados de las señales de vibración en un modelo lineal. Por consiguiente, los datos pueden analizarse con la transformada rápida de Fourier (FFT) u otras técnicas digitales normalmente adoptadas para procesar señales de vibración digital. El espectro de vibración de FFT puede usarse para describir el estado de vibración torsional de un cierto lugar en el eje. Es más, si hay dos o más

secciones estas son medidas simultáneamente, el desplazamiento torsional relativo de las diferentes secciones en un modelo de vibración puede ser encontrado comparando las amplitudes de vibración y las fases a la misma frecuencia entre los canales de medición. Si hay los suficientes puntos de medición, el modelo de vibración torsional del eje puede observarse completamente.

Con este método, la medición depende más que ningún otro de la exactitud de los sectores opacos y transparentes del disco colocado en el eje. Que al superar este problema, se puede esperar una alta precisión en la medición que dependerá de seguir tres factores:

- > Resolución del movimiento angular del sistema de medición
- > Calidad de la fuente de señales desde los transductores
- > El error de cálculo numérico en el procesamiento digital de señales.

La resolución del movimiento angular es proporcional a la velocidad del eje de rotación $f_{rotación}$ e inversamente proporcional a la frecuencia del funcionamiento del contador f_{reloj} , que es:

$$D = \frac{f_{rotación}}{f_{contador}}(2\mathbf{p}) \quad (\text{rad}) \quad (2.11)$$

2.6.5. Medición mediante sensado óptico.

El concepto importante en el sistema de medición con sensor óptico es que la velocidad de la superficie del eje puede ser medida cronometrando la duración del paso alternado de la cinta de opacos y transparentes en la superficie del eje. Sin embargo, no puede usarse esta información cronometrando una solo sensor para determinar si la cinta en su campo de vista están moviendo hacia o lejos del sensor; sólo se detecta los componentes de velocidad perpendicular al sensor. Más allá, las

fluctuaciones de esta medición de velocidad podrían ser causadas por movimiento del centro del eje y/o por fluctuaciones angulares sobre el centro. Si sólo se usa un sensor, no es posible distinguir entre estos tipos de movimiento. Por consiguiente, hay ecuaciones que traducen el cronometraje de pulsos con información de dos sensores dentro de las estimaciones del movimiento translacional del centro del eje y el movimiento rotatorio superpuesto en él. El tiempo que toma una franja opaca y una transparente consecutiva (zona de cebra) en pasar por el sensor es medido usando una señal de reloj digital de alta velocidad y contando cuántos pulsos del reloj ocurren por los pasos de opacos y transparentes del sensor (encoder). Matemáticamente, si el f_c es la frecuencia del contador, N es el número total de sectores opacos y transparentes en el eje, R es el radio del eje, n_k es el contador de pulsos por disco para el k th sensor, entonces

$$\dot{\mathbf{q}}R - \dot{x}\sin\mathbf{q}_k + \dot{y}\cos\mathbf{q}_k = \frac{2pRf_c}{n_k} \quad k = 1,2,3. \quad (2.19)$$

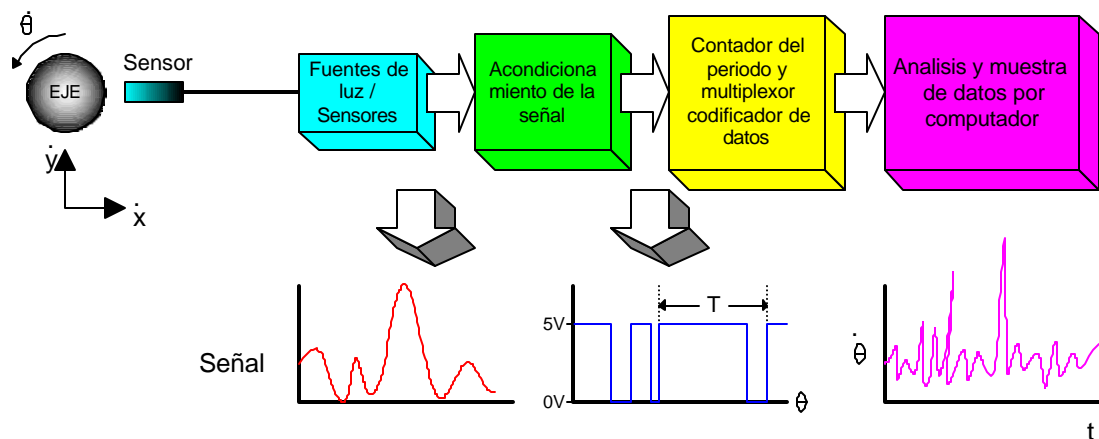
• denota la derivada de tiempo, x y y son desplazamientos laterales, el \mathbf{q}_k es el ángulo que el k th sensor hace con el eje horizontal, y $\dot{\mathbf{q}}$ es la velocidad angular del eje (\dot{u}).

Las tres variables independientes en (2.19), \dot{x} , \dot{y} y $\dot{\mathbf{q}}$, son funciones de tiempo que se conectan juntas en forma algebraica. Se colocaron dos sensores en ángulos rectos, \mathbf{q}_1 y \mathbf{q}_2 , los cuales producen dos contadores de pulso de tiempo separado, n_1 y n_2 , al igual que dos ecuaciones del sensor independientes. Sin embargo, cada sensor provocará sólo una cuenta del sensor, n_k , cuando una zona de cebra ha pasado, puesto que en la medición n_1 , y n_2 , se toman simultáneamente con lo cual al compararlas nos da como resultado una sola señal.

La figura 36 muestra un diagrama de bloques del nuevo sistema de medición. Para simplicidad, este sistema de Medición de Vibraciones Torsionales será de ahora en adelante llamado el sistema **SMVT**. El sistema incluye un módulo óptico, un acondicionador de señales, un módulo de adquisición y transmisión de datos y un paquete de software para análisis de datos.

Este sistema se compone básicamente de un encoder incremental y un sensor óptico, los cuales son los encargados de captar y transmitir la señal portadora de la vibración torsional. Dicho módulo óptico contiene una fuente de luz, un lente y un cable de fibra bifurcado. El rayo de luz choca con un disco de sectores opacos y transparentes (encoder incremental) colocado en el eje y se refleja a través de este disco por el lente y un cable de fibra óptica para el sensor óptico, con salida proporcional de voltaje a la intensidad de luz reflejada. Un esquema general del sistema de medición desarrollado se presenta en la figura siguiente.

Figura 36. Diagrama de bloques del sistema de medición.

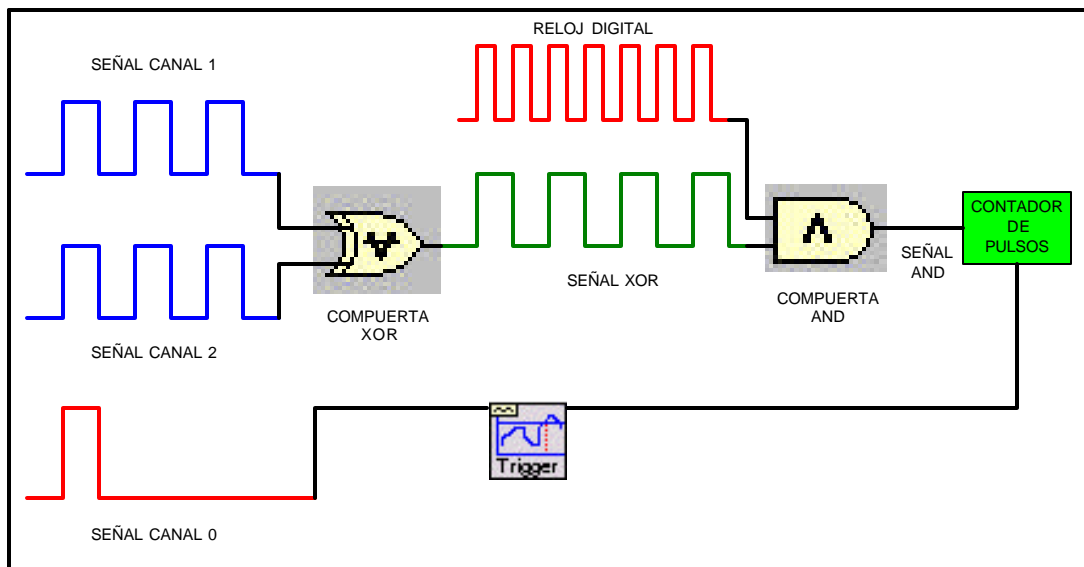


El encoder incremental se localiza entre el led y el fotodiodo y debido a su movimiento rotacional permite y obstruye en forma alternativa el paso de luz desde el led hacia el fotodiodo. Esto hace que el sensor óptico genere una señal cuadrada (tren de pulsos) cuya frecuencia es proporcional a la

velocidad de rotación del encoder (rotor); presentado periodos constantes cuando la velocidad es constante y periodos variables cuando la velocidad de rotación varía.

Para medir el tiempo de cada periodo de la señal compatible, se usan contadores comparados con un reloj digital de alta precisión implementados por software, donde la precisión del reloj proporciona más exactitud en la medición de los periodos de tiempo, de las señales provenientes de los sensores ópticos (señal 1 y 2), pasan inicialmente a través de una compuerta XOR, luego la señal lógica resultante es comparada con una señal proveniente del reloj digital mediante una compuerta AND y cuyo resultado se almacena en un contador de pulsos, que se activa mediante la señal proveniente del trigger (sensor 3/canal 0), donde se extrae la señal previamente normalizada para su correspondiente procesamiento, análisis y digitalización de las graficas, como se muestra en la figura 37.

Figura 37. Esquema del procesamiento digital de las señales adquiridas.



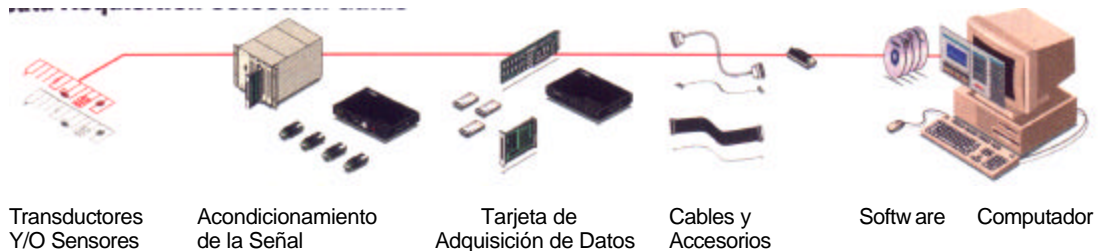
3. DESCRIPCION DEL SISTEMA DE MONITOREO

3.1. SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

Para conformar un sistema de adquisición de datos basado en PC se necesitan las siguientes etapas:

- Transductores.
- Acondicionamiento de señal.
- Tarjeta de adquisición.
- Software.
- Computador personal.

Figura 38. Conformación de un sistema de adquisición de datos.



3.1.1. TRANSDUCTORES.

En el caso de trabajar con señales de entrada análogas, se necesitan los transductores encargados de leer y “traducir” fenómenos físicos a señales eléctricas, con los cuales va a trabajar el PC. Si el sistema va a controlar una salida externa, en lugar de los transductores se usan los actuadores encargados de llevar a cabo las funciones que desea realizar el sistema sobre la planta.

En general, los transductores son construidos para medir magnitudes:

- Térmicas.
- Mecánicas: peso, volumen

- Radiantes.
- Eléctricas.
- Magnéticas.

Por su aplicación se pueden clasificar principalmente en:

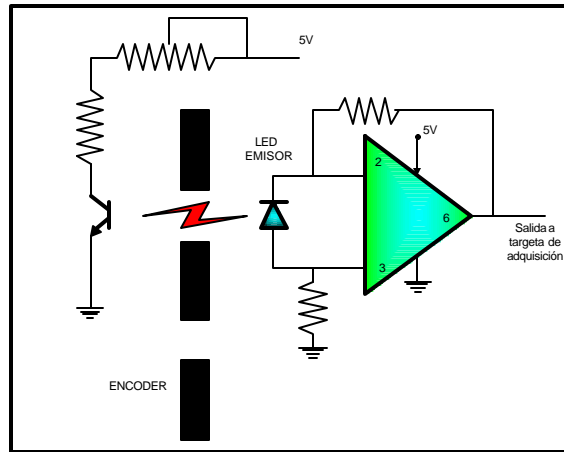
- Presión, desplazamiento: galgas extensiométricas, dispositivos potenciométricos.
- Temperatura: termistor, termopar.
- Luz y radiación: celda fotoemisiva, celda fotovoltaica.

En el **SMVT**, fue necesario utilizar transductores ópticos para la adquisición de datos de vibración torsional del prototipo, para su posterior análisis de las señales mediante una interfase entre el prototipo y el computador como se menciono anteriormente.

Los encoder incrementales utilizados son discos ópticos con 80 sectores circulares transparentes y 80 sectores circulares opacos de igual ángulo de barrido, los cuales permiten o no el paso de luz a través de ellos. Este disco es montado en el rotor de manera que gira a la velocidad de rotación de la maquina a estudiar (en este caso el prototipo).

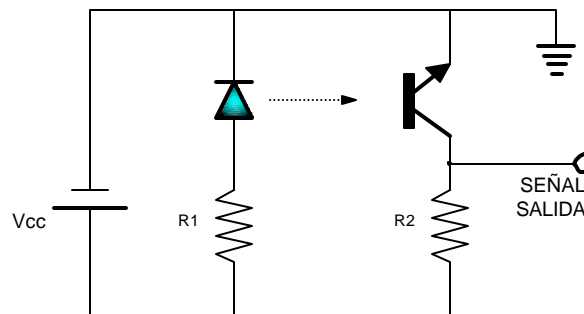
El sensor óptico esta compuesto básicamente por un led emisor de luz, un fotodiodo y un amplificador operacional, como se muestra en la figura 39. Al ser excitado el fotodiodo por la luz del led, fluye una corriente eléctrica pequeña a través de él, produciéndose una diferencia de voltaje entre las entradas del operacional. Esta diferencia es amplificada y reforzada en el amplificador el cual entrega una señal de salida con niveles de voltaje adecuados, que es llevada a la tarjeta de adquisición de datos mediante cable coaxial.

Figura 39. Circuito electrónico del transductor óptico.



Luego es necesario implementar otro sensor óptico como se muestra en el circuito electrónico de la figura 40, que envía una señal de partida la cual activa un nivel de referencia de disparo fijado por el software, que esta asociado directamente con los datos de vibración por giro del eje o con la vibración de otras partes de la máquina; generalmente sensa o se sincroniza a la frecuencia de una marca o una protuberancia del eje o disco, enviando la señal a un analizador (sistema), iniciando la adquisición de los datos que van a ser adquiridos en la misma posición angular del eje cada vez que el disparador envíe una señal al analizador. La frecuencia de la señal del trigger está asociado con la velocidad del eje o de algunos de sus múltiplos, al estar asociados se puede medir el ángulo de fase entre la señal de referencia y la señal de la vibración.

Figura 40. Circuito electrónico activador del disparo (Trigger).



3.1.2. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL.

A veces, es necesario acondicionar las señales medidas por los transductores para que puedan trabajar con la tarjeta de adquisición, para lo cual acondicionar significa:

- Amplificar.
- Aislar.
- Multicanalizar.
- Filtrar.
- Excitar.

Para el sistema de monitoreo virtual se encuentran disponibles 8 canales de entradas analógicas (para trabajar los 8 canales a la vez se hace necesaria una multiplexación por hardware o por software de dichos canales) el **SMVT** fue desarrollado para trabajar los 8 canales análogo/digitales.

Permite señales de no superiores a $\pm 5V$, con un ancho de banda de hasta 50 kHz. Para el análisis de las señales de vibración torsional que puede presentar el prototipo de medición, para lo cual este dispositivo tiene como salidas señales de 3.5V aproximadamente (del transductor óptico).

Por lo tanto dependiendo de las especificaciones de la tarjeta que forma parte del sistema de adquisición, se decide que tipo de acondicionamiento se debe realizar, o si no es necesario. En algunos casos los equipos de generación o tarjetas de propósito específico incluyen un pre-acondicionamiento que se construye introduciendo una etapa de filtrado por hardware que limita la señal a un ancho de banda adecuado (*filtro antialiasing*).

3.1.3. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Para el diseño y construcción de tarjetas de adquisición de datos es importante tener en cuenta los siguientes requerimientos generales mínimos

en el momento de escoger o diseñar la tarjeta para la implementarla a un sistema de adquisición, los cuales se mencionan a continuación:

- Número de canales: Determinar el número de señales de entrada y de salida tanto analógica como digital que se requieran en el sistema.
- Frecuencia de muestreo: Dependiendo del ancho de banda de las señales que analizará el sistema se busca la tarjeta que permita una correcta digitalización, cumpliendo con el teorema de Nyquist.
- Multicanalización: Implica el análisis de varias señales simultáneamente.
- Rango: Se refiere a los niveles mínimo y máximo de la señal y con los cuales dispone el conversor A/D de la tarjeta para determinar el rango dinámico (span) de trabajo del conversor.
- Resolución: Relacionado con el número de bits de los conversores.

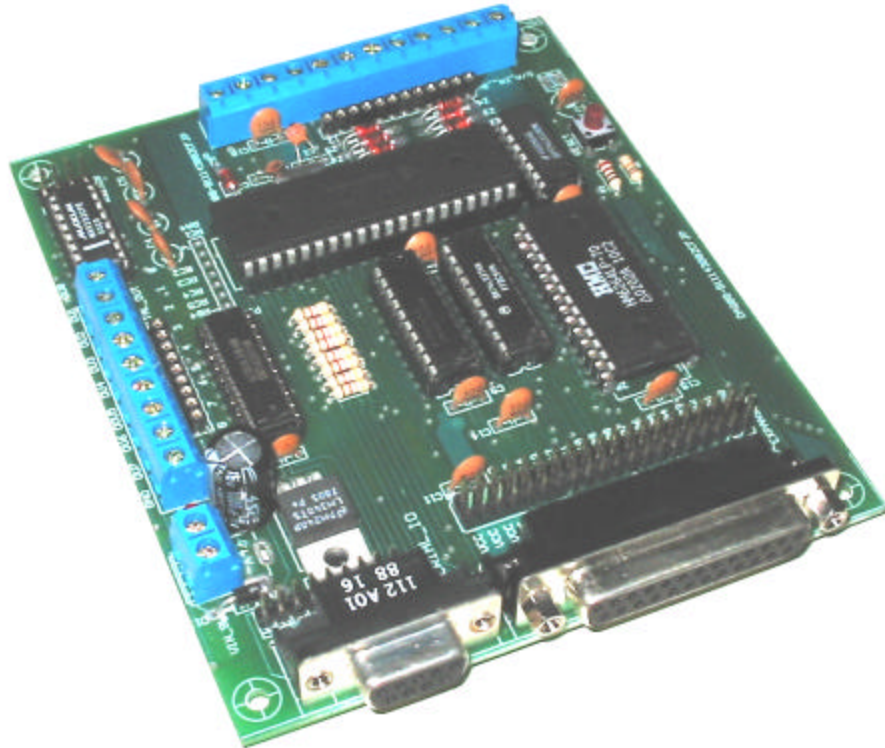
El rango y la resolución determinan los cambios mínimos de voltaje que detecta el conversor de la señal de entrada a la salida de este.

- *Limites de la señal*: Corresponden a los niveles mínimo y máximo de la señal que se desea digitalizar.
- *Opción de disparo (trigger)*: El software, por medio de un control booleano, da la opción de usar trigger durante la adquisición. Se debe determinar el canal por el cual entra la señal y el nivel de disparo.

3.1.3.1. Descripción de la Tarjeta DAC-08

Con base en los requerimientos anteriores, para el caso en particular fue necesario diseñar y construir una tarjeta que se adecuara a los requerimientos previamente establecidos para el prototipo construido en el proyecto anterior buscando de esta manera optimizar el funcionamiento del mismo y por ende mejorar la toma de datos del prototipo de experimentación. Básicamente el **SMVT** esta diseñado para trabajar con la tarjeta DAC-08, figura 41, diseñada específicamente para este caso y con la posibilidad de expansión de sus propiedades de adquisición.

Figura 41. Tarjeta de adquisición de datos.

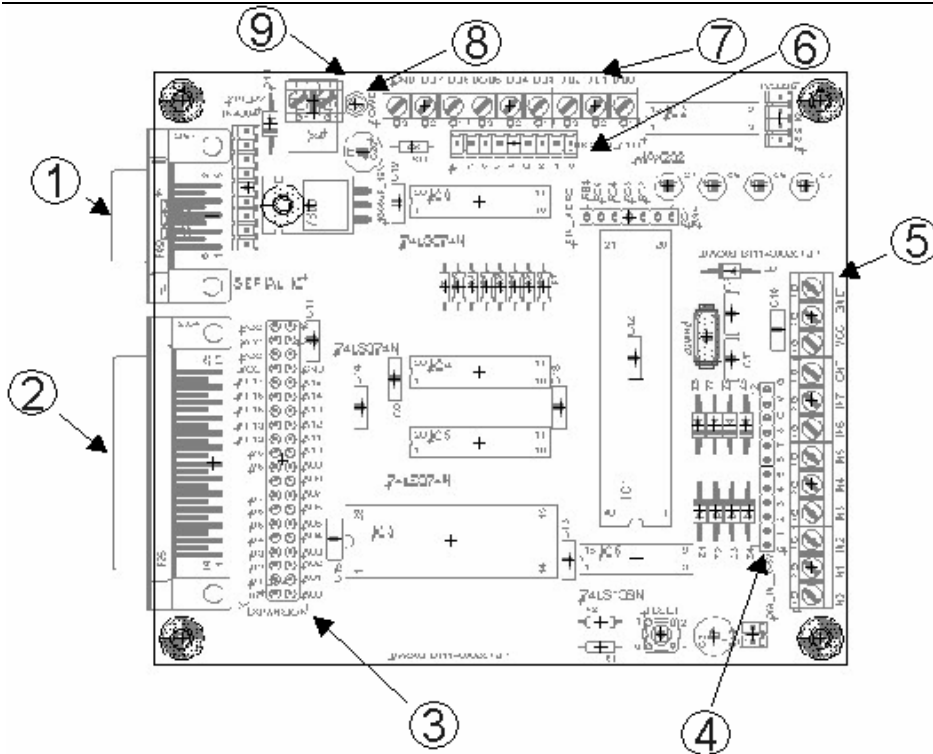


Las principales características son mencionadas a continuación:

- 8 Canales de entrada analógicos o digitales.
- 8 Canales de salida analógicos o digitales.
- 1 Contador de pulsos de 16 bits.
- 32Kbytes de RAM.
- Temporización exacta por hardware programable.
- Frecuencia de adquisición analógica de 38759,69 Muestras por segundo (Mps) a 8 bits
- Frecuencia de adquisición analógica de 25906,74 Mps a 10 bits.
- Frecuencia de adquisición digital de 38759,69 Mps
- Frecuencia de adquisición digital para cuatro canales de 69.900 Mps.
- Resolución de adquisición analógica conmutable entre 8 o 10 bits.
- Procesador independiente del PC.
- Interfaz serial RS232 o Paralela en modos SPP y EPP

- Librerías para programación en LabView 6.1
- Máxima frecuencia de muestreo: 64K muestras/seg.
- Voltaje de sobre protección tarjeta en funcionamiento: $\pm 35V$
- Voltaje de funcionamiento de la tarjeta inactiva: 9V

Figura 42. Distribución de componentes de la tarjeta.



1. Conector para cable serie.
2. Conector para cable paralelo.
3. Bus para expansión de memoria y funciones.
4. Bus de adquisición para cable plano.
5. Bus de adquisición para cables individuales.
6. Bus de salida digital para cable plano.
7. Bus de salida digital para cables individuales.
8. Led indicador de encendido.
9. Conector de alimentación de 9V.

3.1.3.2. Descripción detallada

1. Conector para cable serie.

Conector de 9 terminales hembra para comunicar la unidad DAC08 con otros dispositivos a través de la interfaz RS232.

2. Conector para cable paralelo.

Conector de 25 terminales hembra para comunicar la unidad DAC08 con el PC a través del puerto paralelo.

3. Bus para expansión de memoria y funciones.

Este bus es utilizado para conectar otras tarjetas al sistema DAC08 con el fin de expandir su capacidad de almacenamiento de datos, velocidad de adquisición o implementar funciones nuevas.

4. Bus de adquisición para cables pequeños y/o cable plano.

Conector para cables pequeños y/o cable plano en el bus de adquisición, sus terminales contemplan la misma configuración del bus de adquisición para cables gruesos.

5. Bus de adquisición para cables gruesos.

Este bus se usa para inyectar las señales analógicas o digitales que serán adquiridas, LAS SEÑALES DEBEN ESTAR EN EL RANGO DE 0 A 5 VOLTIOS PARA EVITAR POSIBLES DAÑOS AL SISTEMA DAC08 Y AL PC.

En la figura 43 se puede observar en detalle el bus de adquisición para cables individuales, a continuación se presenta una explicación de cada una de sus entradas:

6. Bus de salida digital para cables pequeños y/o cable plano.
 Conector para cables pequeños y/o cable plano en el bus de salida digital, sus terminales contemplan la misma configuración de Bus de salida digital para cables gruesos.

