



EQUIPO MEDIDOR DE VARIABLES ELECTROMECÁNICAS
MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

Por

Salomón Rodríguez Carrera

COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN OPTOMECATRÓNICA

DIVISIÓN DE FOTÓNICA,
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.
LEÓN, GUANAJUATO, MÉXICO.

2011

Supervisor: Dr. Raúl Alfonso Vázquez Nava

Sinodales: Dr. Ascención Guerrero (CIO)

Dr. Rafael Castro Linares (CINVESTAV)

Contenido

Contenido	v
Lista de Figuras	vii
Resumen	xi
Agradecimientos	xii
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	5
1.2 Panorama de la tesis	9
2 Eficiencia energética y Método de prueba	11
2.1 Conceptos generales	11
2.2 Eficiencia del conjunto motor bomba sumergible	13
2.3 Método de prueba del CMBS	19
3 Medición de la velocidad	23
3.1 Métodos de Medición Directa de la velocidad	24
3.2 Métodos de Medición Indirecta de la velocidad	45
4 Instrumentación virtual	57
4.1 Instrumentación virtual	58
4.2 Diseño de instrumentos virtuales	59
4.3 Calibración de instrumentos virtuales	62
5 Equipo medidor desarrollado	65
5.1 Descripción general del equipo	65
5.2 Diseño del equipo	66
5.3 Desarrollo del equipo	80
5.4 Implementación del equipo	95

6 Resultados	99
6.1 Pruebas de laboratorio	100
6.2 Resultados	114
7 Conclusiones	117
7.1 Aportaciones	118
7.2 Trabajo a futuro	119
A Plan de negocios	121
Referencias	129

Lista de Figuras

1.1	Tacómetro de lengüetas vibratorias usado en los laboratorios de ensayos.	9
2.1	Partes principales que conforman al CMBS.	16
2.2	Diagrama de selección del CMBS.	18
3.1	Esquema general de clasificación de las técnicas para medir la velocidad.	23
3.2	Tacogenerador comercial.	25
3.3	Esquema de configuración del tacogenerador.	25
3.4	Disposición de la excitación y detección.	26
3.5	Representación interna del funcionamiento de un encoders e imagen de encoder comercial.	28
3.6	Esquema general de un sensor inductivo de reluctancia variable.	32
3.7	Representación interna del funcionamiento de un encoders e imagen de encoder comercial.	34
3.8	Esquema general de un sensor inductivo transformador variable.	36
3.9	Esquemas de condensadores con diferentes tipos de geometrías.	38
3.10	Esquema de funcionamiento de un sensor Fotoelectronico.	41
3.11	Esquema de funcionamiento de un sensor de Efecto Hall.	43
3.12	Apariencia física de un Acelerómetro.	50
3.13	Acelerómetro Piezoeléctrico.	53
3.14	Diagrama de bloques del sistema acústico para la medición de velocidad [9].	55
3.15	Tacómetro de lengüetas vibratorias.	56
4.1	Sistema de monitoreo y control de vibración en computadora, a través de una tarjeta de adquisición de datos, acondicionamiento de señal y transductores.	60

5.1	Esquema general del monitoreo de las variables que intervienen durante una prueba en piscina.	65
5.2	Descripción general del equipo de instrumentación virtual.	66
5.3	Esquema general del proceso de sensado de voltajes trifásicos sobre el tablero de alimentación.	67
5.4	Diagrama de conexión de los transformadores que acondicionan las señales de voltajes.	68
5.5	Diagrama de conexión de las donas de transductoras que acondicionan las señales de corriente.	69
5.6	Diagrama de conexión de las donas de transductoras que acondicionan las señales de corriente.	70
5.7	Variación de las señales de corriente y voltaje en el tiempo.	71
5.8	Triángulo de potencias para una señal senoidal sin armónicos.	72
5.9	Triángulo de potencias para una señal senoidal con presencia de armónicos.	72
5.10	Relaciones de fase entre las señales trifásicas de voltaje y corriente.	74
5.11	a) Acondicionamiento de la señal a la salida del manómetro para poder leerla por con la tarjeta de adquisición y b) Gráfica que relaciona la presión con la corriente a la salida de un manómetro digital.	76
5.12	a) Acondicionamiento de la señal a la salida del flujómetro para poder leerla por con la tarjeta de adquisición y b) Gráfica que relaciona el caudal con la corriente a la salida de un flujómetro digital.	77
5.13	Medición indirecta de la velocidad del motor mediante un tacómetro de lengetas vibratorias.	78
5.14	Descripción general del proceso de medición de la velocidad.	79
5.15	Imagen que muestra los elementos principales al interior del gabinete.	81
5.16	Diagrama de conexiones visibles dentro del gabinete.	82
5.17	Imagen del equipo durante una prueba, donde se muestran los elementos principales conectados al gabinete.	83
5.18	a) CMBS con el dispositivo sensor de la velocidad acoplado. b) Cuerpo de succión del CMBS donde que permite observar el sensor, la montura y la abrazadera colocada sobre el rotor.	84
5.19	a) Tarjeta de adquisición NI USB-6211 con terminal tipo tornillo. b) Cable de conexión para puerto USB.	85
5.20	Diagrama de conexiones realizadas en la tarjeta adquisición NI USB-6211.	87
5.21	Panel frontal del sistema de Instrumentación Virtual.	88