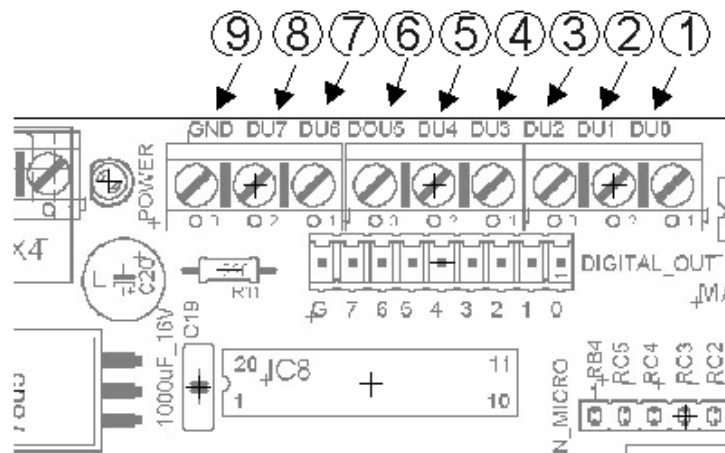
7. Bus de salida digital para cables individuales.
 Este bus proporciona la capacidad de generar señales se control a otros dispositivos, la salida puede ser uno o cero dependiendo de la configuración que se haga desde el software de control.

En la figura 44 se puede observa con más detalle este bus:

1-8: Salida digitales, su valor puede ser uno o cero lógico, su valor se programa desde el software de control en el PC.

9: GND tierra del sistema, las salida digitales están referenciadas a este pin, la carga en estos pines no debe ser mayor a 3 cargas TTL

Figura 44. Bus de salida digital para cables individuales.



8. Led indicador de encendido.

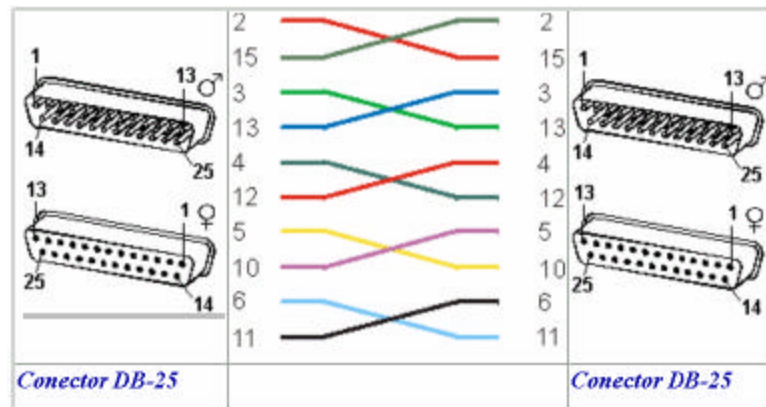
9. Conector de alimentación 9: Alimentación del sistema a 9v.

3.2. INTERFAZ DE CONEXIÓN

3.2.1. COMUNICACIÓN PUERTO PARALELO

Se puede encontrar el puerto paralelo en la parte posterior del PC, mediante un conector estándar de 25 pines hembra (ver figura 45), en el cual comúnmente se conecta una impresora o un escáner, este conector es el mismo para todos los computadores ya que está registrado bajo el estándar IEEE 1284-1994.

Figura 45. Conexión puerto paralelo del PC, DB25F.



En las máquinas modernas este puerto tiene la capacidad de trabajar en 4 modos diferentes, los cuales son en su orden de capacidad de menor a mayor: Modo Centronics, Modo SPP, Modo EPP, y Modo ECP.

Cada modo puede ser configurado por medio del BIOS o usando el software adecuado. Los registros necesarios para realizar esta operación pueden encontrarse en las direcciones 2Fah, 3f0h y 3F1h pero este no es un buen camino para realizar esta tarea, ya que las direcciones de estos registros no son un estándar, así que el software desarrollado podría no ser de utilidad en algunas máquinas.

Un mejor camino para configurar el modo de operación del puerto paralelo es el Registro de Control Extendido (ECR) el cual se encuentra en la dirección Base+402h; este es un registro extra implementado en el Puerto paralelo de Capacidades Extendidas (ECP) el cual está estandarizado bajo el “*Microsoft’Extended Capabilities Port Control and ISA interface Estándar*”.

En este caso la tarjeta es externa al PC, donde se encuentra encapsulada (en una caja) y se conecta luego al puerto paralelo.

3.2.2. COMUNICACIÓN PUERTO SERIAL

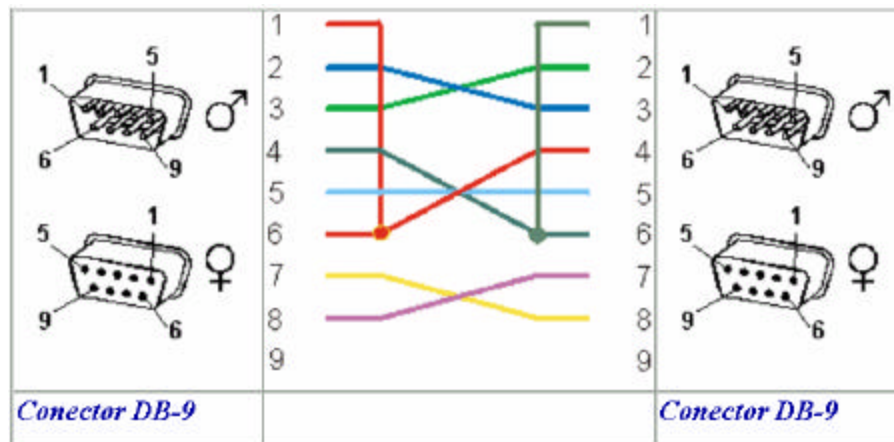
El puerto serie RS-232C, presente en todos los PCs actuales, es la forma mas comúnmente usada para realizar transmisiones de datos entre computadores. Este consiste de un conector tipo *DB-9* de 9 pines, aunque es normal encontrar la versión de 25 pines *DB-25*, es mas barato e incluso mas extendido para cierto tipo de periféricos. En cualquier caso, los PCs no suelen emplear más de 9 pines en el conector *DB-25*. Las señales con las que trabaja este puerto serie son digitales, de +12V (0 lógico) y -12V (1 lógico), para la entrada y salida de datos y a la inversa en las señales de control. El estado de reposo en la entrada y salida de datos es -12V. Dependiendo de la velocidad de transmisión empleada, es posible tener cables de hasta de 15 metros. Cada pin puede ser de entrada o de salida, teniendo una función específica cada uno de ellos. Las más importantes se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Descripción de los pines del conector serial.

# PIN	TIPO PIN	E/S	FUNCIÓN
3	TXD	S	Transmitir Datos
2	RXD	E	Recibir Datos
4	DTR	S	Terminal de Datos Listo
6	DSR	E	Equipo de Datos Listo
7	RTS	S	Solicitud de Envío
8	CTS	E	Libre para Envío
1	DCD	E	Detección de Portadora

Las señales TXD, DTR y RTS son de salida, mientras que RXD, DSR, CTS y DCD son de entrada. La masa de referencia para todas las señales es SG (Tierra de Señal, pin 5). Finalmente, existen otras señales como RI (Indicador de Llamada, pin 9) y otras poco comunes.

Figura 46. Interconexión puerto serie del PC, DB9.



3.3. CONFIGURACIÓN LOGICA DEL SISTEMA.

Es el encargado de administrar los recursos físicos incluido el sistema de adquisición. Con el se puede realizar un análisis adecuado a las señales que llegan a la tarjeta.

Para el desarrollo del proyecto se utilizó LabVIEW versión 6.1 como software encargado del manejo de la tarjeta DAC-08 en la implementación del sistema de monitoreo virtual.

Es importante resaltar que la programación grafica en LabVIEW (lenguaje G), permite enfocarse en el desarrollo de una aplicación en lugar de invertir tiempo en el proceso de programación, como sucede con lenguajes de alto nivel como C, C++, Visual Basic, o Matlab, entre otros.

Los programas diseñados en LabVIEW son llamados instrumentos virtuales (Virtual Instruments, VIs) debido a su apariencia y operación similares a las de un equipo real.

La interfase del usuario con el VI se llama panel frontal (simula el panel de un instrumento físico). Es decir, es donde el usuario puede manejar y manipular el sistema.

Otro concepto que se debe tener muy en claro al trabajar con LabVIEW es el de diagrama de bloques, que es simplemente el código fuente del programa. Basado en programación gráfica, el diagrama de bloques es donde el VI recibe las instrucciones.

3.3.1. Sub VI DAC08

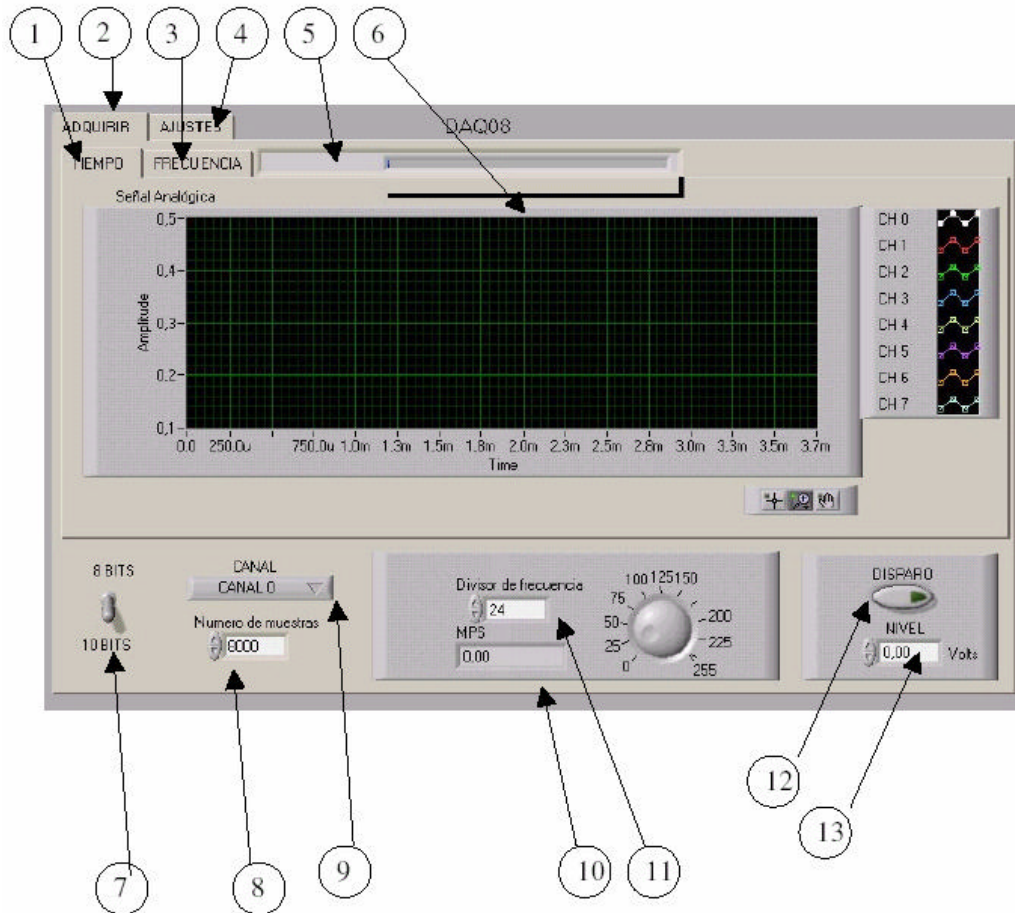
El sistema DAC08 incluye una librería para programación en LabView 6.1, esta librería puede ser usada para crear aplicaciones de adquisición y/o control usando el sistema DAC08.

La Librería contiene el VI DAC08 el cual puede ser fácilmente usado como subVI. Utilizando este VI se logra una completa configuración y control del sistema DAC08.

3.3.1.1. Descripción del panel frontal.

A continuación se presenta una completa descripción del panel frontal del VI DAC08.

Figura 47. Descripción del panel frontal.



1. Tab para selección y visualización de datos adquiridos en el dominio del tiempo.
2. Tab para seleccionar el panel de adquisición.
3. Tab para selección y visualización de datos adquiridos en el dominio de la frecuencia.
4. Tab para seleccionar el panel de ajustes.
5. Indicador del estado de la adquisición.
6. Gráfica de los datos adquiridos.
7. Sector de resolución de adquisición
8. Control para ajuste del número de datos a adquirir.
9. Selector de canal y modo de adquisición.
10. Indicador de la frecuencia de adquisición.

11. Control para divisor de frecuencia.
12. Activador de disparo por flanco.
13. Ajuste del nivel de disparo.

3.3.1.2. Descripción detallada del VI.

1. Tab para seleccionar la visualización de datos adquiridos en el dominio del tiempo.

Este tab en conjunto con el del numeral 3 permiten alternar el modo de visualización entre el dominio de tiempo y frecuencia.

En el dominio del tiempo aparecerán en el eje “x” tiempo en segundos [s] y en el eje “y” la amplitud en voltios [V], en el dominio de la frecuencia se observará el “power spectrum” de la señal.

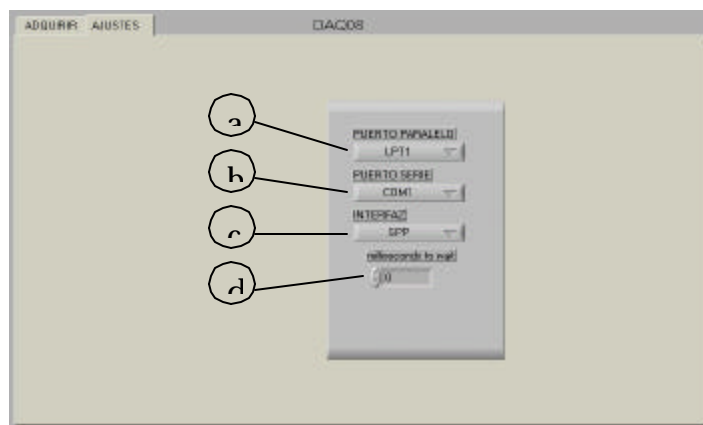
2. Tab para seleccionar el panel de adquisición.

Este tab en conjunto con el del numeral 4 permite alternar entre el panel de ajustes y el panel de adquisición el cual se presenta en la figura 48.

Desde el panel de adquisición es posible preparar y realizar cualquiera de los tipos de adquisición disponibles en el sistema DAC08

3. Tab para seleccionar la visualización de datos adquiridos en el dominio de la frecuencia. Ver numeral 1.
4. Tab para seleccionar el panel de ajustes.

Figura 48. Tab de selección del panel de ajuste.



- a. Menú para selección del puerto paralelo en el cual se encuentra conectado el sistema DAC08.

Este menú permite seleccionar entre LPT1, LPT2 o LPT3 cuando el sistema esta conectado a través del puerto paralelo del PC

- b. Menú para selección del puerto serie en el cual esta conectado el sistema DAC08.

Este menú permite seleccionar el puerto COM utilizado cuando el sistema esta conectado al PC a través del puerto serie.

- c. Modo de interfaz: SPP, EPP.

- d. Ajuste que introduce un retardo en los tiempos de acceso al puerto, puede ser necesario incrementarlo a 1 para PCs muy rápidos o para puertos muy lentos.

5. Indicador del estado de la adquisición.

Indica el estado de la adquisición y da un estimativo aproximado del progreso de la adquisición.

6. Gráfica de los datos adquiridos.

Representación gráfica de los datos adquiridos, esta representación puede ser en el dominio del tiempo o de la frecuencia dependiendo los tabs de los numerales 1 y 3, o puede ser digital dependiendo del tipo de adquisición seleccionada (ver numeral 9).

7. Sector de resolución

Permite seleccionar la resolución usada para a digitalización de los datos a 8 o 10 bits.

Una resolución mayor en ciertos casos puede ofrecer una mejor descripción del fenómeno físico o señal analizada pero tardara más tiempo y ocupara mas espacio en memoria

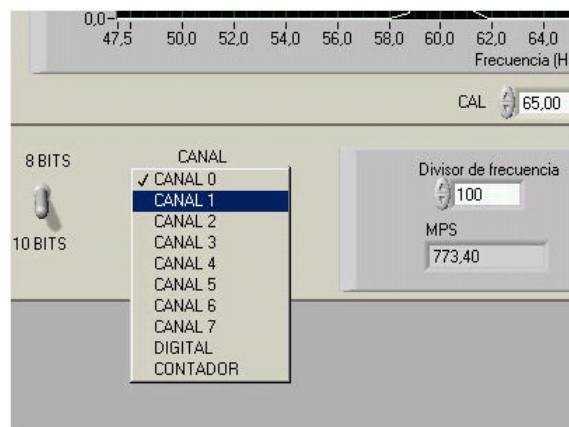
8. Control para ajuste del número de datos.

Permite escribir el número de datos que serán adquiridos por el sistema, el valor máximo depende de la memoria instalada en el sistema DAC08.

9. Selector de canal y modo de adquisición.

Como se muestra en la figura 6 desde este menú es posible seleccionar uno de los 8 canales disponibles para digitalización de datos analógicos o seleccionar el modo de adquisición digital o el modo de adquisición de contador.

Figura 49. Selector de canal y modo de adquisición.



10. Indicador de la frecuencia de adquisición

Dependiendo del valor introducido en el divisor de frecuencia mostrara la frecuencia de adquisición resultante.

11. Control para divisor de frecuencia.

Controla el periodo entre la toma de cada muestra según la siguiente expresión:

$$\text{Periodo} = (12.8 \times 10^{-6}) * (\text{Divisor de frecuencia}) + 200 \times 10^{-9} * (CaI)$$

donde *CaI* es el valor de calibración que depende del modelo del sistema DAC08 y el valor máximo para el divisor de frecuencia es 255 y el mínimo es 1.

12. Activador de disparo por flanco.

Activando este control el sistema espera hasta detectar un nivel específico de la señal de entrada para iniciar la adquisición, este modo disparo es ideal para la captura de señales transitorias.

13. Ajuste del nivel de disparo.

Ajusta el nivel de voltaje que se esperara en la entrada par iniciar el ciclo de adquisición (Si el disparo (Trigger) esta activado), el rango del disparo es entre 0 y 5V.

3.3.1.3. Configuración del VI.

Los siguientes son los pasos para conectar y configurar correctamente el sistema DAC08 cuando se encuentra conectado a un PC.

1. Conecte el sistema al computador a través del puerto paralelo, puerto serie o ambos a la vez usando los cables suministrados.
2. Conecte el sistema DAC08 a la fuente de 9 voltios 1mA suministrada, con aislamiento de la red de AC.
3. Cargue el VI "DAC08.vi" de la librería "dac08.llb" que se encuentra en el CD adjunto.
4. Haga clic en el Tab para seleccionar el panel de ajustes
5. Si el sistema se encuentra conectado al PC a través del puerto paralelo seleccione en el menú "INTERFAZ" EPP o SPP y en el menú "PUERTO PARALELO" el puerto LPT correspondiente.
6. Si el sistema se encuentra conectado al PC a través del puerto serie seleccione en el menú "INTERFAZ" RS232 y en el menú "PUERTO SERIE" el COM correspondiente.
7. El control "milliseconds to wait" puede inicialmente ajustarse en cero y en caso de problemas de comunicación incrementarse a 1.

3.3.1.4. Modos de Adquisición de Datos

El sistema DAC08 permite los modos de adquisición Analógico, Digital, y tipo conteo con y sin buffer, los modos con buffer permiten una exacta temporización del periodo de adquisición pero un limitado numero de datos por ciclo, los modos sin buffer permiten un ilimitado numero de datos por ciclo de adquisición pero no ofrece control sobre el periodo de adquisición y su velocidad es inferior a los modos con buffer y altamente dependiente de la velocidad de transmisión de datos a través del puerto.

➤ ADQUISICIÓN CON BUFFER

- **Adquisición de datos analógicos.**

El sistema DAC08 soporta adquisición de datos analógicos a 8 y 10 bits de resolución con frecuencias de adquisición de hasta 38759,69 Muestras por segundo (Mps) a 8 bits y 25906,74 Mps a 10 bits.

Para iniciar una adquisición de datos analógicos siga los siguientes pasos:

1. Suministre la señal a adquirir por uno de los 8 canales analógicos.
2. Ajuste en el "Selector de canal y modo de adquisición" el canal por el cual se esta suministrando la señal.
3. Ajuste en el "Selector de resolución" la resolución a 8 o 10 bits según se desee.
4. En el "Control para ajuste del numero de datos" escriba el número de datos que desea obtener.
5. Ajuste el "Control para divisor de frecuencia" para obtener la frecuencia de adquisición deseada.
6. Active el control de disparo si desea capturar señales transitorias o sincronizar señales periódicas.
7. Ajuste el nivel de disparo, en caso de haberlo activado.
8. Inicie la adquisición.

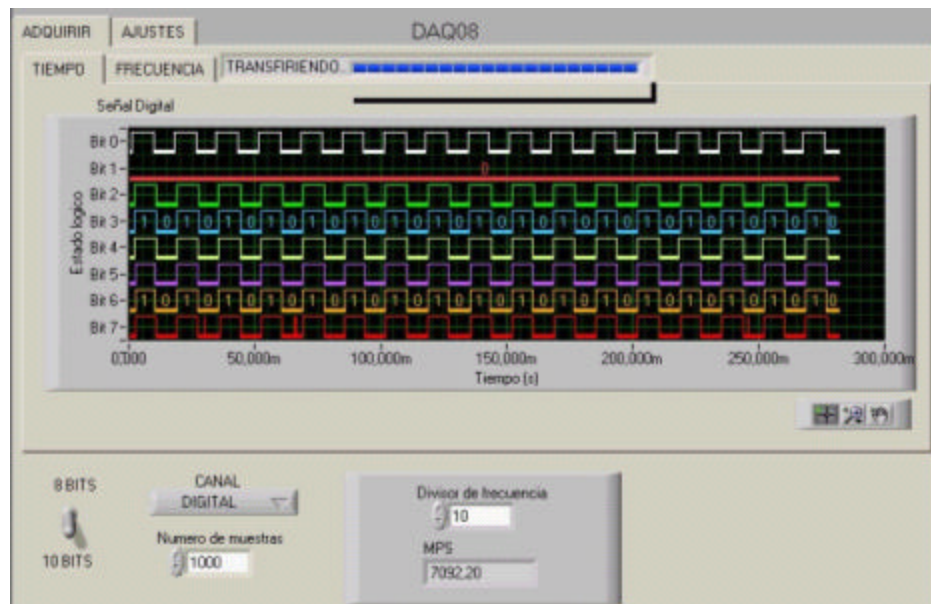
- **Adquisición de datos digitales.**

El sistema DAC08 soporta adquisición de datos digitales simultáneamente por 8 canales con una frecuencia de adquisición máxima de 38759,69 Mps como se puede observar en la figura 50.

Para iniciar una adquisición de datos analógicos siga los siguientes pasos:

1. Suministre de una a ocho señales digitales por los puertos de entrada.
2. Ajuste en el “Selector de canal y modo de adquisición” en el modo DIGITAL
3. En el “Control para ajuste del numero de datos” escriba el número de datos que desea obtener por cada canal.

Figura 50. Panel de adquisición de datos digitales.



4. Ajuste el “Control para divisor de frecuencia” para obtener la frecuencia de adquisición deseada.
5. Inicie la adquisición.

- **Adquisición tipo conteo.**

El sistema de adquisición DAC08 soporta adquisición tipo conteo en la cual se cuentan los pulsos suministrados por el canal contador, el contador del sistema cuenta desde cero (0) hasta 65535 y luego reinicia el conteo, el valor de 16 bits del contador se captura a intervalos exactos determinados por la frecuencia de adquisición ajustada.

Para iniciar una adquisición de datos tipo conteo siga los siguientes pasos:

1. Suministre la señal digital a contar por el canal del contador.
2. Ajuste en el “Selector de canal y modo de adquisición” en el modo “CONTADOR”
3. Ajuste en el “Selector de resolución” la resolución a 10.
4. En el “Control para ajuste del numero de datos” escriba el número de datos que desea obtener.
5. Ajuste el “Control para divisor de frecuencia” para obtener la frecuencia de adquisición deseada.
6. Inicie la adquisición.

➤ **ADQUISICIÓN SIN BUFFER**

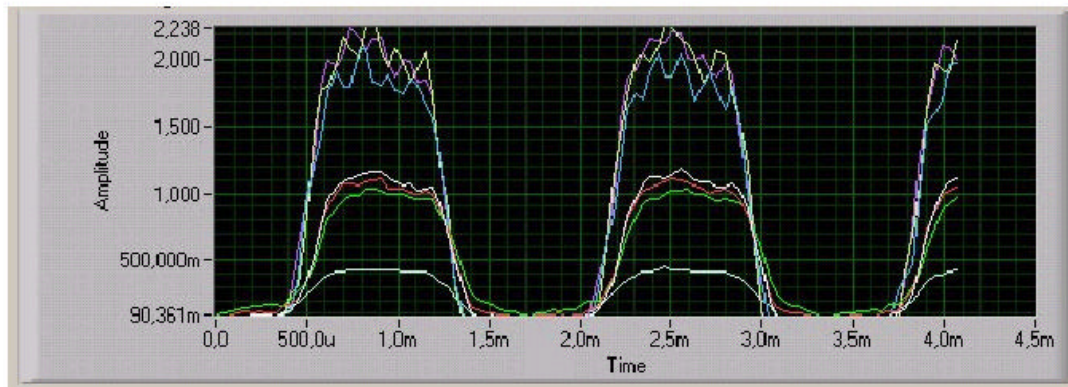
Este tipo de adquisición no esta desarrollada en la tarjeta pero se puede implementar más adelante.

3.3.1.5. Adquisición cíclica de datos analógicos

Modo de adquisición de datos analógicos que permite capturar casi simultáneamente los 8 canales de entrada mediante el método de barrido el cual consiste en que en cada periodo de adquisición se toma un dato cada uno de los 8 canales multiplexando en el tiempo.

En la figura 50 se puede observar el resultado del muestreo cíclico.

Figura 51. Captura en modo cíclico.



Cuando realice adquisición cíclica tenga en cuenta los siguientes tips.

Los valores escritos en el divisor de frecuencia deben ser múltiplos de 8, otros valores no tiene efecto y entorpecen el análisis espectral.

La frecuencia más alta a la que es posible, capturar los 8 canales en modo cíclico es de 2431.91 muestras por segundo por cada canal, así que el mínimo valor que se debe escribir en el divisor de frecuencia es 24.

En modo cíclico se almacenan 8 veces más datos en memoria que en el modo de un solo canal, tenga en cuenta esto para no desbordar la capacidad de memoria del sistema, por ejemplo si su sistema es de 32K , el máximo numero de datos a adquirir por canal es de 4000 en 8 bits y 2000 en 10 bits.

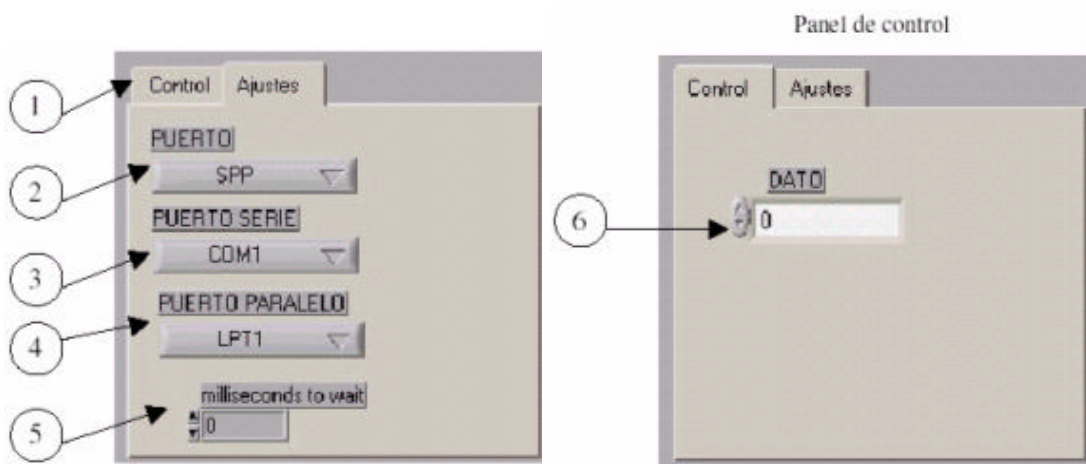
Si se desea activar el disparo en modo cíclico, la señal de que proporcionara el disparo debe ser suministrada por el canal 7.

3.3.2. Sub VI Digital out

3.3.2.1. Descripción del panel frontal del VI digital out

Este subVI se usa para poner datos en el puerto de salida digital del sistema DAC08, a continuación se muestran sus principales partes

Figura 52. Panel de ajustes y control.



1. Lengüeta para selección de paneles.
2. Ajuste del modo del puerto paralelo.
3. Ajuste del COM para el puerto serie.
4. Ajuste del LPT para el puerto paralelo.
5. Retardo.
6. Control de dato a escribir.

3.3.2.2. Descripción detallada del VI digital out

1. Lengüeta para selección de paneles.
Permite seleccionar entre el tab para configurar el VI y el tab para operar el VI.
2. Ajuste del modo del puerto paralelo.
Permite seleccionar el modo de trabajo del puerto paralelo
3. Ajuste del COM para el puerto serie.
Permite seleccionar el puerto COM en el cual se encuentra conectado el sistema cuando se está usando el puerto serie como interfaz.
4. Ajuste del LPT para el puerto paralelo.

Permite escoger entre los puertos LPT1, LPT2 o LPT3 dependiendo de en el cual se encuentra conectado el sistema cuando se está usando el puerto paralelo como interfaz.

5. Retardo.

Incluye un retardo por software cuando el PC es muy rápido y/o hay problemas en la comunicación

6. Control de dato a escribir.

En este recuadro se escribe el dato que aparecerá en el puerto digital del sistema DAC08 cuando el VI es ejecutado.

3.3.2.3. Escritura en el puerto con el VI digital out

El uso del VI digital out es sumamente elemental, para poner un dato en el puerto digital de salida del sistema DAC08 siga los siguientes pasos:

1. Ajuste los parámetros según el puerto e interfaz que se esta usando
2. Escriba en el panel de control el dato que desea escribir y ejecute el VI

4. PROGRAMACIÓN EN LABVIEW

Puesto que este proyecto conforma, en general, un sistema de adquisición de datos desarrollado en LabVIEW, en este capítulo se resalta la filosofía del programa, la cual proporciona la ventaja de enfocarse en desarrollar la aplicación, en lugar de invertir tiempo en la mecánica de la programación. Además se presenta una descripción básica de las partes que forman un sistema de adquisición en general y específicamente de las etapas que posee el sistema de monitoreo virtual, así como de su panel frontal.

En el capítulo 2, se dieron algunos conceptos importantes a tener en cuenta para la implementación sistema de medición de vibración torsional. El software utilizado para el diseño del sistema de monitoreo es LabVIEW; un software especializado basado en la programación gráfica. Este capítulo se

presenta un primer paso de los diferentes instrumentos virtuales básicos desarrollados en LabVIEW* que permiten por medio de una tarjeta de adquisición de datos realizar funciones básicas de filtrado, ventaneo, análisis espectral mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), almacenamiento, visualización y reconstrucción de las señales que sean admisibles para el sistema de medición.

4.1. PRECONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES A ADQUIRIR.

Para el procesamiento digital se requiere de una tarjeta de adquisición (descrita a fondo en el capítulo anterior) que convierta la señal analógica en digital para su posterior análisis. LabVIEW posee instrumentos virtuales**, que trabajan en conjunto con la tarjeta de adquisición de datos para realizar la digitalización; generalmente estos VIs están ubicados en el menú de funciones en el icono *Data Acquisition*. Allí se encuentran los VIs para canales de entrada analógicos, canales de salida analógicos, entradas/salidas digitales, contadores, temporizadores, calibración, configuración y acondicionamiento de señales, los cuales se muestran más adelante.

Se debe escoger que las frecuencias de muestreo cumplan con el criterio de Nyquist (superior a dos veces la máxima frecuencia de la señal a la cual se va a muestrear), para obtener una señal correctamente discretizada.

Un concepto muy importante a la hora de construir un sistema de adquisición virtual es la elección adecuada de la velocidad de muestreo, lo que permite realizar una correcta digitalización de la señal. La velocidad o frecuencia de muestreo debe ser igual o mayor a dos veces la máxima componente en frecuencia presente en la señal. En el proyecto realizado anteriormente se calculó una frecuencia máxima para el prototipo de medición de 133.33 Hz,

mientras que para el nuevo sistema se puede elegir una frecuencia de muestreo muy superior que la frecuencia de la onda que se desea digitalizar. Es importante que en la gráfica de tiempo se lleve a cabo un correcto muestreo de la señal, de esta manera se garantiza su posterior reconstrucción.

Puesto que:

$$f_{digital} = \frac{F_{analógica}}{F_{muestreo}} \quad (4.1)$$

4.1.1. FILTRADO

Un tipo de operación muy importante en el análisis de señales es el filtrado; donde para este propósito LabVIEW presenta diferentes tipos de filtros FIR e IIR, como Bessel, Chebyshev, Butterworth, Eliptico, Equi-Ripple, cada uno de ellos con la opción de pasa altos, pasa bajos, banda de paso y banda de rechazo.

Para el correspondiente filtrado de las señales en particular se creó un filtro aparte del filtro de Bessel ya que este no mostraba una digitalización adecuada de la señal, por lo cual se implementó un filtro pasa bajos de orden 5, con el que evidentemente se obtuvo una excelente visualización de la señal y el cual garantiza que los armónicos sean eliminados.

Es importante resaltar que en LabVIEW la frecuencia de corte alto de un filtro pasa bajos se introduce por F_L . Además se debe asegurar que la frecuencia de muestreo utilizada para adquirir la señal debe ser la misma de la entrada F_s del filtro. Para el correcto funcionamiento del filtro se debe tener en cuenta el criterio de Nyquist, con lo cual se asegura el correcto funcionamiento del filtro.

$$0 \quad F_L \quad 0.5 F_s \quad (4.2)$$

4.1.2. ANALISIS FRECUENCIAL UTILIZANDO LA FFT

El análisis frecuencial comprende la construcción de diferentes aplicaciones en las cuales el procesamiento digital ofrece la FFT como herramienta fundamental en la determinación del espectro, tanto en frecuencia como en potencia, para el análisis en el dominio de la frecuencia de señales que se quieran monitorear en el **SMVT**. LabVIEW dispone de una librería de análisis, con varios instrumentos virtuales que implementan la FFT para el cálculo del espectro en amplitud y fase, como lo es el power spectrum.

Analíticamente los coeficientes de Fourier se calculan con las siguientes formulas:

$$a_0 = \frac{A}{T_p} \int_{-t/2}^{t/2} x(t) dt = \frac{A t}{T_p} \quad (4.3.) \text{ y } (4.4)$$
$$a_k = \frac{A}{T_p} \int_{-t/2}^{t/2} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$$

Si escoge el ancho del pulso:

$$\frac{t}{2} = \frac{T_p}{4} \quad (4.5)$$

se obtiene finalmente:

$$a_0 = \frac{A}{2} \quad (4.6) \text{ y } (4.7)$$
$$a_k = \frac{2A \text{sen}(k\mathbf{p}/2)}{k\mathbf{p}}$$

Luego para calcular la FFT de un manera más rápida y eficiente se utiliza el **power spectrum.vi**, ya que este subVI proporciona el espaciamiento en frecuencia (df) necesario para la construcción de la gráfica de la amplitud espectral de la señal.

En el análisis teórico para un tren de pulsos, se supone que la señal está definida, dentro de un marco ideal, así que es lógico, que en la práctica estos datos no sean posibles de obtener, por lo tanto al tener un número finito de datos se presenta *aliasing* que es ésta una causa de que el espectro encontrado presente diferencias con respecto al teórico.

4.1.3. VENTANEO EN EL DOMINIO DE TIEMPO

Generalmente al adquirir una señal se presenta el problema de no poder tomar siempre periodos completos. Esto afecta en gran parte el cálculo del espectro de potencia de la señal. Una forma de resolver este problema, en gran proporción, es utilizando ventanas. Las ventanas se encargan de “suavizar” las posibles discontinuidades de la señal adquirida; esto hace que la no periodicidad de una señal sea compensada con la reducción de las discontinuidades.

Una forma de comprobarlo es digitalizando una señal senoidal, de una frecuencia específica y con un número no entero de periodos. Se construye un instrumento virtual que permite analizar la señal espectral con o sin ventana. Las ventanas disponibles son:

Rectangular, Hanning (Han), Hamming, Blackman-Harris, exact Blackman, Blackman y Flat Top; de las cuales las de mejor desempeño en vibración son Han y Flat Top en su orden.

4.2. RECONSTRUCCION DE LA SEÑAL A PARTIR DE SU ESPECTRO DE AMPLITUD Y FASE.

La reconstrucción de una señal se puede realizar de dos maneras:

- *Reconstrucción Total:* Se logra a partir de todos los componentes de su espectro de frecuencia. Este proceso se lleva a cabo mediante la

Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT), de esta forma no se pierde ningún componente de frecuencia en su reconstrucción.

- *Reconstrucción Parcial:* Se logra teniendo en cuenta solo algunos armónicos del gran total que componen el espectro de frecuencia. En particular este proceso permite tener una señal muy similar a la original con solo el fundamental y los siguientes armónicos de mayor potencia del espectro de frecuencia. Se lleva a cabo cuando se necesita mayor rapidez en el proceso de reconstrucción. Tanto la amplitud como la fase son de extrema importancia para la reconstrucción de la señal.

El uso de la Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT) en el análisis del procesamiento digital de señales es una herramienta de importante ayuda en la verificación del correcto funcionamiento del **SMVT** que se va a implementar.

Además de las anteriores herramientas, LabVIEW presenta “librerías de análisis frecuencial” con las cuales existe la posibilidad de crear instrumentos virtuales que realicen un adecuado procesamiento digital en sistemas complejos de adquisición de datos basados en un PC.

4.3. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DE *TORSIOLAB*

El SMVT esta compuesto por los sensores ópticos, sistema electrónico de adquisición (caja electrónica) complementado por el computador y su software de funcionamiento correspondiente para el análisis y procesamiento de los datos.

La primera parte del software es la encargada de la programación del sistema electrónico (tarjeta de adquisición), para su correspondiente

acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores, para luego enviarlas al computador donde son procesadas y analizadas para ser presentadas en gráficos en función del tiempo y frecuencia; a manera de instrumentos virtuales presentados en el monitor del computador mediante el software desarrollado para el monitoreo del hardware del **SMVT**, como es **TORSIOLAB**. El esquema de jerarquía de la programación del software es mostrado en el Anexo C.

4.3.1. AMBIENTE.

El programa básicamente se realizó en código G de **LabVIEW 6i**. Creándose un archivo ejecutable con el nombre de **TORSIOLAB**, para mayor facilidad a la hora de poner en funcionamiento el programa en diferentes equipos donde se quiera trabajar.

4.3.2. ALMACENAMIENTO DE ARCHIVOS

Las señales digitalizadas del tren de pulsos se puede almacenar y leer para realizar un análisis posterior en el tiempo y la frecuencia, aprovechando así una de las ventajas más importantes del procesamiento digital, con lo cual se puede sacar un reporte de medición mediante la opción disponible en el lado izquierdo del panel de control ya sea de tipo html o .Doc (“prueba1.html”).

Figura 53. Icono para adquirir reportes de medición.



4.3.3. REQUERIMIENTOS.

Como se mencionó anteriormente el programa presenta requerimientos mínimos de software. Para lo cual se requiere un computador para instalar LabVIEW, bajo un sistema operativo Windows 3.1 ó Windows NT en adelante.

Estos sistemas operativos implican las siguientes características físicas mínimas del computador:

- PC IBM compatible.
- Procesador Pentium II o superior.
- Memoria RAM de 8 Mb o superior.
- Disco duro: 1 Gb o superior.

4.3.4. UTILIDADES

TORSIOLAB es el software desarrollado para el control del hardware (caja electrónica) del **SMVT** así como para el procesamiento adecuado de los datos adquiridos durante las mediciones y la presentación en el monitor del computador de la información referente a la vibración torsional.


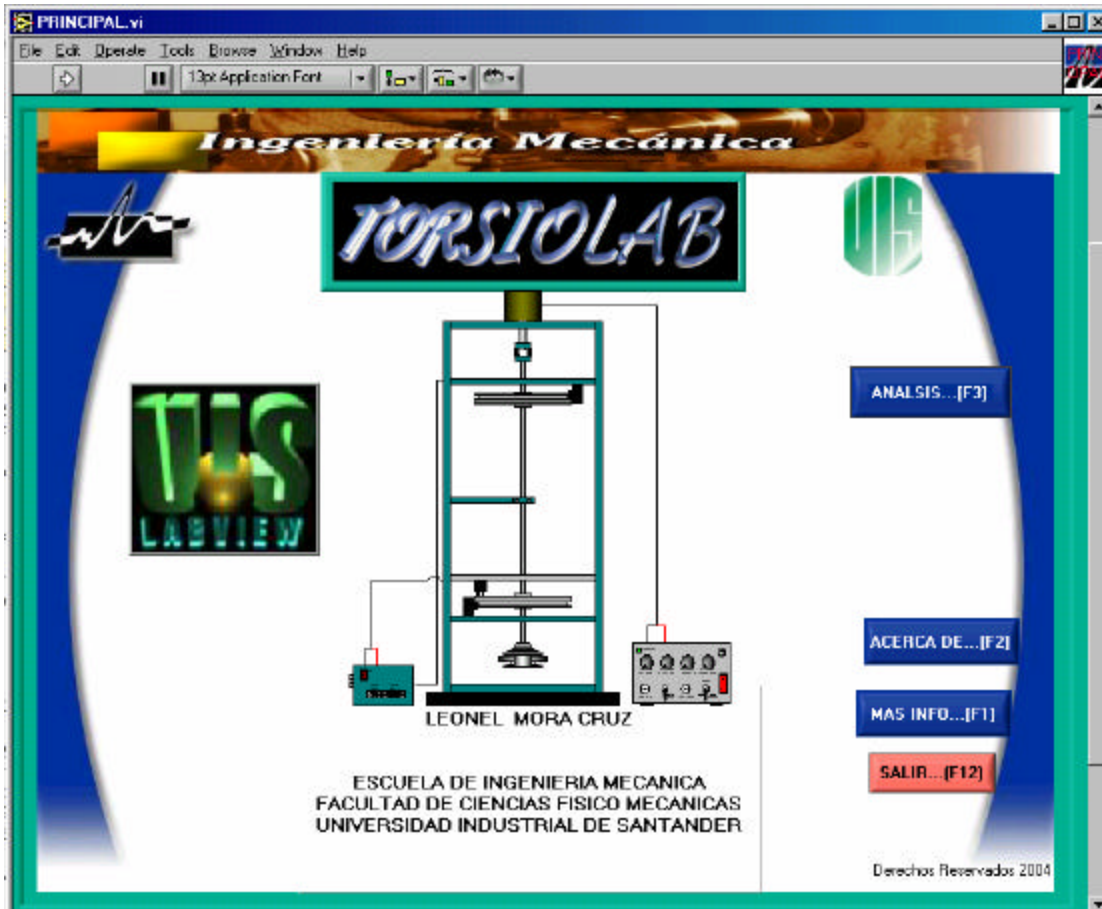
Para acceder al programa ingrese al explorador y haga doble clic en el archivo ejecutable TORSIOLAB, e inmediatamente accede a la ventana de utilidades principales del programa, luego presione  para correr el programa (Ver figura 54).

Figura 54. Menú principal de **TORSIOLAB**.



- **ACERCA DE...** Muestra información referente a los derechos de propiedad intelectual del autor. Y se puede acceder presionando el icono Acerca de... o por medio de la tecla F2 del teclado.
- **MAS INFO...** Muestra información referente a la vibración torsional como medio de ayuda para clarificar los conceptos de vibración. Se puede acceder presionando el icono Más info... o por medio de la tecla F1.
- **SALIR.** Esta opción permite salir del programa TORSIOLAB, presionando directamente el icono Salir o la tecla F12 del teclado.

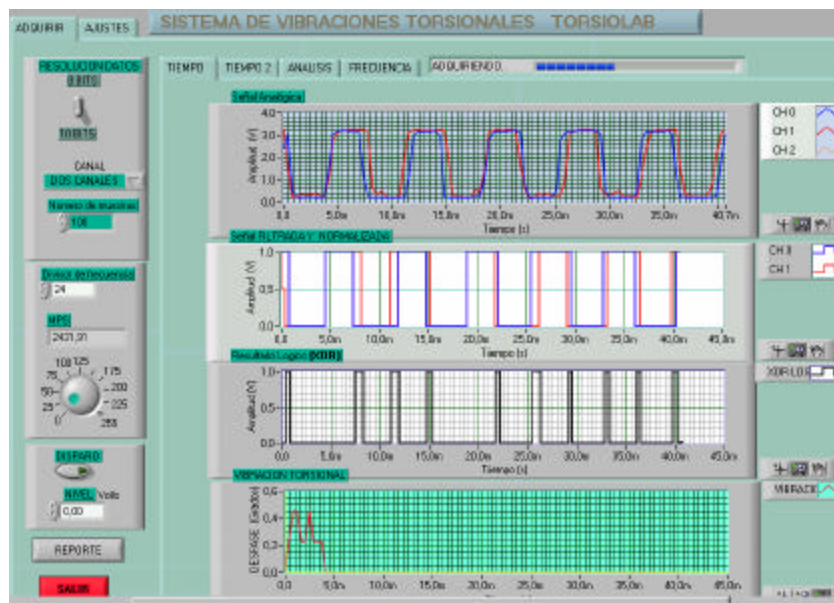
Es importante que al elegir la opción Salir se haya guardado la información de la medición mediante la opción INFORMES previamente mencionada.

- **ANALISIS.** Se puede acceder a dicha ventana presionando el icono análisis o también la tecla F3.

ADQUIRIR: Esta opción es la más importante de todas ya que es aquí donde se encuentran las funciones de resolución (8-10 bits), canales de adquisición de datos de los sensores (canal 0,1,2,1y2, etc.), número de muestras a tomar, divisor de frecuencia, reportes, trigger, paneles de presentación de graficas en función del tiempo (oscilogramas) y frecuencia (espectros) y la opción de salir de esa ventana para regresar al menú principal.

- **REPORTE.** Muestra cada uno de los gráficos correspondientes a la medición de vibración torsional en función del tiempo y frecuencia en un archivo Html o .Doc.

Figura 55. Panel principal de análisis de datos, ADQUIRIR.



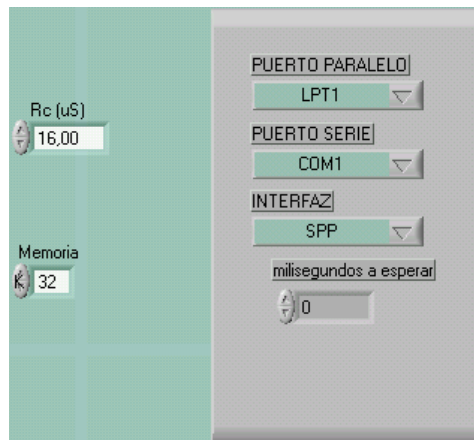
El usuario puede ajustar mediante los controles, mostrados en el siguiente panel frontal, el tipo de análisis que se llevará a cabo en la digitalización y el correspondiente canal por el cual se recibe la señal proveniente de los sensores del prototipo de medición. Además se puede definir la frecuencia de muestreo (divisor de frecuencia), el número de muestras que se desean observar de la señal (Mps), la resolución (8-10 Bits) y el nivel de disparo fijado en 4V.

Figura 56. Controles del panel frontal de adquisición.




AJUSTES. Esta opción permite seleccionar el puerto y la interfaz de conexión respectivamente ya sea el puerto paralelo LPT1, LPT2 (SSP, EPP) y puerto serie COM1, COM2...(RS232), como se muestra en la figura siguiente.

Figura 57. Panel de ajustes del menú análisis.

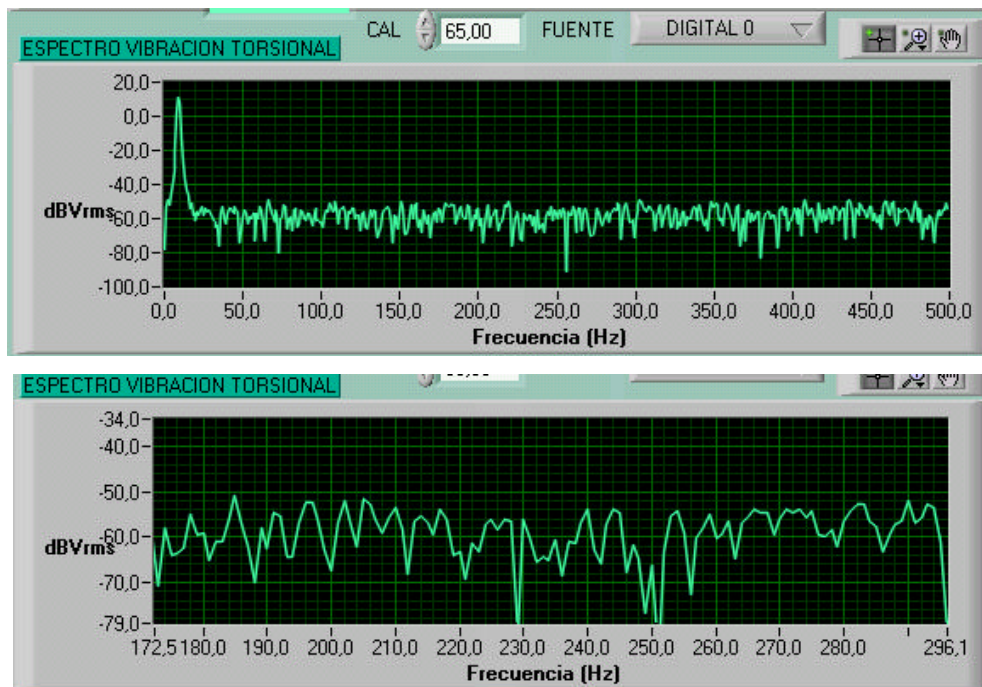


4.3.5. Modificación de los gráficos.

Todos los gráficos presentados en los paneles virtuales tienen la opción de modificación mediante iconos colocados al lado derecho con lo cual se aumenta o se disminuye la escala de los gráficos (ZOOM) .