5.22	Código principal del Instrumento Virtual desarrollado en LabVIEW.	89
5.23	Fragmento del código principal donde se realiza el monitoreo de voltajes y corrientes.	90
5.24	Fragmento del código principal donde se realiza el monitoreo del factor de potencia.	91
5.25	Fragmento del código principal determina la altura manométrica y el flujo.	92
5.26	Fragmento del código principal donde se determina la velocidad.	93
5.27	Fragmento del código principal donde se presentan los resultados en forma tabular.	94
5.28	Fragmento del código principal encargado de almacenar una nueva prueba.	94
5.29	Fragmento del código encargado de buscar una prueba anteriormente almacenada.	95
5.30	Fragmento del código principal encargado de generar las salidas de alerta.	95
5.31	Implementación del equipo en una empresa con laboratorio de pruebas del CMBS.	96
5.32	a) CMBS con el dispositivo sensor de la velocidad previamente instalado antes de ser sumergido en la piscina. b) CMBS sumergido en la piscina y operando bajo la supervisión constante de un auxiliar del laboratorio de pruebas.	97
5.33	Monitoreo y captura de las variables que intervienen durante el proceso de prueba del CMBS, empleando el equipo de instrumentación virtual.	98
6.1	a) Panel frontal del equipo <i>versión 1</i> donde se monitorean las señales de voltaje y corriente en el tiempo, así como los valores en RMS. b) Equipo empleado para la comparación de voltajes, multímetro marca Autonics modelo DM-332. c) Equipo empleado para la comparación de corrientes, ampérmetro de gancho marca Autonics modelo 8EW-3900CL.	100
6.2	a) Elementos principales para la prueba y ajuste del parámetro velocidad del motor. b) Prueba de velocidad para un motor de 1 HP utilizando un sensor inductivo y un pulsometro como medidor de referencia. c) Comparación entre el equipo de instrumentación virtual y el indicador de referencia pulsometro marca Autonics serie MP5W.	101
6.3	Primeros ensayos del equipo sobre 2 motores no sumergibles alimentados a 220V, con capacidad de 30HP y 20HP respectivamente, la velocidad de giro es cercana a 1800rpm en vacío.	102
6.4	Ensayo del equipo utilizando un motor sumergible de 2HP alimentado a 220V, la velocidad de giro detectada seala 3583 rpm, considerando que el motor se encuentra en vacío.	103
6.5	Ensayo del equipo VI sobre el CMBS de capacidad 30HP en un laboratorio de pruebas de bombas sumergibles tipo pozo profundo.	104