Se puede hacer seleccionando el icono luego buscar la parte del gráfico que desea ampliar o reducir, o cambiar directamente la escala en el gráfico.

Figura 58. Modificación de graficas



4.3.6. Mensajes de Error.

ERROR EN LA TRANSMISIÓN: Este mensaje generalmente aparece cuando no se ha conectado correctamente los dispositivos en la caja electrónica.

En modo cíclico los valores del divisor de frecuencia deben estar entre 24 y 248 en pasos de 8. **SISTEMA DETENIDO!!!!**

NO SE RECIBIO RESPUESTA DEL COMANDO 3. SISTEMA DETENIDO!!!. Por favor reinicie el sistema.

El número de muestras seleccionadas supera la capacidad de memoria de la tarjeta, MAX 32K.

4.4. MANUAL GENERAL DE LABVIEW 6i

(VER ANEXO B)

5. OPERACIÓN DEL BANCO DE VIBRACIÓN TORSIONAL

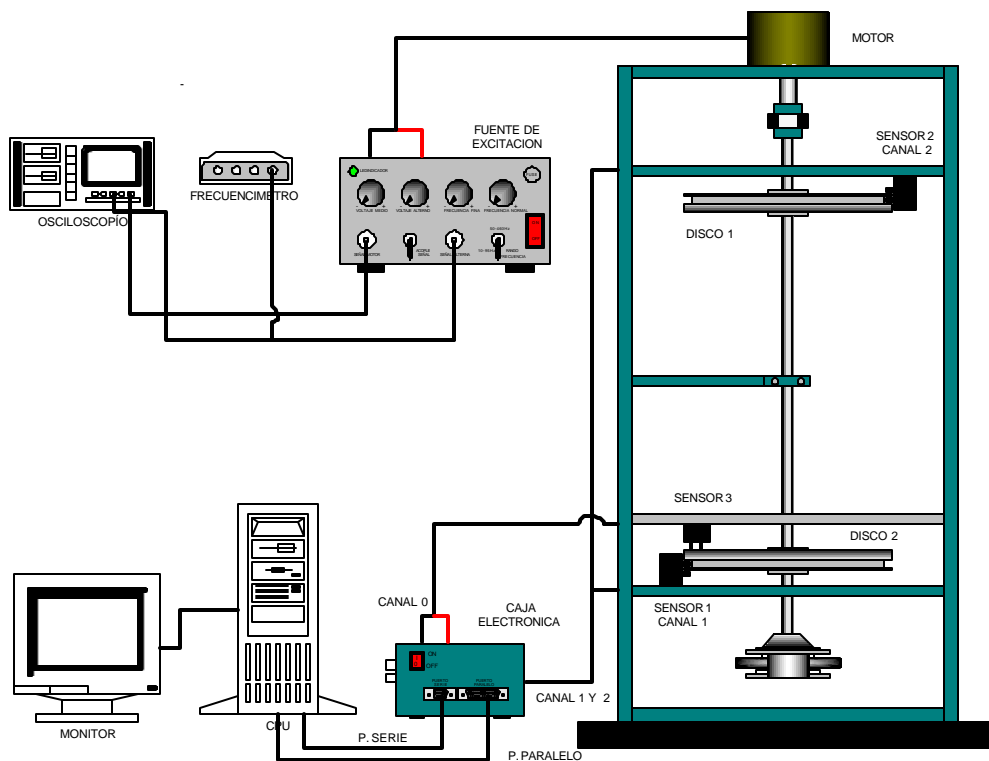
5.1. CONEXIÓN DEL SISTEMA DE ACCIONAMIENTO

La figura 59 muestra el esquema general de conexión del sistema SMVT, requerido para un correcto funcionamiento.

Desde la fuente de alimentación del motor se lleva la señal de la salida *SEÑAL MOTOR* a uno de los canales del osciloscopio o Fluke para determinar el valor del voltaje continuo de alimentación y de la salida *SEÑAL ALTERNA* se lleva la señal al frecuencímetro y al otro canal del osciloscopio para determinar la frecuencia y la amplitud de la señal alterna la cual actúa como excitación torsional. El motor es alimentado mediante unos bornes colocados en la parte posterior de la fuente de excitación.

Seguidamente se debe conectar la caja electrónica como se indica más adelante.

Figura 59. Esquema general de conexión del prototipo.



5.2. EQUIPO UTILIZADO

Para una realización adecuada de las pruebas se debe contar con los siguientes equipos:

- ▣ Caja electrónica.
- ▣ Fuente de excitación torsional.
- ▣ Osciloscopio de dos canales de entrada.
- ▣ Frecuencímetro digital con rango de frecuencias de 10 Hz a 120 MHz.
- ▣ Regulador de voltaje de 1000W.
- ▣ Extensión eléctrica.
- ▣ Cables de conexión y herramientas.

5.3. OPERACIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN

La fuente de alimentación y excitación torsional consta de un panel de control como el mostrado en la figura 60, donde se encuentran las diferentes funciones de cada uno de los controles que se explican en la tabla 5.

Figura 60. Panel de control de la fuente de excitación.

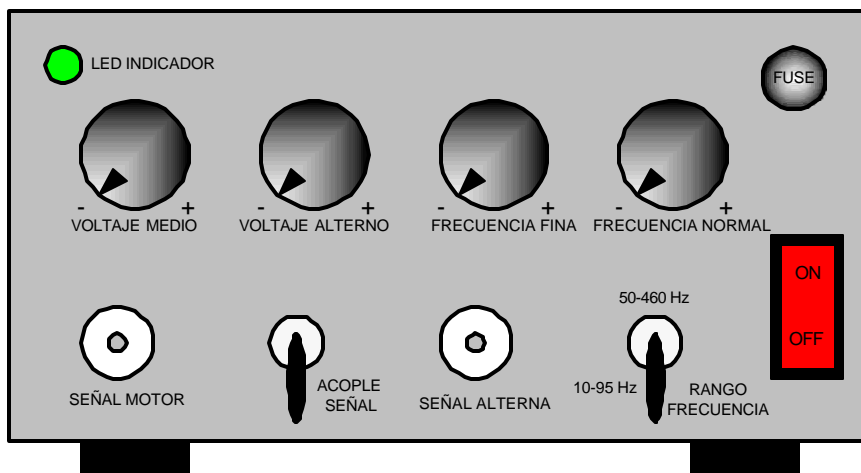


Tabla 5. Descripción funciones de la fuente de alimentación y excitación.

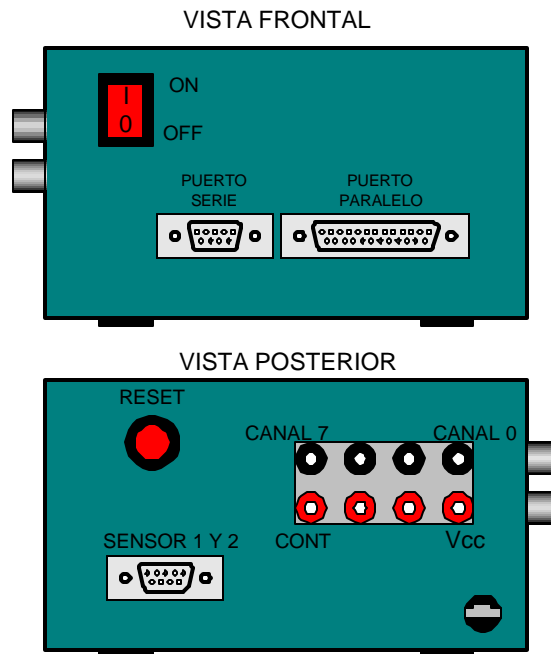
CONTROL	FUNCIÓN
VOLTAJE MEDIO	Regula el valor del voltaje continuo suministrado al motor, que controla la velocidad del motor.
VOLTAJE ALTERNO	Regula el valor de la amplitud de la señal de voltaje alterno, actuando como excitación de la vibración torsional.
FRECUENCIA NORMAL	Establece el valor de la frecuencia de la señal de voltaje alterno, estableciendo la frecuencia de la excitación.
FRECUENCIA FINA	Hace un control con mayor precisión en el valor de la frecuencia de la señal de voltaje alterno.
RANGO FRECUENCIA	Selecciona el rango de operación de la frecuencia normal y fina entre un rango de baja frecuencia (10 a 90 Hz) y uno de alta frecuencia (50 a 450 Hz).
ACOPLE SEÑAL	Suma la señal de voltaje alterno con la señal de voltaje continuo suministrado al motor; activando la excitación torsional (Led verde encendido).
SEÑAL ALTERNA	Presenta la señal de voltaje alterno, sin importar si esta o no sumada a la señal de voltaje continuo. Además lleva la señal al frecuencímetro y osciloscopio para determinar su frecuencia y amplitud.
SEÑAL MOTOR	Presenta el voltaje de alimentación del motor, llevando la señal al osciloscopio para determinar el valor de la señal de voltaje continuo.

5.4. INSTALACIÓN DE LA CAJA ELECTRONICA

Para acoplar la caja electrónica (tarjeta adquisición de datos) al SMVT se deberá conectar primero los puertos de conexión al computador (puerto paralelo o puerto serie), según el que se desee operar o ambos si es posible, luego de conectados a su respectivo puerto; verificando que se conecten los terminales de los sensores ópticos, al igual que el sensor de activación del trigger, al conector DB-9 y al conector RCA correspondiente, localizados en la parte trasera de la caja electrónica, como se observa en la figura 61.

Al conectar el sensor activador del trigger se debe tener mucho cuidado, fijándose que el color del conector RCA corresponda al mismo en la caja electrónica (Vcc es rojo y canal 0 es negro).

Figura 61. Disposición de accesorios en la caja electrónica.



Como siguiente paso se debe conectar la caja al suministro (regulador) de voltaje (110V), el cual presenta un dispositivo en la conexión que permite un suministro de voltaje regulado a la tarjeta de 9V (para evitar un sobrevoltaje y por consiguiente daños en la tarjeta).

Por último se debe encender la caja electrónica mediante el switch colocado en la parte delantera de la misma e inmediatamente se debe oprimir el botón de Reset colocado en la parte trasera de la caja para purgar una posible saturación de datos de mediciones anteriores y para un mejor funcionamiento de la misma.

5.5. SECUENCIA DE ENCENDIDO Y APAGADO

- Conectar el osciloscopio, frecuencímetro, caja electrónica y el sistema de excitación al regulador de voltaje 1000W (110V), apagado.

- ✘ Conectar las señales de la fuente de excitación al osciloscopio y frecuencimetro como se muestra en la figura 59.
- ✘ Conectar el motor a los bornes de la fuente.
- ✘ Verifique que el voltaje medio de alimentación este en cero y desconecte la señal alterna en la fuente de alimentación.
- ✘ Conectar la caja electrónica al regulador de voltaje y asegurarse que este conectada la interfaz al computador (paralelo/serie o ambos) y cada uno de los terminales de los sensores ópticos.
- ✘ Encender todos los equipos.
- ✘ Llevar la escala de amplitud en el osciloscopio a un voltio por división y definir el nivel cero de las señales, teniendo en cuenta que el voltaje continuo puede llevarse hasta ocho voltios (8V) y el voltaje alterno hasta cuatro voltios (4V) valor pico-pico.
- ✘ Aumentar lentamente el voltaje medio para poner en marcha el rotor. Para determinar el valor de la prueba, utilice el sistema de medición.
- ✘ Establezca la frecuencia y amplitud de la señal alterna que se va a utilizar en la prueba.
- ✘ Acoplar la excitación torsional mediante el interruptor de ACOPLA DE SEÑAL (Led verde indicador debe encenderse).
- ✘ Realizar las mediciones correspondientes de la vibración a través del **SMVT**, desde el computador mediante el software **TORSIOLAB**, desarrollado para tal propósito.
- ✘ Una vez terminadas las pruebas, desacoplar la excitación, llevar a cero la amplitud de la señal alterna y disminuir lentamente el voltaje medio de alimentación hasta cero.
- ✘ Apagar y desconectar los equipos.

5.6. RECOMENDACIONES DE LA EXPERIMENTACIÓN

- ✘ No sobrepasar el voltaje de alimentación del motor de 8V.

- ⌘ No operar los rotores en el rango de sus velocidades críticas a la flexión y pasar rápidamente por ellas.
- ⌘ No operar el rotor a baja velocidad durante largo tiempo, para evitar recalentamiento en la fuente de alimentación.
- ⌘ Mantener limpios los encoders y sensores, evitando que sean rayados.
- ⌘ Guardar la información previamente adquirida en un archivo para no perder dicha información.
- ⌘ Para cambiar el rotor se deberán seguir los procedimientos explicados en el proyecto anterior de Uribe-Fonque.

NOTA: Para mayor información acerca del diseño del banco de experimentación consultar la tesis “Vibración Torsional, Sistema de Medición y Experimentación” por Daniel Uribe y Agustin Fonque, 1995.


6. EXPERIMENTACION

Durante la experimentación el prototipo se somete a diferentes condiciones de excitación torsional para obtener información acerca de su comportamiento dinámico a la torsión, utilizando para tal caso el SMVT desarrollado con su respectivo análisis en **TORSIOLAB**.

La excitación torsional se manipula desde la fuente de alimentación y excitación mediante el control de la amplitud y la frecuencia de la componente alterna del voltaje de alimentación del motor de imanes permanentes.

La cuantificación de los parámetros de la vibración torsional (amplitud y frecuencia) permite comparar los resultados obtenidos experimentalmente, con los cálculos teóricos para las frecuencias naturales y modos de vibración. (Ver tesis anterior Uribe-Fonque).

6.1. PLANTILLA DE PRUEBAS

	LABORATORIO DE VIBRACION TORSIONAL		FECHA:	H O J A N°
			REVISION:	
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		LABORATORIO N°	
MANUAL DE PROCEDIMIENTOS			PROCEDIMIENTO:	
ELABORO: LEONEL MORA C.		REVISO: ALFONSO GARCIA	APROBO: ALFONSO GARCIA	

METODOLOGIA

La experimentación se realizó con base en los siguientes pasos:

- Determinación del sistema mecánico.
- Determinación de la prueba a realizar.
- Desarrollo de la prueba.
- Análisis de los resultados obtenidos.

Determinación del sistema mecánico.

Con base en los parámetros dinámicos de diseño (inercia y rigidez) del sistema a evaluar. Estos parámetros permiten el cálculo de las frecuencias naturales y los modos de vibración del sistema mediante el método de Holzer.

Determinación de la prueba.

Se determina el fenómeno a estudiar en el sistema de medición como son:

- Comportamiento del sistema fuera de resonancia.
- Comportamiento del sistema en resonancia.
- Amortiguación de la vibración.

Comportamiento del sistema fuera de resonancia.

Se excita la vibración en el sistema a una frecuencia alejada de sus frecuencias naturales a una velocidad media determinada y se realizan las lecturas de vibración presentes.

Comportamiento del sistema en resonancia.

Se excita la vibración en el sistema con una frecuencia igual a sus frecuencias naturales, a una velocidad media determinada y se realizan las mediciones de la vibración.

Desarrollo de la prueba.

Se establecen condiciones de operación del sistema mecánico adecuadas para el fenómeno a estudiar; condiciones que quedan determinadas por el voltaje medio de alimentación del motor (velocidad media de rotación), voltaje alterno de alimentación (amplitud de la excitación torsional) y la frecuencia del voltaje alterno de alimentación (frecuencia de la excitación torsional).

El sistema se coloca en funcionamiento con las condiciones de operación establecidas y se realiza la medición de la vibración en los dos puntos de cada sistema (volantes) obteniéndose de esta manera su respectivo oscilograma y espectro.

Análisis de los resultados.

El análisis de los datos obtenidos permite identificar el estado vibratorio del sistema para determinada condición de operación. No se presenta en este capítulo por inconvenientes en el sensor de activación del trigger ya que este inicialmente se había implementado por software.

➤ EXPERIMENTACION REALIZADA

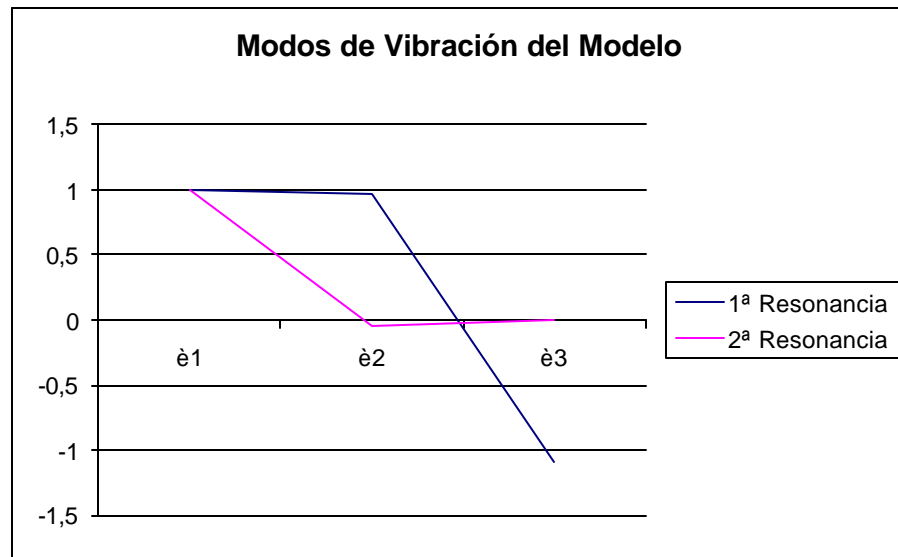
Determinación del modelo mecánico.

Ver tablas de rigidez, inercias, frecuencias naturales y modos de vibración del modelo uno.

Tabla 6. Modos de vibración del modelo

Resonancia	\dot{u} (rad/s)	f (Hz)	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
1^a	142,33	22,653	1	0,973	-1,096
2^a	891,766	141,929	1	-0,051	0,000698

Figura 62. Grafica de los modos de vibración del modelo



Determinación de la prueba.

- ▣ Comportamiento del sistema fuera de resonancia.
- ▣ Comportamiento del sistema en su primera resonancia.
- ▣ Comportamiento del sistema en su segunda resonancia.
- ▣ Amortiguación de la vibración

Desarrollo de la prueba.

Tabla 7. Condiciones de operación para las pruebas en el modelo.

PRUEBA REALIZADA	FRECUENCIA EXCITACIÓN (Hz)
Sistema Fuera de Resonancia	18
Sistema en Primera Resonancia	22.35
Sistema en Segunda Resonancia	141.92

6.2. ANALISIS DE RESULTADOS

Sistema fuera de resonancia.

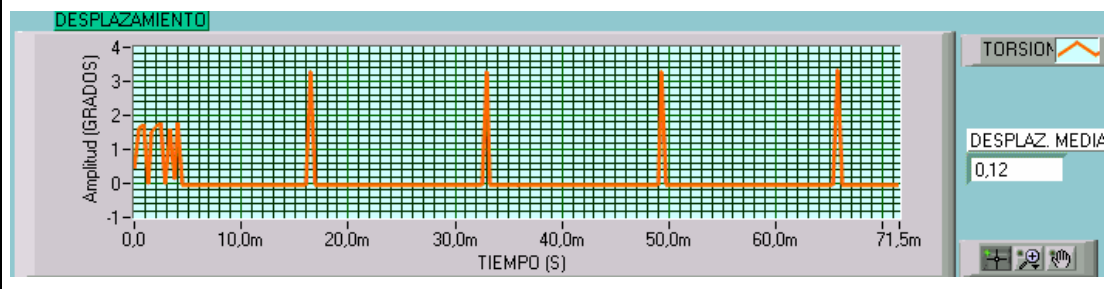
Para este análisis se tomaron diferentes mediciones a 18 Hz, donde en cada uno de los gráficos se aprecia una señal periódica con aparentes picos de baja intensidad, generados por ruido en los sensores, los cuales son presentados como múltiplos de la frecuencia de rotación.

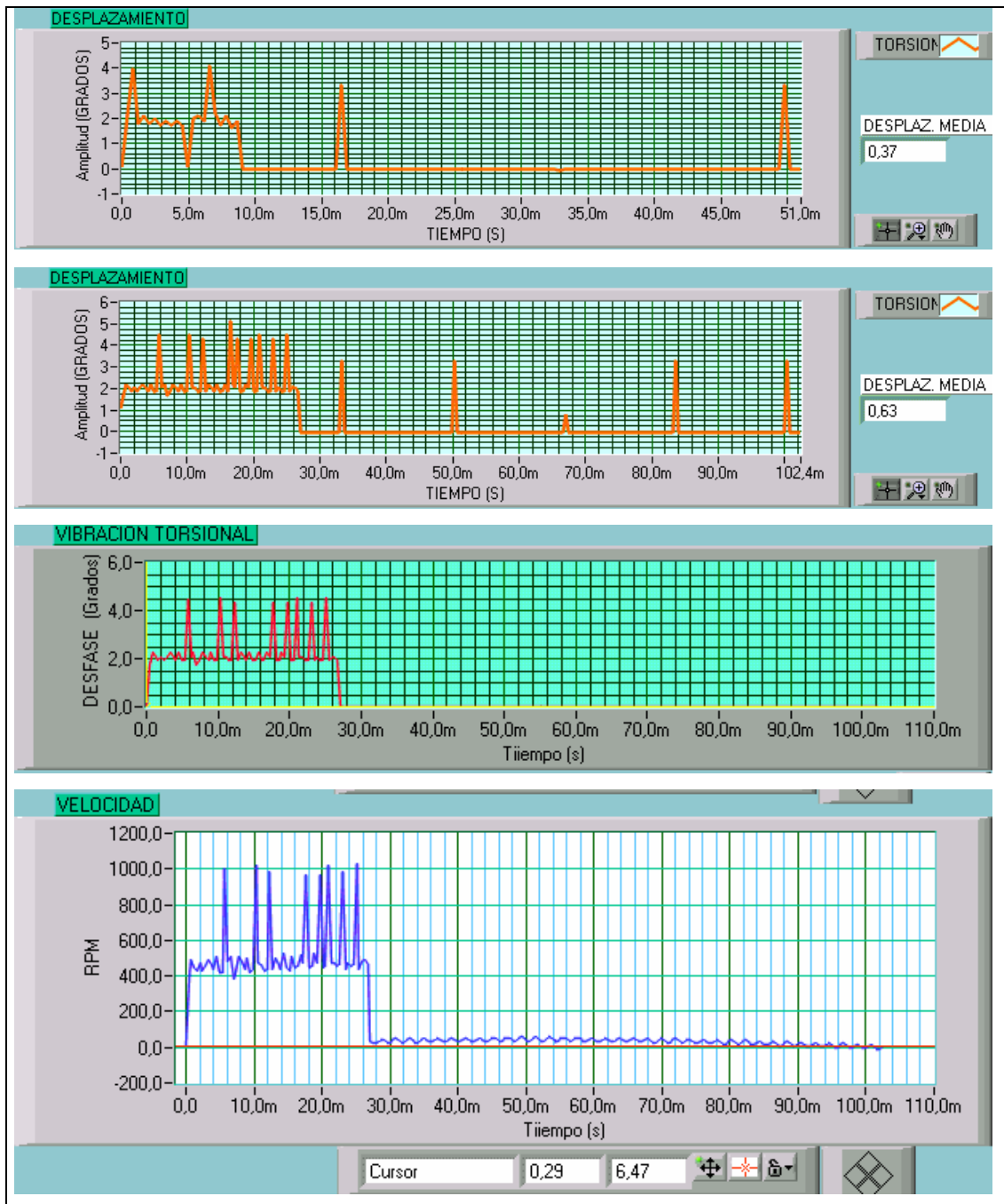
Es evidente que los graficos muestran un aumento progresivo relativamente bajo del nivel promedio de vibración , pero se debe en parte al tiempo de duración de las pruebas.

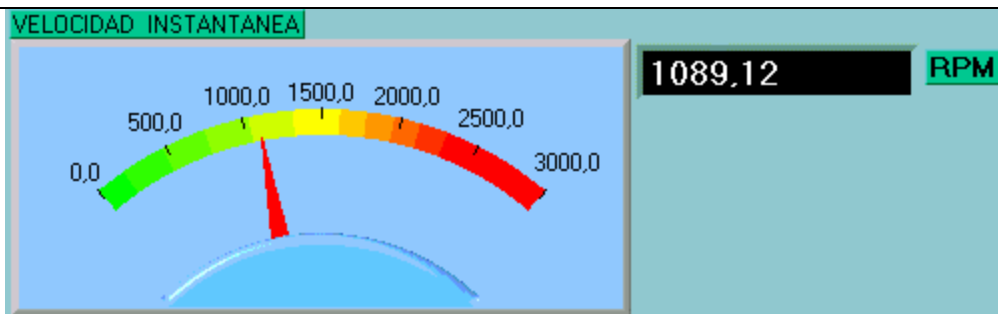
Esto permite concluir que dadas las condiciones del sistema fuera de resonancia los volantes vibran con una amplitud relativamente baja, durante la operación.

Figura 63. Modelo de experimentación fuera de resonancia.

a) Oscilogramas de desplazamiento (grados) y velocidad(Rpm/s), y b) Espectros (Vrms/Hz). Sensor 1 y 2.

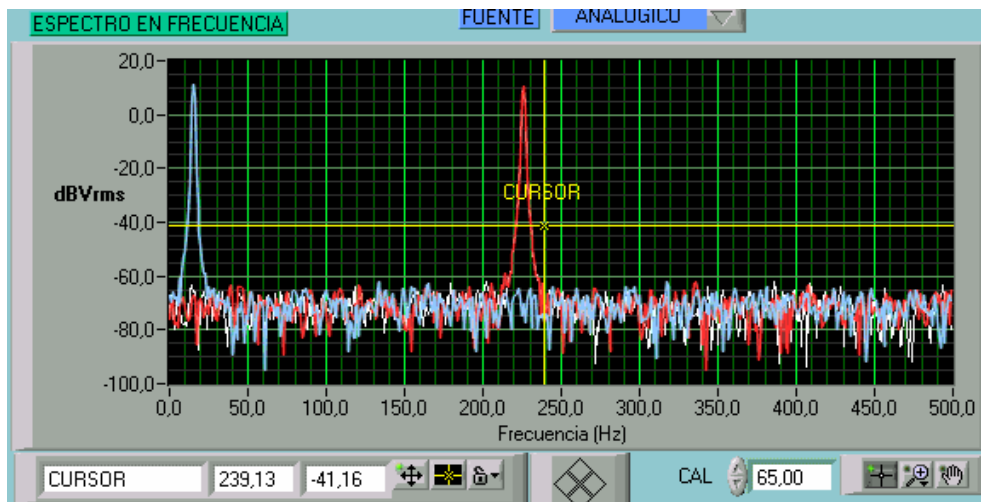


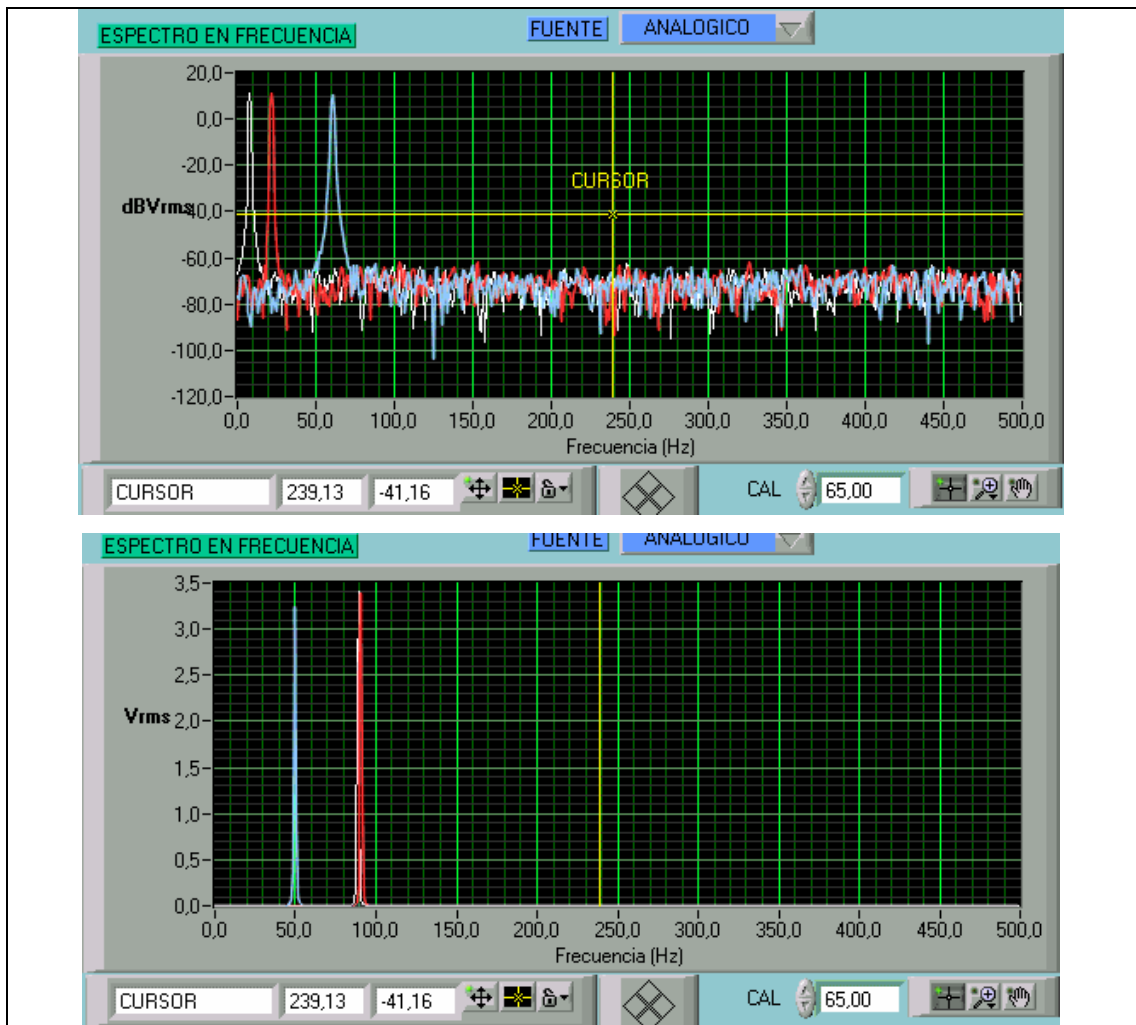




(a)

b) Espectros (Vrms/Hz)





(b)

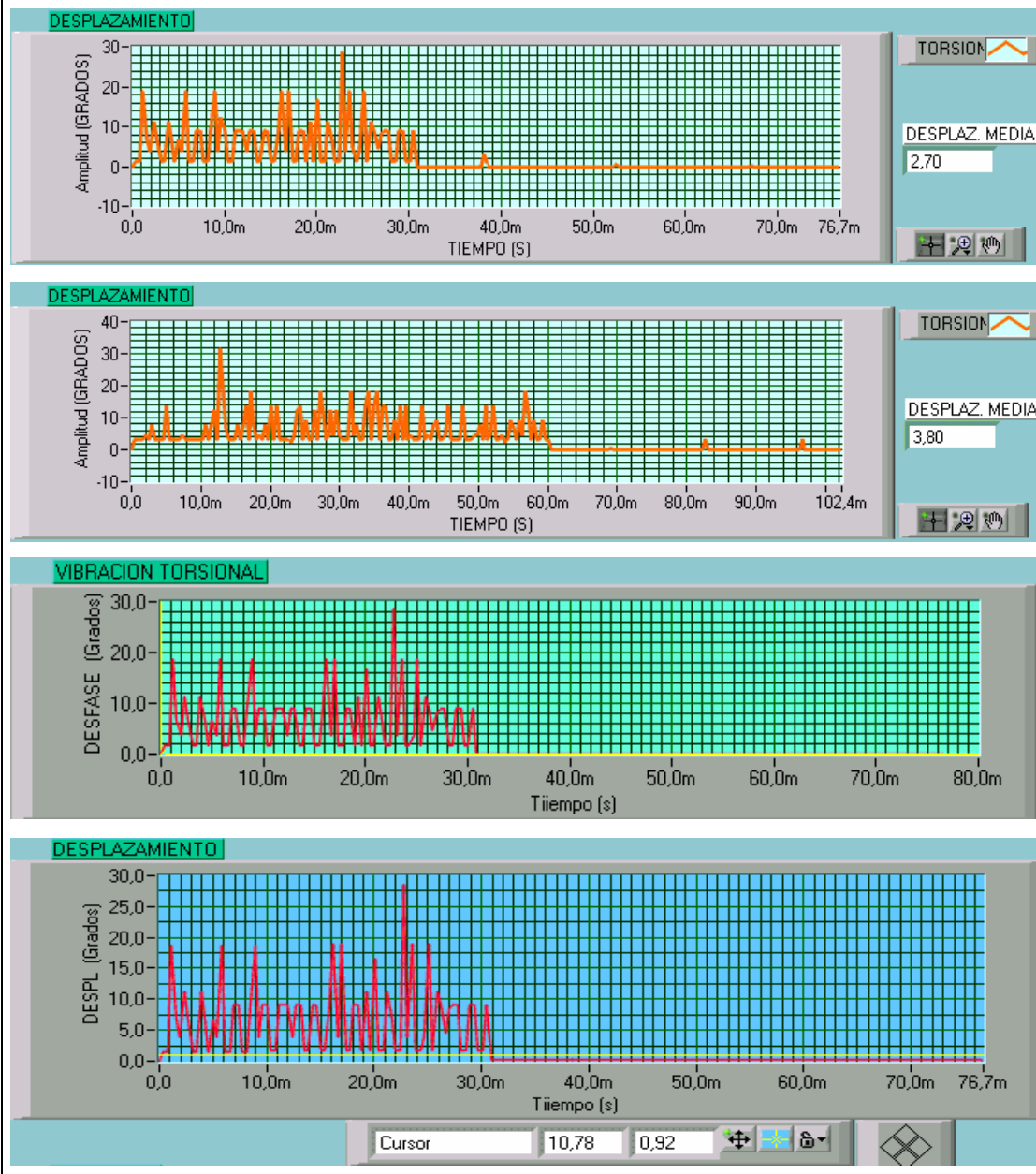
Sistema en su primera resonancia sin excitación.

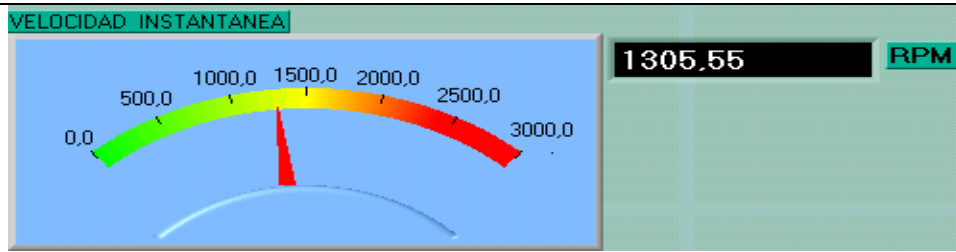
El valor obtenido para la primera frecuencia natural fue calculado mediante el metodo de Holzer (22.653 Hz), lo cual es bastante aproximado al valor real de la frecuencia de excitación de resonancia con el cual se tomaron los datos de medición (22.65 Hz).

Para este sistema de medición se tomó primero unas mediciones sin excitación torsional y posteriormente con excitación torsional, para observar

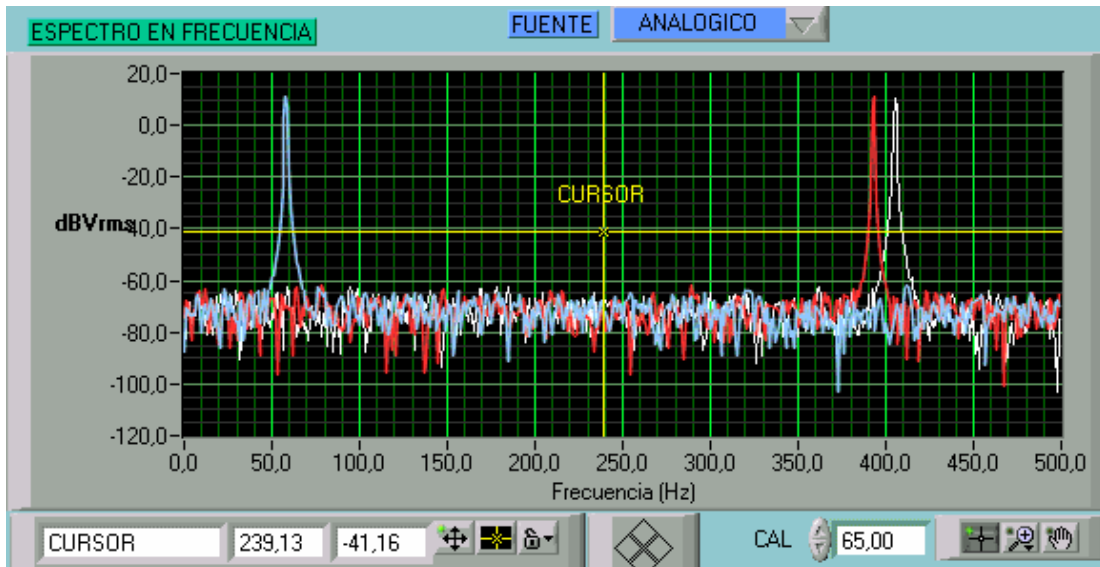
con más claridad la presencia de la vibración torsional en la primera resonancia, ya que para la segunda resonancia mediante el prototipo no se pudo medir.

Figura 64. Modelo de experimentación en su primera resonancia sin excitación. a) Oscilograma de desplazamiento (grados), b) Espectro (Vrms/Hz). Sensor 1 y 2.





(a)



(b)

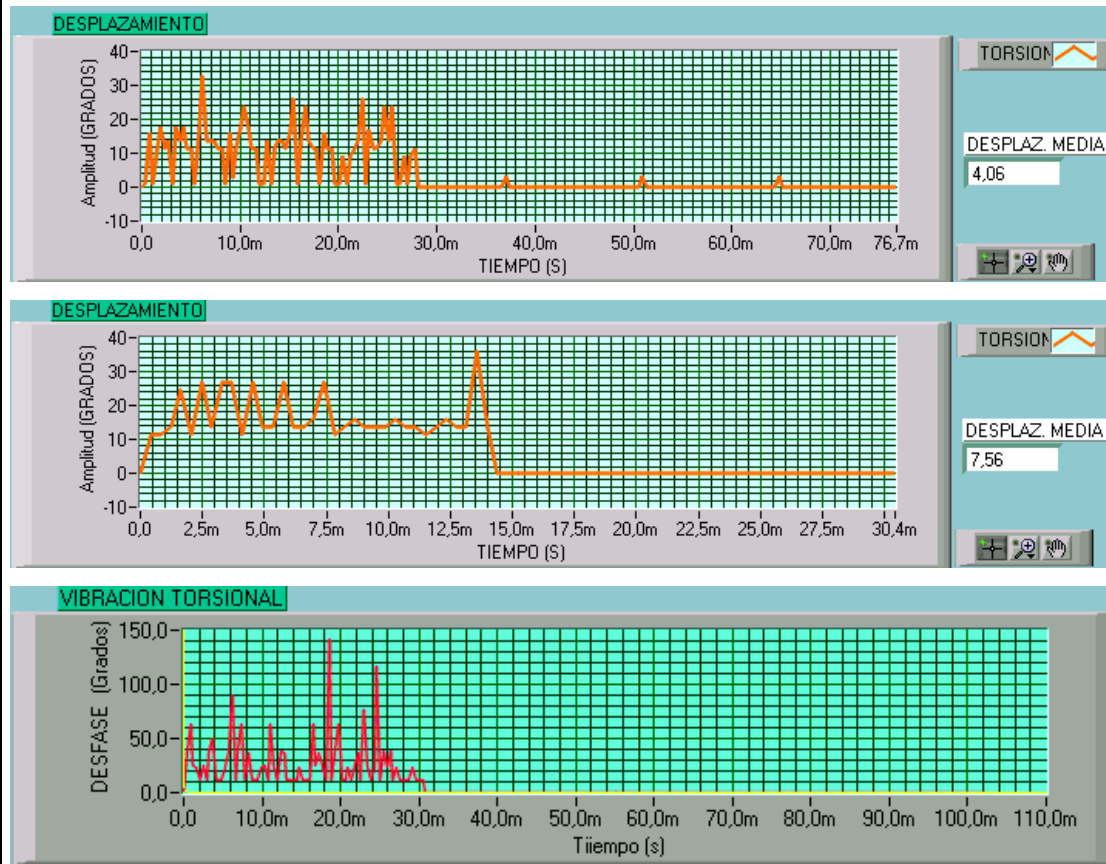
Sistema en su primera resonancia con excitación.

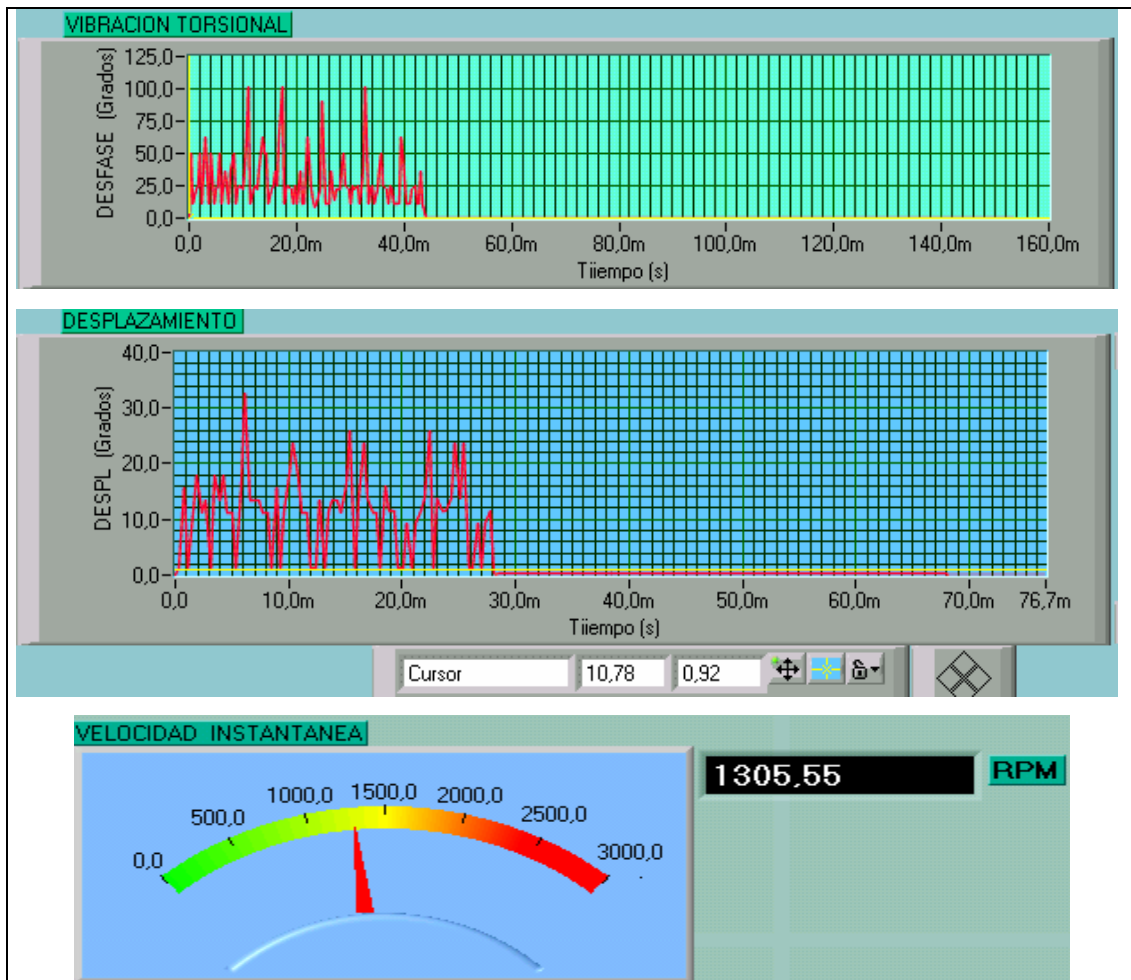
La amplitud de la vibración mostrada en las graficas de desplazamiento representa la magnitud que gira cada volante respecto a un punto fijo de referencia del rotor el cual presenta velocidad angular constante (amplitud de vibración cero), debida a la deformación angular sufrida por el eje del rotor al producirse la vibración torsional.

Para el modelo de experimentación se tiene, según los modos de vibración calculados anteriormente, que al establecer una posición angular de referencia en el eje, el volante 1 (disco 1) gira 2.35° en un sentido y el volante

2 (disco 2) gira 2.44° en el otro sentido, durante el momento de máxima deformación del eje, por lo cual el máximo ángulo de deformación que sufre la sección de eje comprendida entre el volante 1 y 2 será la suma de amplitudes de vibración de los volantes (4.79°).

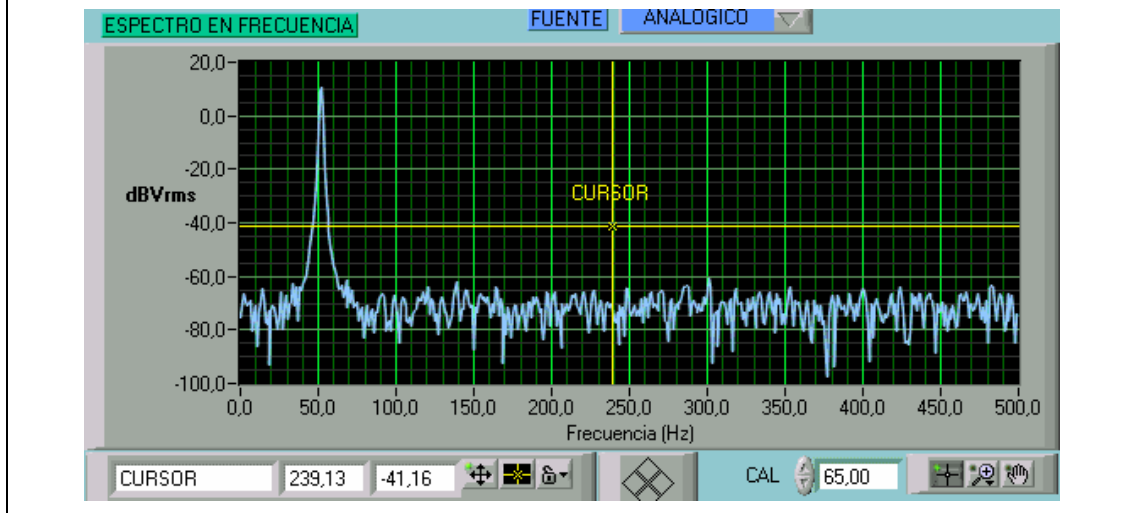
Figura 65. Modelo de experimentación en su primera resonancia con excitación. a) Oscilogramas de desplazamiento (grados) y velocidad (Rpm/s), b) Espectros (Vrms/Hz). Sensor 1 y 2.

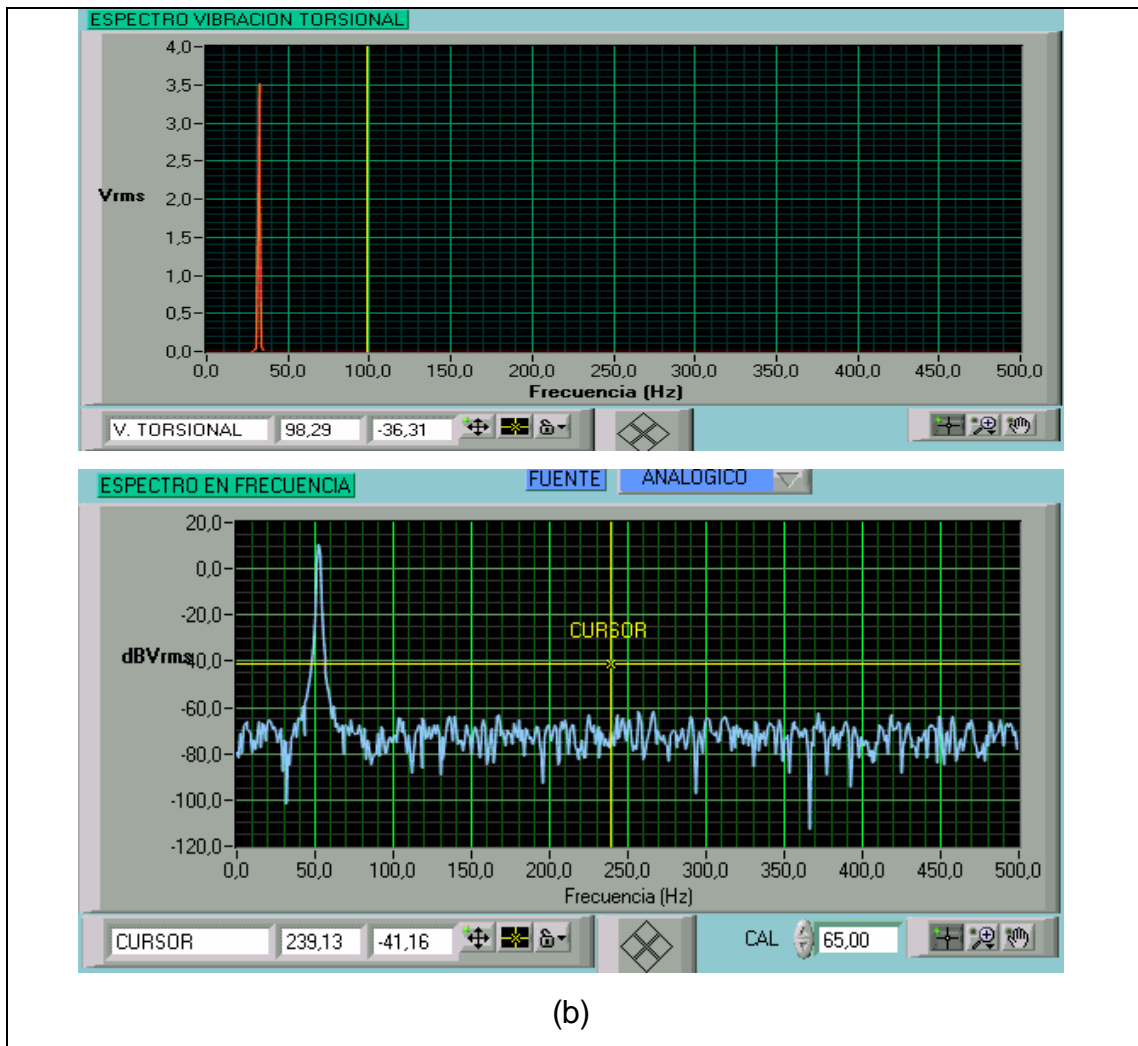




(a)

b) Espectros





CONCLUSIONES

- Se comprobó que el sensado sin contacto no es de ningún modo fácil de medir, debido a que la vibración torsional no esta en dirección del radio del eje pero si en dirección tangencial que es completamente diferente de la vibración transversal.
- Se desarrollo un sistema digital de monitoreo de la vibración torsional el cual se basó en el método de alineación de tiempo, mostrando una medición más confiable y precisa.
- Se comprobó que al hacer las mediciones con base en un punto de referencia (sensor 1), activados mediante una señal exterior de disparo se obtienen datos más reales del comportamiento torsional del eje, con lo cual se asegura que los datos sean adquiridos en la misma posición angular del eje cada vez que el trigger envié una señal (pulso) al sistema.
- El sistema de monitoreo desarrollado crea un ambiente de medición más amigable lo que facilita su utilización por parte de estudiantes y profesores convirtiéndose en un soporte básico en la enseñanza de las vibraciones torsionales.