6.6	Equipos de medición utilizados para el monitoreo de las variables eléctricas durante el estudio del comportamiento del motor.	105
6.7	Gráfica del comportamiento de los voltajes de línea en función de la velocidad, para un motor sumergible de 5HP obtenida con el equipo de instrumentación virtual.	107
6.8	Gráfica del comportamiento de las corrientes de línea en función de la velocidad, para un motor sumergible de 5HP obtenida con el equipo de instrumentación virtual.	108
6.9	Gráfica del comportamiento del factor de potencia en función de la velocidad.. . . .	108
6.10	Gráfica del comportamiento del par en función de la velocidad.	109
6.11	Gráfica del comportamiento de la potencia de salida en función de la velocidad.	110
6.12	Gráfica del comportamiento de la eficiencia en función de la velocidad para el motor sumergible de 5HP monitoreado con el equipo de instrumentación virtual.	110
6.13	Gráfica del comportamiento de las corrientes de línea en función de la velocidad, para un motor sumergible de 2HP obtenida con el equipo de instrumentación virtual.	111
6.14	Gráfica del comportamiento de los voltajes de línea en función de la velocidad, para un motor sumergible de 2HP obtenida con el equipo de instrumentación virtual.	112
6.15	Gráfica del comportamiento del factor de potencia en función de la velocidad, es claro ver que se encuentra por debajo de lo que se establece en los datos de placa a su velocidad nominal.	112
6.16	Gráfica del comportamiento de la potencia de salida en función de la velocidad.	113
6.17	Gráfica del comportamiento de la eficiencia en función de la velocidad para el motor sumergible de 2HP.	113
6.18	Comportamiento de las corrientes monitoreadas con el equipo VI y el equipo de referencia.	115
6.19	Comportamiento de los voltajes monitoreados con el equipo VI y el equipo de referencia.	115
6.20	Comportamiento del factor de potencia monitoreado con el equipo VI y el equipo de referencia.	116
6.21	Comportamiento de la eficiencia calculada con el equipo VI y la visualizada en el equipo de referencia.	116
A.1	Organigrama de la empresa.	123

Resumen

La tesis presenta el diseño, desarrollo e implementación de un equipo basado en instrumentación virtual para la medición (monitoreo, control y registro) de las variables electromecánicas (eléctricas, hidráulicas y mecánicas) que intervienen durante el proceso de prueba de dispositivos conocidos como conjunto motor bomba sumergible (CMBS). El trabajo propone una solución innovadora y de gran aplicación, tanto a nivel industrial como de laboratorio en instituciones de investigación.

Como parte de éste trabajo se desarrollo un dispositivo para la medición de la velocidad que es fácil de instalar en el CMBS. Con nuestro equipo realizamos mediciones de las variables electromecánicas de motores con diferentes capacidades. Nuestras mediciones las comparamos con las mediciones obtenidas con otros equipos de medición obteniendo los mismos resultados. También presentamos los resultados experimentales de dos motores sumergibles tipo pozo profundo analizados con un banco de frenado electromagnético para determinar *la eficiencia del motor* y sus curvas de comportamiento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la maravillosa oportunidad de estudiar la maestría en optomecatrónica en el Centro de Investigaciones en Óptica, también agradezco a mis padres por enseñarme a trabajar y a nunca rendirme. Como no mencionar a mis compañeros y amigos Adrian Coronel, Alejandra Moreno, Josúe Calderón, David Serrano, Geliztle Parra, Yanely Machuca, Adrian Martinez, Héctor Santiago, Carlos Froylan, Alan Blanco por mencionar algunos quiénes me apoyaron en situaciones difíciles. De manera muy especial quiero agradecer por la alegría de vivir que sólo *Belén* me hace sentir.

Al Dr. Raúl Alfonso Vázquez Nava, director de mi tesis, de quién tengo la grata fortuna de haber trabajado bajo su asesoramiento, aprehendiendo de él como maestro y amigo. Le agradezco además por su paciencia, dedicación, confianza e interese que siempre mostró hacia mí.

Al Departamento de Formación Académica, en especial al Dr. Francisco J. Cuevas, Lic. Guillermina Muñiz, la Lic. Laura González y su personal asistente de quién siempre recibí un gran apoyo, a todos ustedes gracias por aportar algo en mi formación personal. También quiero extender mi agradecimiento al Centro de Investigaciones en Óptica por los apoyos mostrados y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme la beca No. 40237.

1 Introducción

El físico y químico inglés Michael Faraday (1791-1867), es conocido principalmente por su descubrimiento de la inducción electromagnética, que ha permitido la construcción de generadores y motores eléctricos, y de las leyes de la electrólisis por lo que es considerado como el verdadero fundador del electromagnetismo y de la electroquímica.

En 1821, después de que el químico danés Oersted descubriera el electromagnetismo, Faraday construyó dos aparatos para producir lo que el llamó rotación electromagnética, en realidad, un motor eléctrico. Diez años más tarde, en 1831, comenzó sus más famosos experimentos con los que descubrió la inducción electromagnética, experimentos que aún hoy día son la base de la moderna tecnología electromagnética.

Nuestro mundo sin imanes sería un caos o por lo menos estaríamos estancados en un mundo rodeado de pocos científicos y pocos inventos tecnológicos, porque ya ahora dependemos de el magnetismo y los imanes, quiere decir que ha pasado a ser muy necesaria la aplicación de imanes y el magnetismo. Podemos decir que la indispensabilidad de este producto o elemento es requerida en todos lados del mundo.

Si nuestros antepasados hubiesen descubierto el electromagnetismo en una época más atrás digamos un siglo antes, nuestros avances tecnológicos y sociales serían muy mayores, a tal grado que posiblemente seríamos una sociedad mucho mas avanzada y seguramente estaríamos viviendo cosas que ni siquiera aún imaginamos.

Pero que sería del mundo sin el magnetismo o los imanes, pensándolo bien a profundidad, nos encontraríamos ahogados, inmersos en el campo y en el estanque tecnológico y científico. Nuestros alcances o posibilidades de desarrollarnos o tener productos de necesidad diaria, como por ejemplo un cepillo de dientes eléctrico, o con al menos la invención de un motor eléctrico

requiere de dos imanes para su funcionamiento, ya que este motor esta aplicado a casi todo producto, ya sea pequeño o muy grande. Resaltando por ejemplo, que para extraer agua de los pozos para nuestro servicio diario es indispensable contar con un equipo de extracción conocido comúnmente como motobombas, sin éstas no tendríamos agua suficiente para beber.

Hoy en día es muy amplia la utilización de las máquinas eléctricas, sobre todo cuando se piensa en los generadores eléctricos, los cuales funcionan bajo el principio del motor eléctrico, sin estos generadores ó alternadores no es posible imaginar la tan indispensable energía eléctrica, y menos la creación de la energía alterna. No seríamos tan avanzados y muy poco competentes.

El tema de *mejora de los motores* a tomado gran relevancia hoy en día, observándose ya desde hace tiempo que poco a poco se han ido perfeccionando haciéndolos más pequeños y cada vez más potentes, pero ¿cómo saber que realmente se están mejorado?, la respuesta a esa pregunta se obtiene si pensemos en una palabra, *mediciones*.

Si damos un vistazo al sector industrial, observamos que recientemente ha surgido la necesidad de actualizar sus equipos de medición a medida que las normas de metrología así lo están exigiendo, aunque ciertamente por las aplicaciones tan particulares de medición en ocasiones el equipo resulta de un elevado costo, o simplemente no existe en el mercado.

En el caso de las empresas mexicanas que se dedican a la fabricación y reparación de bombas sumergibles y de pozo profundo, el estudio correcto del comportamiento del motor-bomba para determinar sus curvas características, obliga a los fabricantes a documentar los parámetros de voltaje, corriente, caudal, potencia, presión y velocidad de acuerdo al método de prueba mencionado en la NORMA Oficial Mexicana NOM-010-ENER-2004, “eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo”. La determinación del flujo, la carga, la potencia y la frecuencia de rotación (velocidad del motor) son necesarias para la elaboración de la curva de operación del conjunto motor bomba sumergible, misma que debe servir para verificar los parámetros garantizados por el fabricante [1]. Siendo la velocidad del motor uno de los parámetros más complicados de conocer.

Conocer los parámetros eléctricos (voltajes, corrientes y factor de potencia), parámetros

hidráulicos (flujo y presión) y el parámetro mecánico (velocidad o frecuencia de rotación), permite determinar entre muchas otras cosas las condiciones saludables de un motor, estimar su eficiencia, la carga aplicada, etc., sin embargo los instrumentos existentes para estimar estos parámetros actúan por separado, es decir; se pueden visualizar los parámetros eléctricos con un equipo, los hidráulicos con otros dos equipos y de manera estimativa el parámetro mecánico con otro equipo, de tal forma que la toma de las lecturas no simultaneas conllevan mayor tiempo e introducen mayor error en el cálculo que integra todas estas variables “la eficiencia del conjunto motor bomba” [2].