RECOMENDACIONES

- Se debe tener en cuenta que a la hora de conectar los sensores, los cables no entren en contacto con los cables eléctricos, ya que generan ruido eléctrico en la señal y por ende se obtiene una señal errada y defectuosa.
- Los sensores deben estar perfectamente alineados para que la señal sea lo más ideal posible y presentar un desfase de 180° , para una mejor visualización del efecto de vibración torsional eliminando los efectos de la vibración lateral.
- Después de la adquisición de la señal se tiene que hacer un proceso de normalización de la señal, para luego tener un buen análisis de los pulsos de ambas señales.
- Fue necesario encapsular la tarjeta dentro de una caja metálica para aislarla de posibles problemas de ruido electromagnético y evitar ambientes contaminantes del laboratorio de vibraciones mecánicas producidos por los motores en general. Por lo cual se debe asegurar en lo posible que la caja electrónica no se coloque cerca de dispositivos que puedan generar dicho ruido porque se pueden presentar errores en la medición.
- Es importante seguir investigando más sobre la rama de vibración torsional ya que ahora se cuenta con una herramienta útil para su medición.
- El sistema cuenta con dispositivos de expansión que hacen que en el futuro se pueda mejorar su aplicación.

BIBLIOGRAFIA

BARBOSA, W. y ARGOTE, G. Eliminación y amortiguación de vibraciones de torsión en máquinas. Bucaramanga, 1991. Tesis de Grado. Universidad industrial de Santander.

BIGNELL, James W. DONOVAN, Robert C. Electrónica digital. CECSA, p. 545-550.

DEN HARTOG, J.P. Mecánica de las Vibraciones. 4ª ed. México: CECSA, 1964.

JIMENEZ, Carlos F. Sistema de adquisición de datos para PC por puerto paralelo usando DMA. Bucaramanga, 2001, 221 p. Tesis de Grado. Universidad industrial de Santander.

LAZARO, Antonio Manuel. LabVIEW Programación gráfica para el control de instrumentación. España: Paraninfo, 1996.

NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW 6i User Manual. Estados Unidos: NATIONAL INSTRUMENTS, 2001.

OPPENHEIM, Alan V. WILLSKY Alan S. Señales y sistemas. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1994.

ROCHT, J.T. Mechanical vibrations and shock measurements. Denmark: Brüel & Kjær. k. Larsen & Son, 1984.

THOMSON, William T. Teoría de vibraciones y aplicaciones. Mexico: Prentice-Hall, 1982, 491p.

URIBE, D. y FONQUE, A. Vibración Torsional. Sistema de medición y experimentación. Bucaramanga, 1995, 169 p. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander.

VANCE, John M. Rotordynamics of Turbomachinery.
Estados Unidos, John Wiley & Sons, 1988, 388p.

VANCE, J.M. y FRENCH, S.R. Measurement of torsional vibration in rotating machinery. Journal of Mechanism, Transmissions and Automation in Design. December 1986, v. 108, p. 565-577.

VIBRATIONS IN ROTATING MACHINERY. International conference. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE, London: Mechanical engineering publications, 1992, p. 257-262.

VIBRATION OF ROTATING SYSTEMS. The 1993 Asme design technical conferences 14th biennial conference on mechanical vibration and noise Albuquerque, New Mexico.
New York: ASME, 1993. v. 60, 382 p.

WELLS, Lisa K. The LabVIEW Student Edition User's Guide.
New Jersey: Prentice-Hall, 1995.

ANEXOS

ANEXO A: Funciones de Bessel de cero y primer orden.

\hat{a}	$J_0(\hat{a})$	$J_1(\hat{a})$
0,0	1,0000	0,0000
0,1	0,9975	0,0499
0,2	0,9900	0,0995
0,3	0,9776	0,1483
0,4	0,9604	0,1960
0,5	0,9385	0,2423
0,6	0,9120	0,2867
0,7	0,8812	0,3290
0,8	0,8463	0,3688
0,9	0,8075	0,4059
1,0	0,7652	0,4401
1,1	0,7196	0,4709
1,2	0,6711	0,4983
1,3	0,6201	0,5220
1,4	0,5669	0,5419
1,5	0,5118	0,5579
1,6	0,4554	0,5699
1,7	0,3980	0,5778
1,8	0,3400	0,5815
1,9	0,2818	0,5812
2,0	0,2239	0,5767
2,1	0,1666	0,5683
2,2	0,1104	0,5560
2,3	0,0555	0,5399
2,4	0,0025	0,5202

Fuente: VANCE, Jhon M. *Rotordynamics of Turbomachinery*.

ANEXO B: MANUAL LABVIEW 6i

1. LA INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

1.1. INTRODUCCION A LABVIEW

LabVIEW es un lenguaje de programación de alto nivel, de tipo gráfico, y es enfocado al uso en instrumentación. Pero debido a que cuenta con todas las estructuras, puede ser usado como lenguaje de programación, para elaborar cualquier algoritmo que se desee, en cualquier aplicación, como en análisis, telemática, juegos, manejo de textos, etc. Cada programa realizado en LabVIEW será llamado Instrumento Virtual (VI), el cual como cualquier otro programa ocupa espacio en la memoria del computador.

1.2. USO DE LA MEMORIA:

La memoria usada la utiliza para cuatro bloques diferentes como son:

- EL PANEL FRONTAL (**Front Panel**): Donde se ven los datos y se manipulan y controlan. Es también, la pantalla de usuario final.
- EL DIAGRAMA DE BLOQUES (**Block Diagram**): En este se aprecia la estructura del programa, su función y algoritmo, de una forma gráfica en lenguaje G.
- EL PROGRAMA COMPILADO: Cuando se escribe en LabVIEW, el algoritmo escrito de forma gráfica no es ejecutable por el computador, por tanto, LabVIEW lo analiza, y elabora un código assembler, con base en el código fuente de tipo gráfico. Esta es una operación automática que ocurre al ejecutar el algoritmo, por tanto no es importante entender como sucede esto. Lo que si es algo para apreciar, es que en este proceso, se encuentran los errores en el algoritmo creado.
- LOS DATOS: Como el algoritmo maneja datos, requiere de un espacio en memoria para estos, lo que hace tomar en cuenta que el computador usado debe tener la memoria suficiente para manejarlos. Por ejemplo, cuando se usan grandes matrices en cálculos se puede requerir de mucho espacio.

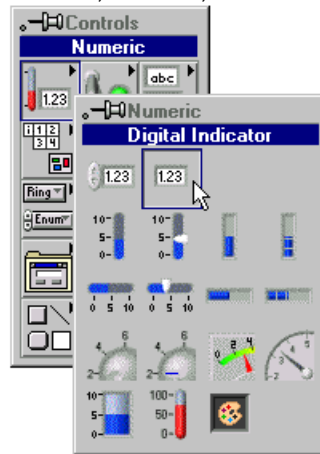
NOTA: A un programa VI terminado se le puede borrar el diagrama de bloques para que ocupe menos memoria y no pueda ser editado, y seguirá funcionando. El panel nunca puede ser borrado.

1.3. PALETAS DE CONTROLES

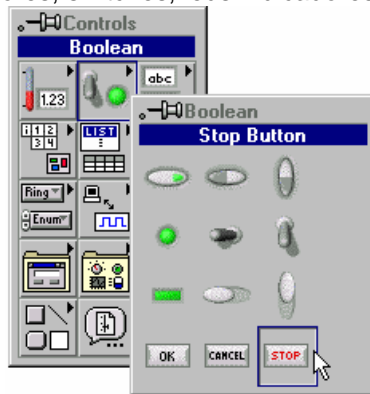
En el menú **Controls** aparecen todos los tipos de controles e indicadores que se pueden colocar en el panel frontal, como son:



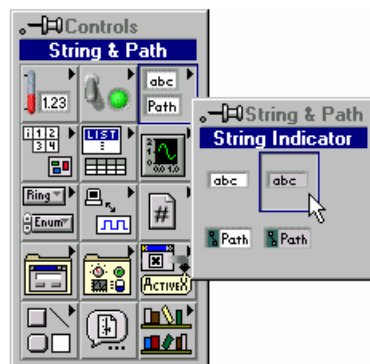
1. Numeric (Numéricos): Permiten la entrada y salida de datos y valores medibles de tipo numérico, ya sea en un número real, enteros, naturales positivos.



2. Boolean (Boleanos): Permiten la salida y la entrada de datos de tipo discreto, on-off, como es el caso de los pulsadores, switches, leds indicadores.

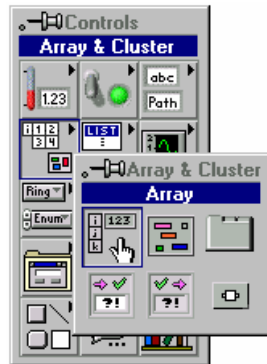


3. String & Path (Cadenas y Rutas): Permite entrar y sacar datos de tipo alfanumérico, vistos en un indicador o control.

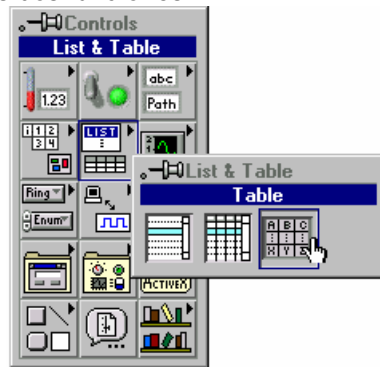


4. Array & Cluster (Arreglos y grupos): Permite agrupar datos para formar matrices ya sean de entrada o salida. Estas matrices pueden ser de tipo numérico, o de tipo booleano. También se pueden agrupar datos de diferentes tipos de control o de diferentes tipos de indicador, en un cluster, el cual es una agrupación que posee una sola terminal en el

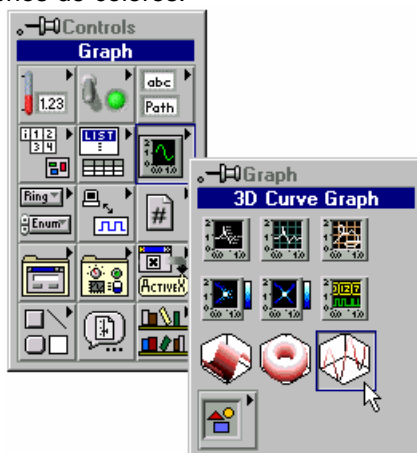
diagrama de bloques, semejante a un conector de un computador, el cual siendo un solo conector lleva muchas líneas que llevan diferentes señales; en las matrices todas las señales son del mismo tipo.



5. List & Table (Listas y Tablas): Son controles e indicadores que presentan listas de opciones donde el ítem seleccionado se entrega como un valor al programa, o en una tabla que también puede cumplir las dos funciones.



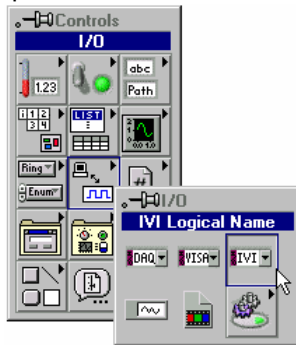
6. Graph (Graficos): Controles e indicadores de gráficas. Pueden ser gráficas de barrido, graficas XY, o de tonos de colores.



7. Ring & Enum (Menús): Son llamados menús de selección, pueden ser de cualquier tipo de datos, inclusive imágenes si el usuario desea.



8. I/O (Entradas/Salidas): Útiles para comunicación VISA. No son de uso normal para principiantes. Son utilizados en dispositivos de entrada/salida conectados al PC.



Y otros, controles que por su complejidad no son de uso normal para principiantes, entre ellos:

Refnum: Controles útiles en el manejo de archivos.

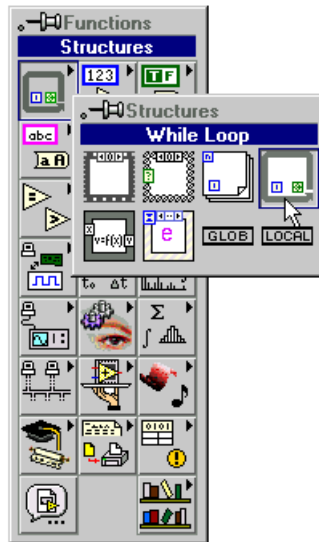
ActiveX (Active x): Son controles para manejar cualquier aplicación del sistema operativo, o aplicación que este instalada en el PC y sea compatible con LabVIEW.

1.4. PALETAS DE FUNCIONES

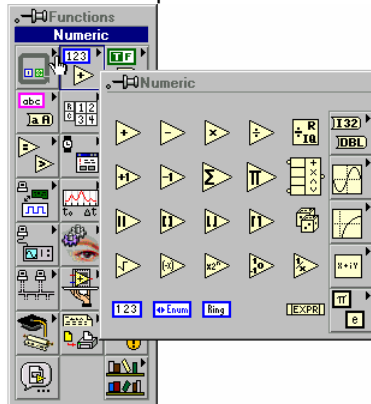
El menú de **Functions** ofrece todas las posibilidades de funciones que se pueden utilizar en el diagrama de bloques, donde al hacer clic se escoge y ubica dentro del programa.



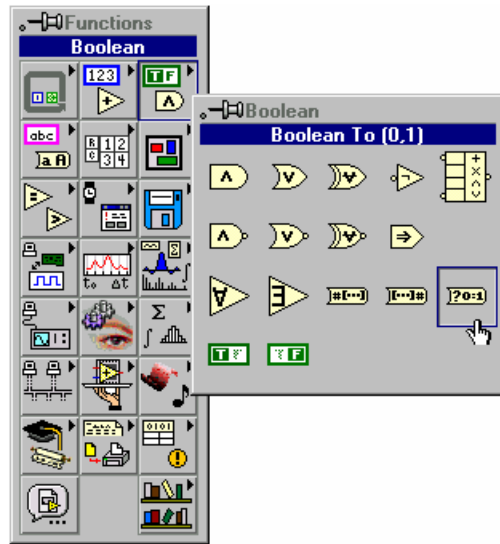
1. Structures (Estructuras): Contiene las estructuras básicas de programación como son las secuencias, los casos, los ciclos For y While, al igual que las variables de tipo global y local.



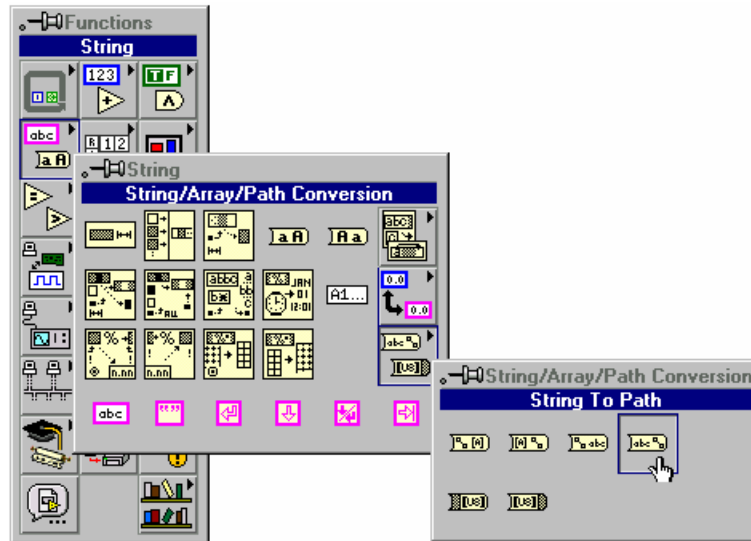
2. Numeric (Numéricos): Presenta las operaciones básicas aritméticas como son suma, resta, multiplicación, números al azar, valor absoluto, presenta funciones trigonométricas y logarítmicas y las constantes de todo tipo como son: las numéricas y alfanuméricas.



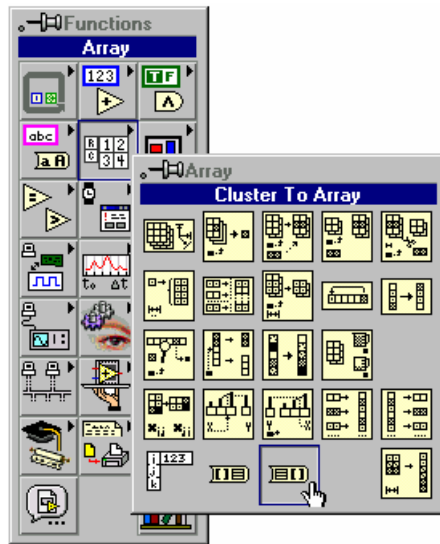
3. Boolean (Boleanos): Presenta las constantes booleanas, compuertas logicas and, or, not y muchas otras. Para ver la función de cada una usar la ventana de Help <ctrl+H>.



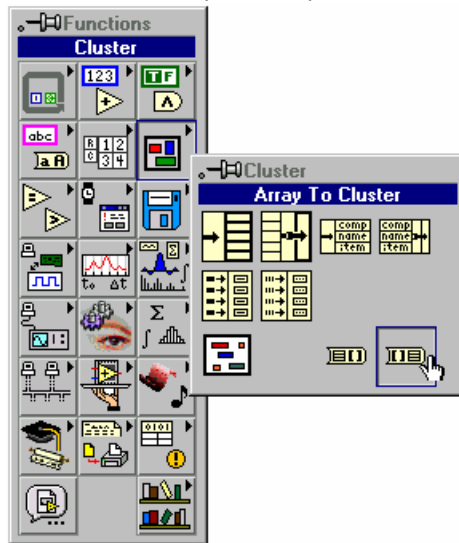
4. String (Cadenas): Presenta herramientas para manipular cadenas de caracteres.



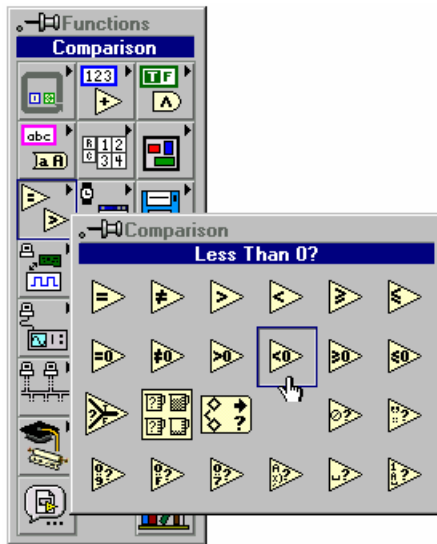
5. Array (Matrices): Maneja las herramientas para el uso de matrices. Por ejemplo: Dar las dimensiones de una matriz, en otra de una sola dimensión.



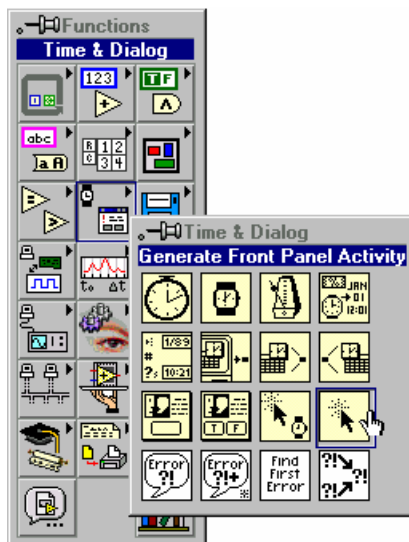
6. Cluster (Grupos): Maneja las herramientas para el uso de agrupaciones. Ejemplo: Agrupar un conjunto de cables en uno solo par manipular menos líneas.



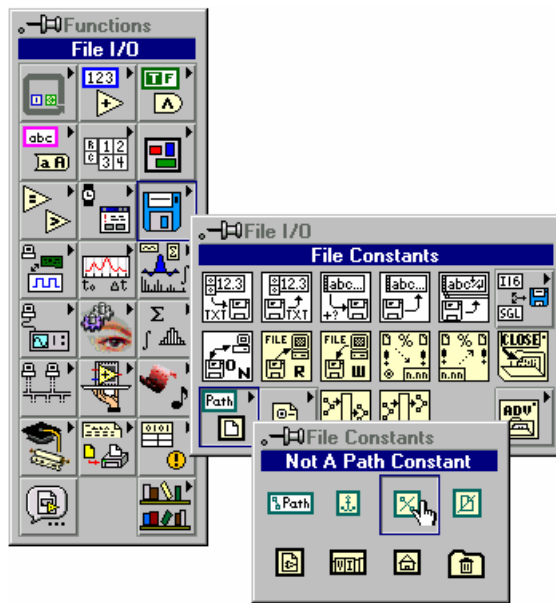
7. Comparison (Comparaciones): Funciones de comparación que devuelven un valor de verdadero o falso según se cumpla dicha comparación.



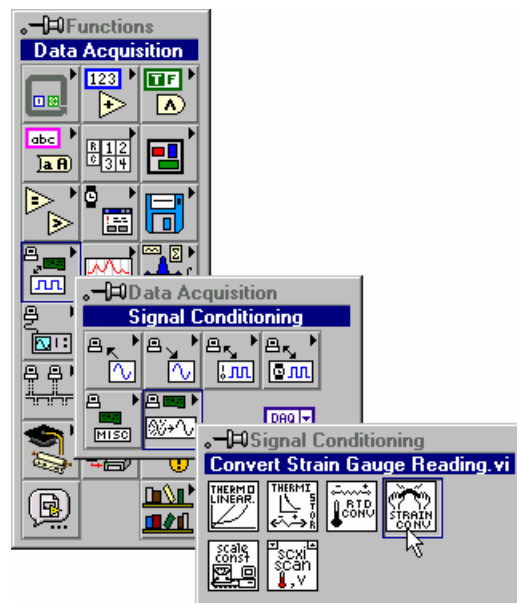
8. Time & Dialog (Tiempos y Mensajes): Reportadores de tiempo, esperas, fechas y cuadros que dan anuncios. Mensajes que se despliegan en nuevas ventanas, útiles en programación.



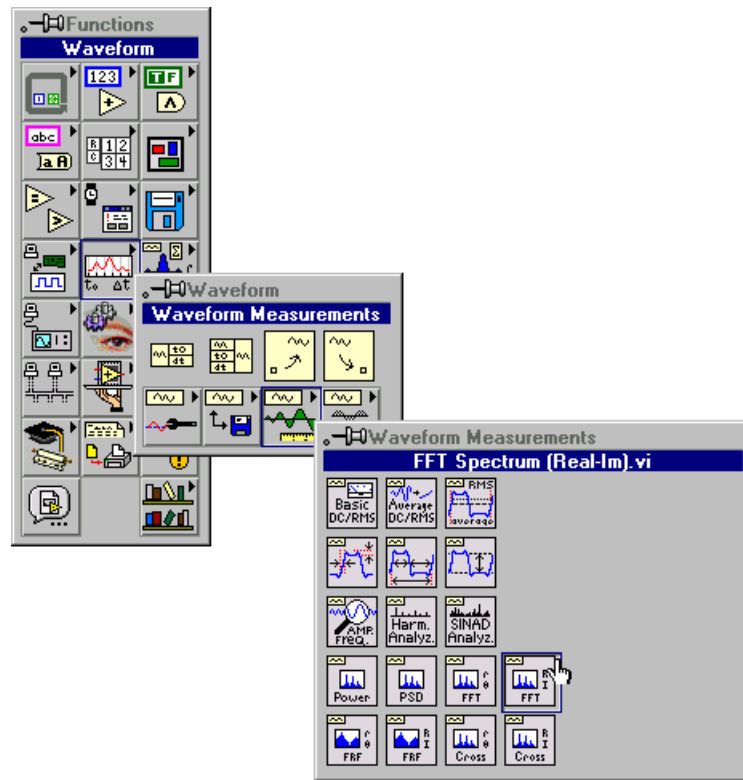
9. File I/O (Archivos de E/S): Para el manejo de archivos y almacenamiento de información en disco y lectura de la misma de cualquier archivo.



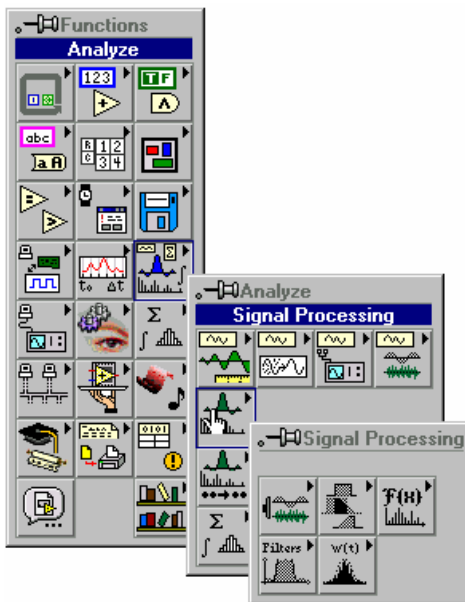
10. Data Acquisition (Adquisición de Datos): Para la adquisición de datos, lectura y escritura de datos a las tarjetas insertables, toma y control de señales análogas y digitales, y control de los circuitos contadores que hay en algunas tarjetas. Estos controles están disponibles solo para tarjetas diseñadas por NI, National Instruments Inc.



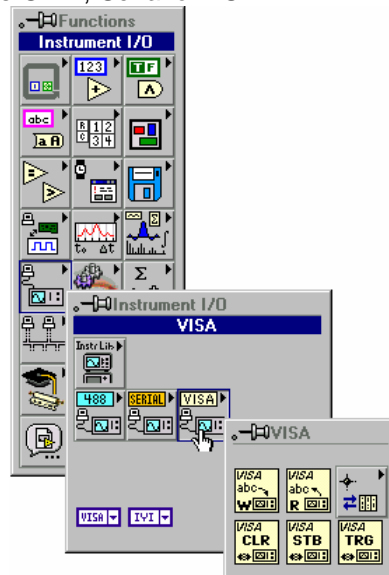
11. Waveform (Forma de Onda): Muy útiles para realizar mediciones sobre ondas sinusoidales y cualquier tipo de procesamiento de señal. Este análisis se puede realizar en el tiempo o en la frecuencia, dependiendo de la aplicación.



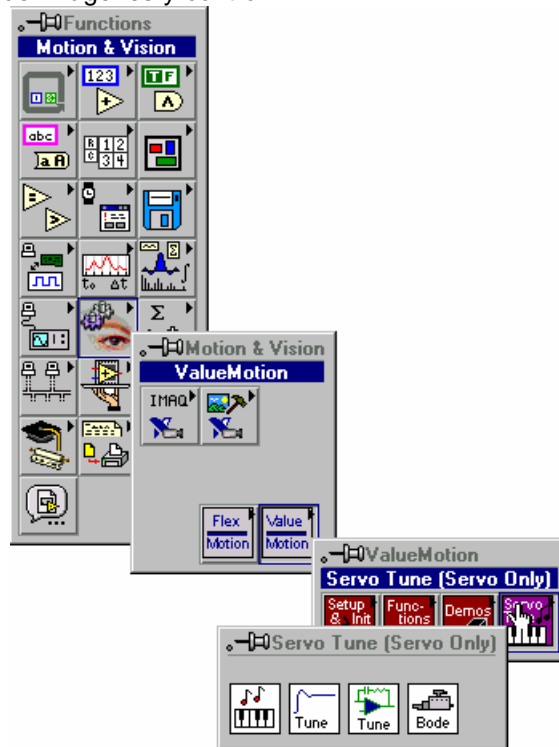
12. Analyze (Análisis): Funciones avanzadas de procesamiento de señales, estadísticas, álgebra lineal, filtros, regresión, generación de señales, transformadas y otras que requieren de un buen entendimiento matemático.



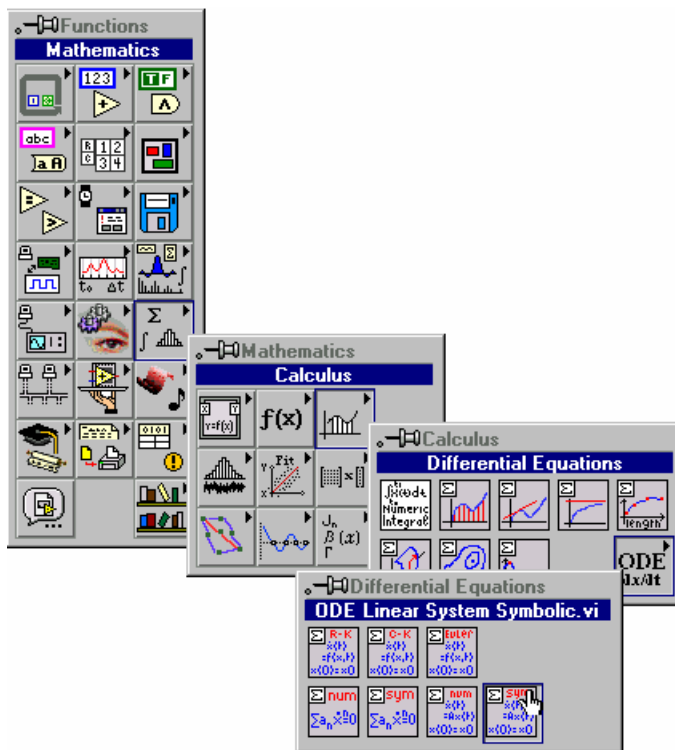
13. Instrument I/O (Instrumentos de E/S): Comunicación con instrumentos medidores a través de puertos GPIB, Serial o VISA.



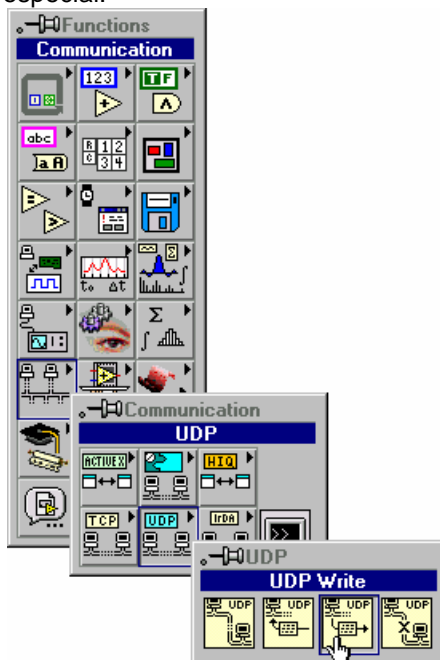
14. Motion & Vision (Movimiento y Visión): Herramientas para realizar procesamiento Digital de Imágenes y control



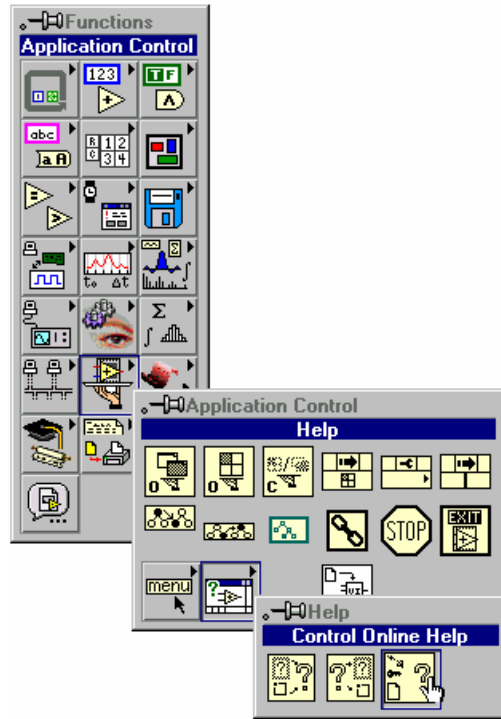
15. Mathematics (Matemáticas): Funciones matemáticas para realizar cálculos de funciones, derivadas, ecuaciones, integrales, etc. También funciones de probabilidad y estadística.



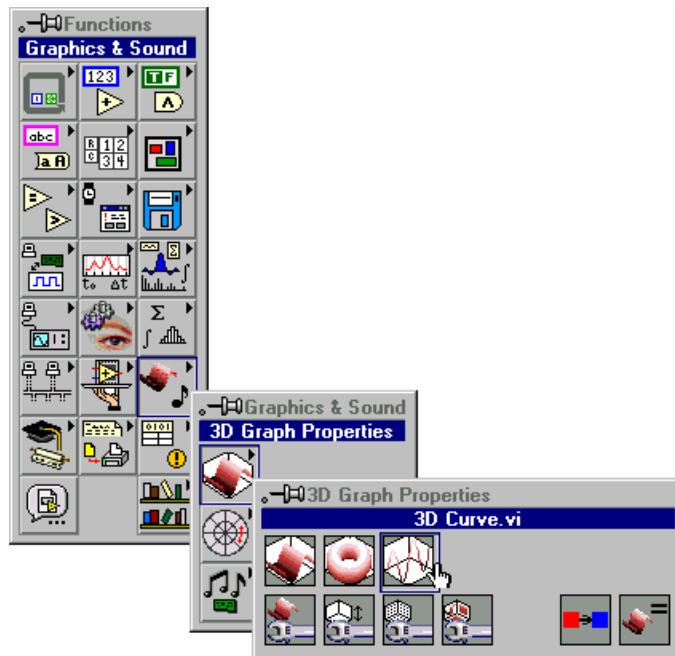
16. Communication (Comunicación): Para la comunicación de computadores en red, y enlace entre diferentes aplicaciones, como es el caso del DDE, Dynamic Data Exchange, que puede servir para enlazar aplicaciones de LabVIEW con Bases de datos como ACCES, para actualizarlas simultáneamente los hechos van ocurriendo. Otros parámetros son los de comunicación TCP y UDP para comunicación en red. Todo esto requiere de un aprendizaje especial.



17. Application Control (Control de Aplicaciones): Para manejar funciones especiales del sistema operativo. Ejemplo: Programas con ejecución simultanea, posición ventanas, etc.



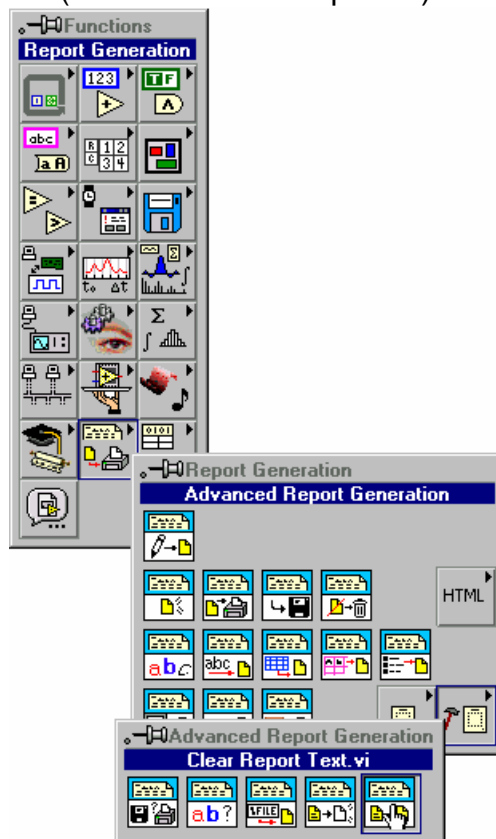
18. Graphics & Sound (Gráficos y Sonidos): Mejoramiento de graficos 3D, y implementación de sonidos.



19. Tutorial: Herramientas para el uso de ejemplos de adquisición de datos sin tener las tarjetas insertables.

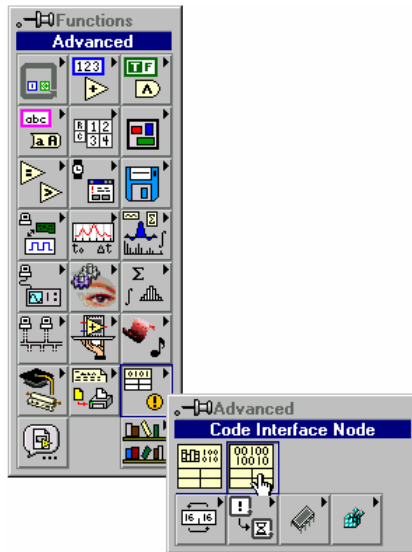


20. Report Generation (Generación de Reportes): En formatos de texto, o HTML.



21. Advanced (Avanzado): Bloques de llamada a códigos en C, o a librerías dinámicas de Windows DLL. Conversión de datos a binario; manejadores de ocurrencias

para ordenar el flujo de datos. Y otras funciones de uso más avanzado. No son de uso normal para principiantes.



2. DISEÑO DE UNA APLICACIÓN

2.1. USO DE LabVIEW

Los programas creados en LabVIEW reciben el nombre de *Instrumentos Virtuales* o VIs (*Virtual Instruments*). Cada VI consta de los siguientes tres componentes:

- Un Panel Frontal (Front Panel): Es la interfaces del usuario.
- Un Diagrama de Bloques (Block Diagram): Contiene el código fuente grafico que define la funcionalidad del VI.
- Icono y Conector: Identifica cada VI, de manera que podemos utilizarlo dentro de otro VI. Un VI dentro de otro VI se llama subVI. Sería como una subrutina en un lenguaje de programación basado en texto.

2.1.1. Panel Frontal

El Panel frontal, donde estarán ubicados todos los indicadores y controles que son los terminales de entrada/salida respectivos del VI y que el usuario podrá ver cuando el programa este en funcionamiento. Como controles tenemos *Knobs* y *dials* (botones giratorios), *push bottons* (pulsadores) y otros. Como indicadores tenemos *graphs* (graficas), *LEDs* y otros.

Los controles simulan elementos de entrada al instrumento, proporcionando datos al diagrama de bloques. Los indicadores simulan elementos de salida del instrumento, visualizando los datos que el diagrama de bloques adquiere o genera.

2.1.2. Diagrama de Bloques

El diagrama de bloques muestra el programa en código gráfico G, usando unas representaciones gráficas de funciones que controlarán los objetos del panel frontal. Se usan en este diagrama

estructuras de programación y flujo de datos entre las diferentes entradas y salidas, a través de líneas. En estas subrutinas son mostradas como iconos de cajas negras, con unas entradas y unas salidas determinadas, donde en el interior se cumple una función específica. El flujo se aprecia, como se dibujaría en un bosquejo de sistemas, cuando se habla de teoría de sistemas, donde cada subsistema se representa como un cuadro con entradas y salidas.

Se puede conmutar ambas pantallas mediante el comando **Show Panel/Show Diagram** (Mostrar Panel/Mostrar Diagrama) del menú **Window**.

Usando el comando **Tile** (Parcelas), dentro de este mismo menú, se puede posicionar el panel frontal y el diagrama de bloques uno al lado o encima del otro.

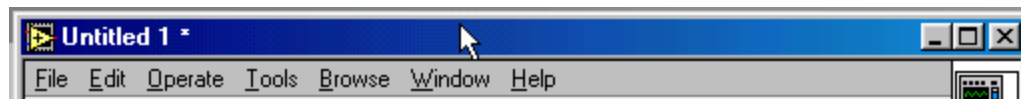
2.1.3. Icono de Conexión

Se usa para utilizar el programa creado como subrutina en otro programa, donde el icono será la caja negra y las entradas son las conexiones a los controles del programa subrutina y las salidas son las conexiones a los indicadores del mismo subprograma. Al crear el icono, se conecta a través del alambre de conexión a los indicadores y controles en la forma que se desee que se distribuyan las entradas y salidas en la caja negra, tal como en un circuito integrado algunos pines corresponden a alguna función en él. La idea es crear un sistema de programación modular, donde cada rutina creada llame otras rutinas y estas a su vez otras de menor nivel, en una cadena jerárquica con cualquier límite deseado. Así cuando se use un módulo, no se requiere saber como funciona interiormente, simplemente solo basta conocer sus entradas y salidas para ser usado.

2.1.4. Menús de LabVIEW

En la programación con LabVIEW se utilizan con frecuencia los diferentes menús. La barra superior de la ventana de menús de un VI contiene diversos menús **pull-down** (desplegables). Dichos menús contienen elementos comunes a otras aplicaciones Windows, como **Open** (abrir), **Save** (guardar) y muchas más de LabVIEW.

Menús de LabVIEW.



Menús desplegables de LabVIEW.

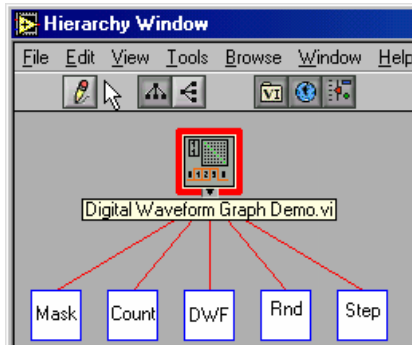
MENU	FUNCIÓN
File (Archivo)	Este menú contiene funciones para realizar operaciones básicas con los archivos, como abrirlos, cerrarlos, guardarlos e imprimirlos. También está la función <i>VI Properties</i> (propiedades del VI), que permite colocar un password al VI, editar y modificar una descripción de su funcionamiento u objetivo.
Edit (Edición)	Contiene funciones que permiten realizar búsquedas, así como modificar archivos de LabVIEW y sus componentes. La función <i>Undo</i> (deshacer), cancela la última acción realizada.
Operate (Función)	Contiene elementos para controlar el funcionamiento de los VIs, además que se pueden modificar los valores por defecto.
Tools (Herramientas)	En este menú encontramos todo aquello que necesitamos para pulir los VIs, como herramientas de comparación entre VIs, editor de librerías, generador de ejecutables o DLLs (Application Builder), editor de páginas Web, Instrument Wizard (localiza los instrumentos conectados al PC, instalar sus drivers y configurarlos). La función <i>Options</i> nos permite configurar un gran número de parámetros de LabVIEW.
Browse (Navegación)	Muestra la jerarquía del VI, a quien llama, cuales son sus subVI, VIs no abiertos y <i>breakpoints</i> (puntos de ruptura).

Window (Ventana)	Contiene funciones que permiten configurar la apariencia de las ventanas y paletas actuales. Además permite acceder a la función <i>Error List</i> (lista de errores) y ver el contenido del portapapeles.
Help (Ayuda)	Presenta la ayuda a los diferentes iconos y otros aspectos de LabVIEW. También se accede al soporte técnico de National Instruments.







2.1.5. Ventana de Jerarquía

Al seleccionar **Show VI Hierarchy** (Mostrar Jerarquía del VI) desde el menú **Browse** aparece una ventana que muestra los VIs y subVIs que hay actualmente en memoria. Los VIs principales se muestran en la parte superior de la ventana mientras que los subVIs con un icono correspondiente debajo del VI, con una línea que los conecta.

SubVIs debajo de su VI



Funciones de las herramientas en la ventana de Jerarquía..

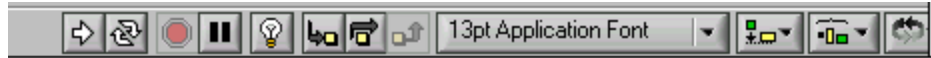
BOTON	ICONO	FUNCIÓN
Redibujar		Vuelve al estado inicial después de haber hecho sucesivas operaciones sobre los nodos de jerarquía.
Cambiar Esquema Vertical		Arregla los nodos de arriba hacia abajo, colocando los principales en la parte superior.
Cambiar Esquema Horizontal		<i>Arregla los nodos de izquierda a derecha, Colocando los principales al lado derecho.</i>
Incluir/Excluir VIs		Muestra u oculta librerías de los VIs.
Incluir/Excluir Variables Globales		Cambia el gráfico de jerarquías para mostrar u ocultar variables globales. Las variables globales almacenan datos usados por varios VIs.
Incluir/Excluir Definición de Tipos		Cambia el gráfico de jerarquías para mostrar u ocultar definición de tipos. Una definición de tipos es una copia maestra de un control optimizado, el cual puede ser utilizado por varios VIs.

Además la ventana **Help** se activa si movemos el cursor sobre los iconos, apareciendo la información disponible para el VI. Y haciendo doble-clic sobre el icono se abre el VI asociado correspondiente.

2.1.5. Barra de Herramientas (*Toolbar*)

Esta barra se utiliza para editar o ejecutar los VIs en el diagrama de bloques. Dependiendo del modo en que este, ya sea edición o ejecución habrán más o menos opciones.

Modo de edición (**Edit**):




Podemos crear o modificar un VI cuando este esta en modo **Edit**.

Modo de ejecución (**Run**):

















Cuando se va a probar el VI, se selecciona **Change to Run Mode** (Cambio al modo de ejecución) desde el menú **Operate**. De esta manera compilamos el VI y lo ponemos en el modo Run. En este punto podemos disponer de las opciones de depuración, **ejecución** del VI, impresión de datos, etc.

Si queremos ejecutar el VI desde el modo **Edit** sin pasar por el modo **Run**, debemos hacer clic en la flecha de ejecución .

La función de los diferentes botones es la siguiente:

Funciones de la barra de herramientas.

BOTON	ICONO	FUNCION
Run (Correr)		Ejecuta los VIs. Solo se puede ejecutar si la flecha que aparece es sólida, sin roturas. Por el contrario si se muestra una flecha rota mientras estamos creando o editando un VI, se considera que hay errores y por consiguiente no puede ejecutarse.
Run Continously (Corrido Continuo)		Ejecuta indefinidamente el VI hasta que lo abortamos o hacemos una pausa de ejecución y cambiara par indicar la ejecución continua.
Abort Execution (Detener Ejecución)		Aborta la ejecución del VI. Se debe no utilizar indiscriminadamente para terminar las ejecuciones de los VIs ya que podría ocasionar inestabilidad en el sistema. Solo emergencias.
Pause (Pausa)		Hace una pausa en la ejecución del VI. El punto donde se ha parado la ejecución queda resaltado en el diagrama de bloques.
Enter (Entrar)		Aparece cuando hay un nuevo valor disponible para reemplazar otro antiguo como el cambio del valor de un control.
Highligh Execution (Ejecución Resaltada)		Presenta una ejecución animada del diagrama de bloques.

Step Into (Ejecución Detallada)		Ejecuta la siguiente "línea" de código y después hace una pausa.
Step Over (Ejecución Semi-Detallada)		Misma función que Step Into, cuando llega a un subVI y otras funciones los ejecuta sin necesidad de abrirlos y entrar dentro de su código.
Step Out (Salida Ejecución)		Finaliza la ejecución del modo actual y después hace una pausa.
Text Settings (Configuración de Texto)		Cambia la fuente del texto que se quiere escribir.
Alineación de Objetos		Alinea los objetos seleccionados según unos ejes.
Distribución de Objetos		Distribuye los objetos espaciándolos según sea más conveniente.
Reordenación de Objetos		Reordena en relación uno del otro. Útil cuando debemos acceder a objetos al fondo o superpuestos.
Warning (Advertencia)		Aparece si un VI presenta un aviso o advertencia y si marcamos la opción Show Warnings (mostrar avisos) en la ventana Error List (Lista de Errores).




2.2. HERRAMIENTAS DE LabVIEW (Tools)








Una herramienta es un modo de funcionamiento especial del ratón, las cuales se usan para funciones específicas de edición o ejecución. Para acceder a estas se debe seleccionar la opción **Show Tools Palette** del menú **Windows**. Una forma alternativa es pulsar <Shift>+ botón derecho ratón.

Menú de herramientas.



Funciones del menú de herramientas.

BOTON	ICONO	FUNCION
Operate Value (Valor Operativo)		Maneja los controles del panel frontal (y los indicadores en el modo Edit). Es la única herramienta disponible en el modo Run .
Position/Size/Select (Situación/Tamaño/Selección)		Selecciona, mueve y redimensiona objetos.
Edit Text (Edición de Texto)		Crea y edita textos.

Connect Wire (Conexión de Cables)		Enlaza objetos del diagrama de bloques y asigna a los terminales del conector del VI los controles e indicadores del panel frontal.
Object Shortcut Menu (Menú pop-up del Objeto)		Despliega el menú pop-up asociado al objeto. Tiene el mismo efecto al pulsar al pulsar el boton derecho del ratón sobre el objeto.
Scroll Window (Desplazamiento de la Pantalla)		Desplaza la pantalla en la dirección requerida para ver posibles zonas ocultas.
Set/Clear Breakpoint (Establecer/Quitar puntos de Ruptura)		Permite poner tantos puntos de ruptura como queramos a lo largo del diagrama de bloques.
Probe Data (Sonda de Datos)		Permite capturar resultados intermedios durante la ejecución de un VI que dan resultados inesperados o dudosos.
Get Color (Capturar Color)		Permite saber de manera específica qué color tiene un objeto, texto u otros elementos.
Set Color (Colorear)		Colorea diversos objetos y los fondos.

Se deberá hacer clic sobre la herramienta que se desee y usando la tecla TAB se podrá seleccionar la siguiente herramienta. Además pulsando la tecla SPACE se cambia entre la herramienta **Operating** y **Positioning** cuando la ventana **Panel** esta activa y entre la herramientas **Wiring** y **Positioning** cuando la ventana **Diagram** es la activa.

2.3. AYUDA Y VENTANA DE AYUDA

La ventana **Help** de LabVIEW ofrece información sobre funciones, constantes, subVIs, controles e indicadores. Para visualizarla, escoger **Show Context Help** del menú **Help**.

Si el VI tiene asociada una descripción, ésta se visualizará, dichas descripciones se introducen mediante el dialogo **VI Description** que encontramos haciendo: **File>>VI Properties...>>Category>>Documentation**.

Los nombres de los terminales son las etiquetas o **Labels** de los correspondientes controles o indicadores del panel frontal.

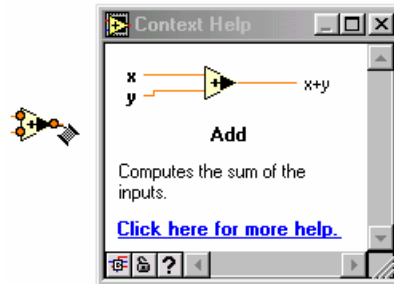
Al pasar el cursor sobre una constante universal, la ventana **Help** visualiza su valor y cuando se pasa sobre un control o indicador, se visualiza su descripción para cada uno en concreto, si hay información.

Al poner la herramienta **Wiring** sobre un cable, **Help** visualiza el tipo de dato transportado por dicho cable. Además al moverla sobre el icono del VI, el terminal correspondiente al conector se ilumina en la ventana **Help**.

También se usa el comando **Lock Help** (Bloquear ayuda) del menú **Help** para mantener una ayuda particular en pantalla de manera que al mover las herramientas no cambie la visualización de la pantalla.

El aspecto más significativo es al trabajar con la herramienta **Connect Wire**, la cual al situarla sobre una función, de su icono sale un pequeño trozo de cada terminal y no solo esto sino que queda reflejado en una etiqueta el nombre del terminal al que vamos a realizar la conexión, para que no haya posibilidad de errores.

Ventana de ayuda.



2.4. CREACIÓN DE OBJETOS/PROGRAMAS

Para la elaboración de un panel frontal debemos situar sobre el los objetos deseados mediante su selección desde la paleta **Controls**. Al igual que para crear objetos sobre el diagrama de bloques seleccionándolos desde la paleta **Funtions**. Para acceder a las paletas, sencillamente se hace mediante dos procedimientos: el más rápido es hacer clic en el botón derecho del ratón sobre cualquier parte del panel frontal o diagrama de bloques que carezca de objetos y el otro es acceder al menú **Window** y seleccionar **Show Controls Palette** o **Show Funtions Palette**, según estemos en un panel o diagrama respectivamente.

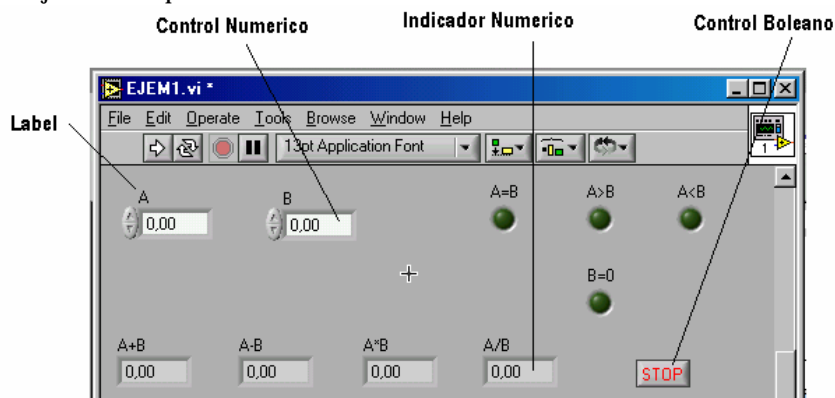
2.4.1. Panel Frontal

Al desarrollar una aplicación o una subrutina primero se debe tener un claro conocimiento de que valores se van a utilizar, cuales van a ser las entradas y cuales las salidas, para así definir como se van a entrar y sacar estos valores.

Por ejemplo si simplemente se desea realizar un programa que tome dos números y entregue como resultado la suma de estos hasta que se pulse un botón de stop, al final diga que terminó, se sabe que debe haber un instrumento de control para la entrada de cada valor y un indicador que muestre el resultado.

Crear lo anterior se logra simplemente ubicándose en el panel frontal y sacando dos controles y un indicador del menú **Controls**. Esto se hace uno a uno y se debe ir nombrando cada elemento en el **label**, a medida que se van posicionando.

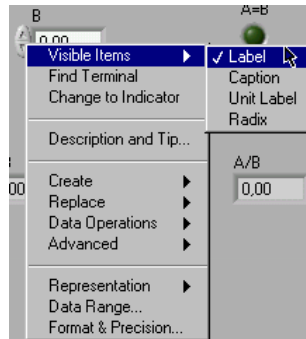
Creación de objetos en el panel frontal.



Se aprecia como en estos instrumentos digitales se diferencian los controles del indicador porque estos cuentan con unas flechas para manipularlos cuando el programa está corriendo. También se pueden cambiar escribiendo sobre ellos.

Estos controles se pueden configurar sacando el menú pop-up de cada uno, señalándolo y oprimiendo el botón derecho del ratón, así si por ejemplo se comete un error al nombrar el instrumento y no se alcanza a escribir el nombre, en este menú en la subsección **Visible Items, label**, se puede hacer que reaparezca la marca para así escribir sobre ella.

Menú pop-up de los objetos.

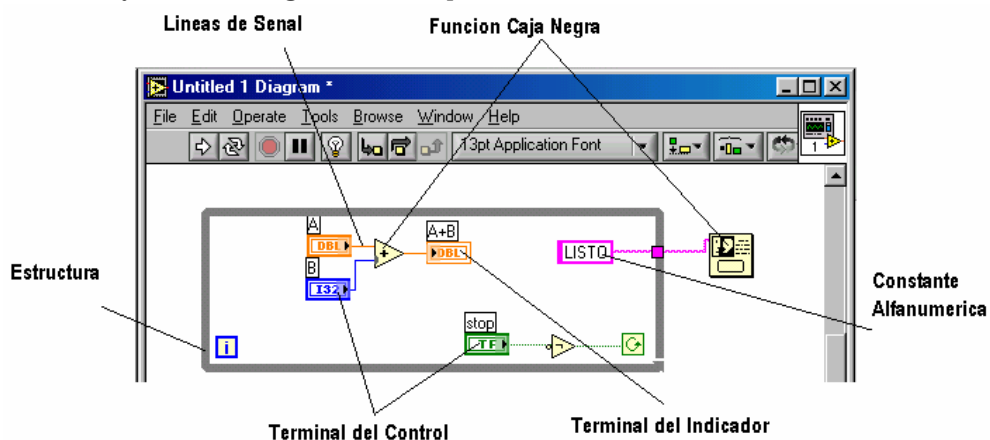


2.4.2. DIAGRAMA DE BLOQUES

En éste se ve el flujo del programa, y se compone de cinco tipos de elementos.

- Las terminales de conexión de los indicadores y de los controles del panel frontal. Se nota que las líneas del dibujo de la conexión de los controles es más gruesa que la de los indicadores, para diferenciarlos.
- Las constantes.
- Las funciones y cajas negras, donde se procesan las señales.
- Las estructuras de programación.
- Los cables que conducen las diferentes señales, los cuales varían según la señal que conducen.

Creación de objetos en el diagrama de bloques.



Para realizar el diagrama de bloques se buscan las estructuras necesarias en el menú de **Functions, Structures** donde se encuentra el ciclo mientras (**While**).

Posteriormente se ubican las funciones necesarias en el menú de **Functions**, como en este caso el sumador y el negador en el submenú **Numeric** y el cuadro de diálogo en el submenú **Time & Dialog**.

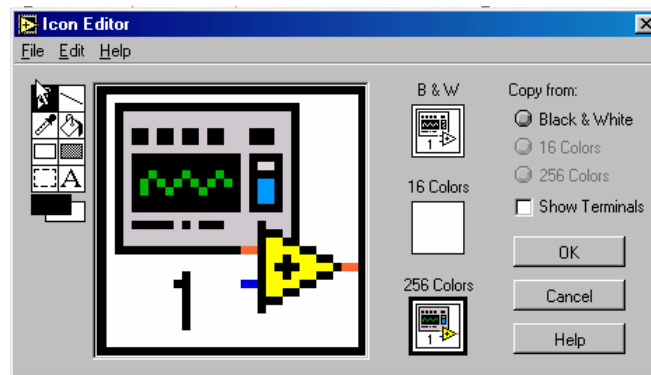
Los terminales aparecen automáticamente en el diagrama de bloques al armar el panel frontal. Por último se hacen las conexiones con ayuda de la herramienta de alambrado.

2.4.3. CONEXION DE ICONO

Si se desea que el programa realizado sirva como subrutina para otro VI de mayor jerarquía, como primero se debe realizar un Icono que represente el VI, y luego hacer las conexiones entre los terminales del icono y los instrumentos del panel frontal. Cabe anotar que se conectan solo los deseados. Los que no se conecten tomaran el valor que poseen como **Default**, o valor propio inicial correspondiente, para las funciones y operaciones que se deban realizar.

Para editar el icono se selecciona con el botón derecho del ratón en el icono del panel frontal y se selecciona **'Edit Icon'**. En este editor se puede dibujar el icono deseado.

Editor de Iconos.



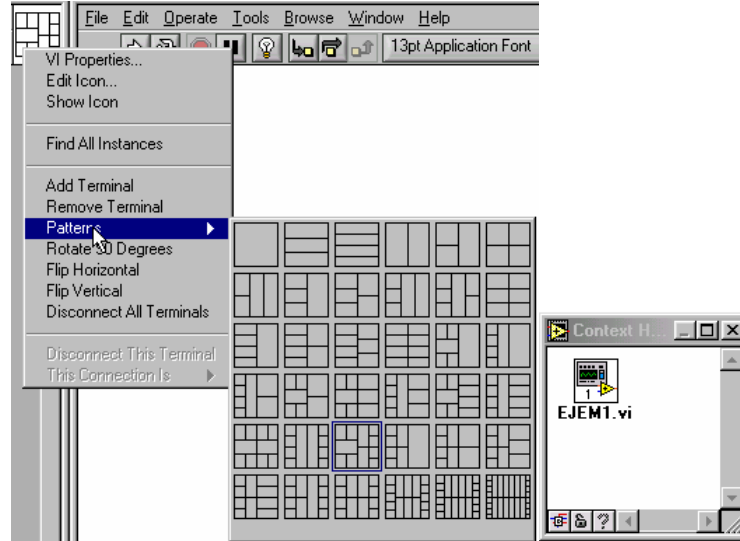
Funciones de las herramientas del editor de iconos.

BOTON	ICONO	FUNCIÓN
Pencil (Lápiz)		Dibuja y borra pixel a pixel.
Line (Línea)		Dibuja líneas rectas.
Dropper (Gotero)		Captura el color del pixel seleccionado.
Fill Bucket (Relleno)		Rellena un área con el color seleccionado.
Rectangle (Rectángulo)		Dibuja un rectángulo.
Filled Rectangled (Rectángulo relleno)		Dibuja un color y lo rellena con el color seleccionado.
Select (Selección)		Selecciona una determinada área para moverla, copiarla o realizar cualquier otro cambio.
Text (Texto)		Introduce un texto en el icono.

Foreground Background		Indica los colores actuales del primer plano y fondo.
------------------------------	---	---

Después de tener el icono deseado se muestran los conectores por medio de **Show Connector** en el mismo menú pop-up y con la herramienta de alambrear se hacen las conexiones con los dispositivos del panel haciendo primero clic en el indicador o control y luego en el pin del icono deseado. Es recomendable conectar las entradas a la izquierda y las salidas a la derecha.

Menú pop-up del indicador y control de iconos.



Si se requieren más conectores, se puede cambiar el esquema de conexiones, por medio de **Patterns** en el menú pop-up, cuando está mostrando los pines. Cuando está lista la conexión la ventana de **Help** muestra como quedan las entradas y salidas. Luego de terminar el programa solo es salvarlo.

3. PROGRAMACIÓN ESTRUCTURADA

Al programar, muchas veces es necesario ejecutar un mismo conjunto de sentencias un número determinado de veces, o que se repitan mientras se cumplan ciertas condiciones. Al igual que ejecutar una u otra sentencia dependiendo de condiciones fijadas previamente o simplemente lograr que unas se ejecuten antes que otras.

Para lo cual LabVIEW dispone de cuatro estructuras fácilmente diferenciables y disponibles en la opción **Structures** del menú **Functions** y ventana **Diagram** que son:

- Las Secuencias
- Los cuadros de Casos
- Los ciclos For-Next
- Los ciclos While

Diferentes estructuras de programación.



Sequence Structure



Case Structure



For Loop



While Loop

Otros elementos de programación son las variables, que pueden ser de tipo global o local y los cuadros de fórmula.

3.1. ESTRUCTURAS ITERATIVAS: FOR LOOP Y WHILE LOOP

3.1.1. LOS CICLOS FOR (*For Loop*)

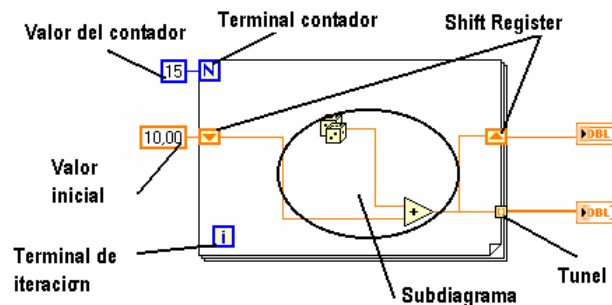
Se requiere cuando queremos que una operación se repita un número determinado de veces. Su equivalente en lenguaje convencional es:

```
For i = 0 to N-1  
  Ejecuta Subdiagrama
```

Al colocar un **For Loop** en la ventana **Diagram** se observa que tiene asociados dos terminales:

1. Terminal contador: Contiene el número de veces que se ejecutará el subdiagrama creado en el interior de la estructura y el cual dicho valor se fijara externamente.
2. Terminal de iteración: indica el número de veces que se ha ejecutado la estructura: Cero durante la primera iteración, uno en la segunda y así hasta N-1.

Configuración de la estructura For.



3.1.2. LOS CICLOS WHILE (*While Loop*)

Sirven para hacer que una secuencia de instrucciones se repita una cantidad de veces, siempre y cuando una determinada condición sea verdadera o falsa. En LabVIEW se ejecutarán las funciones que se encuentren dentro del cuadro de ciclo, tomando los valores que quedaron almacenados en la frontera de entrada y sacando los resultados a la frontera de salida. Su equivalente en lenguaje convencional es:

```
Do ejecutar subdiagrama  
While condición is TRUE (or FALSE)
```

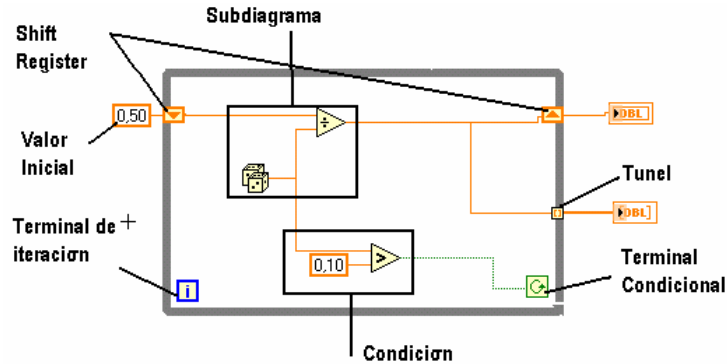
Al igual que **For Loop** contiene dos terminales:

1. Terminal condicional: Aquí se debe conectar la condición que hará se ejecute el diagrama. LabVIEW comprobará el estado de este terminal al final de cada iteración. Se

puede configurar el terminal de manera que pare si la condición es verdadera (**Stop if True**) o bien que pare si la condición es falsa (**Continue if True**).

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

Configuración de la estructura While.



3.2. REGISTROS DE DESPLAZAMIENTO (*Shift Register*):

Los registros de desplazamiento son variables locales, disponibles tanto en **For Loop** como en **While Loop**, que permiten transferir los valores del final de una iteración al principio de la siguiente. Estos se crean sacando el menú pop-up del ciclo en una de las fronteras. Se crean unas memorias en las fronteras de entrada y salida. Después del ciclo el dato resultado colocado en el shift de la frontera de salida, pasa a ocupar el lugar del shift de la frontera de entrada para participar en las funciones del ciclo. El tipo de dato manejado puede ser cualquiera, como se ve en el ejemplo, se maneja un dato boleano de verdadero falso.

El dato inicial siempre debe ser definido, pues en la primera iteración estas memorias de entrada se encuentran vacías. Esto se logra conectando un valor a las memorias.

Es posible almacenar no solo datos de la última iteración, sino de la penúltima y muchas anteriores, agregando shift's a la entrada, por medio del menú pop-up, shift, con **Add Element** (añadir elemento). Así el ejemplo muestra como tener una secuencia donde se genera una cantidad de números al azar y se calcula el promedio de los tres últimos números.

3.2.1. INDEXADO (*Indexing*)

Existe la posibilidad de pasar datos de forma automática desde el interior de la estructura al exterior. Cuando un cable atraviesa los límites del **Loop** aparece un nuevo terminal llamado túnel que sirve de conexión entre el interior y exterior de manera que los datos fluyen a través de él, después de cada iteración del **Loop**. Los ciclos se pueden utilizar para crear matrices simplemente acumulando los datos en la frontera de salida, sin permitir que el último borre el primero, y más bien apilándolos uno tras otro en matriz. Esto se logra sacando el menú pop-up de el punto negro de la frontera de salida, el cual es el elemento de memoria o buffer y seleccionan de **'Enable indexing'**. Esta posibilidad que tiene tanto For como While de acumular arrays en sus límites se llama auto-indexing o autoindexado. Se aprecia que el cable de salida ahora es más grueso y debe llevar los datos a un indicador de matriz.

3.4. LAS SECUENCIAS (*Sequence*)

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

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 usaremos la estructura *Sequence* para forzar un determinado flujo de datos. Cada subdiagrama esta contenido en un **frame** o marco y estos se ejecutaran en orden de aparición: Primero el **frame 0** o marco 0, después el **frame 1** y así, sucesivamente hasta el último.

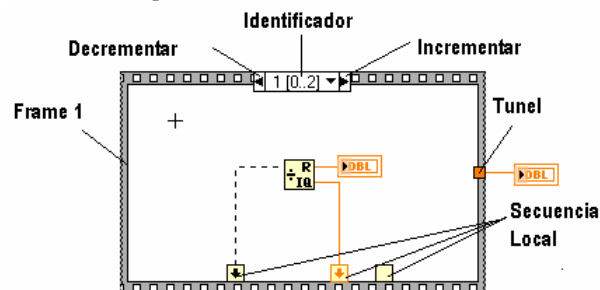
Al contrario del *Case*, si un **frame** aporta un dato de salida a una variable los demás no tendrán por que hacerlo. Pero se debe tener en cuenta que el dato estará solamente disponible cuando se ejecute el último **frame** y no cuando se ejecute el **frame** que transfiera el dato.

Para agregar un cuadro adicional tal como en las estructuras *case*, se logra por medio del menú pop-up en el borde del marco, **Add Frame (After o Before)**.

Para seleccionar el cuadro en el que se edita se usa el indicador en el extremo superior del marco.

Un truco posible para lograr que una función siga a la otra sin usar cuadros de secuencias, es usando cables que delimiten un flujo obligatorio.

Configuración de la estructura *Sequence*.



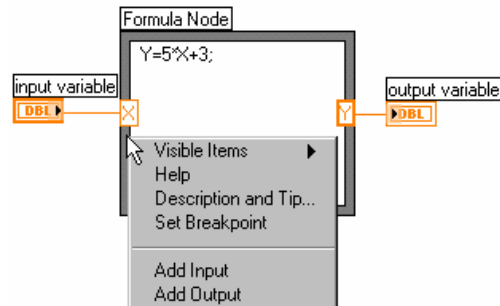
3.5. NODO DE FORMULA (*Formula Node*)

Formula Node es una función de características similares a las estructuras vistas anteriormente, disponibles en la paleta **Structures** del menú **Functions**, pero en lugar de contener un subdiagrama, contiene una o más formulas separadas por un punto y coma. Se usa **Formula Node** cuando se quiere ejecutar formulas complicadas de crear utilizando las diferentes herramientas que LabVIEW incorpora en sus librerías.

Una vez escrita la formula en el rectángulo solo se tiene que añadir los terminales que hacen la función de variables de entrada o de salida; desplegando el menú pop-up de la estructura

y ejecutando el comando **Add Input** (añadir entrada) o **Add Output** (añadir salida). Como regla después de cada función se debe colocar un punto y coma “;”.

Configuración nodo de formula.



Cada variable tiene otro menú pop-up que permite definirla como de salida si antes era de entrada y viceversa (**Change to Output** o **Change to Input**). Se puede eliminar mediante el comando **Remove**.

3.6. VARIABLES

Los parámetros de entrada para una función pueden lograrse a través de controles, indicadores, e incluso variables. Las salidas pueden usarse para mostrarse en indicadores o simplemente para ser almacenadas en los mismos elementos los cuales son las variables. Estas se usan para almacenar datos y pueden ser de dos tipos según su uso, de tipo Local o de tipo Global.

3.6.1. LOCALES

Son variables asociadas a algún control o indicador dentro de un programa VI, en el cual son usadas. Cuando se escribe en una de éstas, el contenido del indicador o control cambia.

El uso de estas variables facilita la visualización en el diagrama cuando se va a acceder varias veces un mismo dato, puesto que evita llenar de cables conductores la pantalla, que conduzcan el valor desde el control al lugar requerido.

Son una forma adecuada de escribir sobre un control, desde el algoritmo.

Las variables locales solo son entendidas por el programa VI que las posee, ninguna subrutina entiende el contenido de éstas, ni ningún programa VI diferente.



Para obtener una variable Local, se busca por el menú de **Structures LOCAL**.

Para seleccionar el indicador o control que se accesa, seleccionar por medio del menú pop-up de la variable, **Select Item**.

Si se desea leer un valor de la variable seleccionar en el menú pop-up **Change to Read**. El icono de la variable mostrará las paredes laterales más gruesas que en el caso de la variable a la que se escribe. Para escribir seleccionar en el menú pop-up **Change to Write**.

3.6.2. GLOBALES

Las variables globales son un tipo especial de VI, que únicamente dispone de panel frontal, en el cual se define el tipo de dato de la variable y el nombre de identificación imprescindible para después podernos referir a ella.

La diferencia con las variables locales radica en que estas pueden ser entendidas por cualquier programa y/o subrutina VI y pueden ser actualizadas por los mismos. Estas se almacenan en un archivo diferente de extensión **.GLB** que consta únicamente de un panel frontal donde se encuentran todas las variables asociadas a dicho archivo, lo que quiere decir que en un archivo se pueden guardar numerosas variables.



Para crear una variable global, se selecciona del menú **Structures GLOB**. Luego con el menú pop-up se da la orden de abrir el panel frontal de esta variable y allí se colocan todos los indicadores y controles que almacenan los datos deseados. Posteriormente se graba como cualquier otro programa VI, pero con extensión **.DBL**.

Con la variable creada solo es seleccionar en el menú pop-up del icono de la variable con **Select Item**, el valor al que se lee o escribe.

Para colocar en el diagrama otra variable global del mismo dato, ahora se hace mediante el comando **Select a VI...** del menú *Functions*, y se selecciona la variable en concreto a través de la ventana **Choose the VI to open**, tal como si se fuera a usar una subrutina ya creada.

3.7. NODOS DE PROPIEDAD (*Property Node*)

Los **Property Node** se pueden considerar como variables que dependen únicamente del terminal a partir del cual se han creado y que permiten leer o modificar atributos del panel frontal de un control o indicador como: cambiarlo de color, hacerlo invisible, desactivarlo, leer posiciones de cursores, cambiar escalas, etc. Para crear un **Property Node** basta seleccionar la opción **Create>>Property Node** del menú pop-up de cualquier control del Panel Frontal o terminal del Diagrama de Bloques. Una vez creado aparece en el Diagrama un nuevo nodo que puede ser tanto de escritura como de lectura, el cual se indica mediante una pequeña flecha a la izquierda o derecha respectivamente.

ANEXO C: ESQUEMA JERARQUICO DE LA PROGRAMACIÓN DEL SOFTWARE.