En cuanto al parámetro mecánico, se ha observado que durante el proceso de prueba en ocasiones no se mide la velocidad, ya que el único equipo comercial existente para la toma de la lectura de velocidad tiene una oscilación e incertidumbre fuera del rango que establece la Norma Oficial empleada en México, lo cual aunque representa un riesgo para la acreditación del laboratorio y la calidad misma del producto no se tiene otra alternativa.

Por lo anterior, en el presente documento se propone el diseño, desarrollo e implementación de un equipo de medición de variables electromecánicas mediante instrumentación virtual, para automatizar el proceso de pruebas empleado en un laboratorio de ensayos del conjunto motor bomba sumergible, CMBS. Donde los valores de voltaje y corriente no sólo se obtendrán en un valor numérico, sino que el sistema realiza un muestreo de toda la señal en el tiempo para poder medir entre otras cosas el factor de potencia trifásico, los voltajes entre fases y las corrientes de línea. Además se adquieren simultáneamente las señales de los equipos de presión y flujo. Por otro lado, con la finalidad de mejorar la medición de la velocidad del motor se desarrollo un dispositivo de medición directa de la velocidad con muy baja oscilación e incertidumbre, con la característica de monitorear y registrar simultáneamente con las demás variables el parámetro de velocidad del motor.

El equipo al ser empleado en un laboratorio de pruebas, resulta en una herramienta de monitoreo y control de variables electromecánicas que intervienen en el proceso de prueba del conjunto motor bomba sumergible, con las ventaja de un fácil manejo e interpretación de lecturas, es susceptible de ser calibrado, posee una resolución dentro de lo especificado en la Norma y sobre todo es de bajo costo.

Las ventajas que presenta el automatizar el laboratorio con este equipo, se pueden describir de la manera siguiente:

- Se reduce el tiempo de realización de la prueba, a un tiempo aproximado de 15 minutos.
- Se mide la velocidad del motor directamente desde la flecha del rotor, en forma simultanea con las demás variables para cada punto durante la prueba.
- Se monitorea el factor trifásico, así como el de cada fase en todo momento.
- Se monitorea y despliega información de los parámetros eléctricos, hidráulicos y la velocidad de manera simultánea.
- El equipo es fácilmente validable y se puede mandar calibrar. Sólo cuenta con un gabinete desmontable y una laptop.
- El proceso de adquisición, monitoreo y control de información solo depende de una persona. Cuenta con bases de datos debidamente ordenadas y de fácil acceso.
- Su costo es inferior al de un equipo analizador de potencia pero con las mismas cualidades, pues realiza la adquisición de las señales de voltajes y corrientes en función del tiempo.

A continuación se enlistan las etapas u objetivos particulares planteados para alcanzar y evidenciar el objetivo propuesto en éste trabajo:

1. Diseñar y construir un equipo de instrumentación virtual que despliegue en tiempo real y de forma rápida: 1) las variables eléctricas (voltajes de fase, corrientes de línea y factor de potencia), 2) variables hidráulicas (presión y caudal) y 3) la variable mecánica velocidad.
2. Realizar las pruebas y ensayos de validación del equipo para caracterizarlo y generar la confiabilidad del mismo.
3. Implementar el equipo en un laboratorio de ensayos del CMBS, para automatizar el proceso de pruebas cumpliendo con el protocolo de pruebas que se establece en la NORMA NOM-010-ENER-2004.

4. Realizar un estudio experimental del comportamiento de varios motores sumergibles para determinar las curvas de comportamiento, empleado como herramienta de análisis el equipo de instrumentación virtual y otros equipos comerciales.

1.1 Antecedentes

Al realizar un estudio de empresas internacionales radicadas en México que cuentan con laboratorio de ensayos para la realización de pruebas del conjunto motor bomba sumergible del tipo pozo profundo, se ha encontrado que la toma de lecturas de los parámetros especificados por la Norma se hace de manera independiente, es decir no existe la adquisición simultánea de las variables eléctricas e hidráulicas en cuestión, haciendo de la prueba un proceso largo e incierto. En ocasiones requiere más de una hora realizar una prueba, sin considerar el tiempo que le toma montar la bomba en la piscina y que la mayoría de las lecturas en algunos puntos de la prueba se infieren por experiencia, intuición o por promedios de las anteriores, sin medirse directamente con el equipo como lo indica la Norma.

Actualmente existen en México alrededor de 35 empresas relacionadas con la fabricación y/o la reparación de motores y bombas sumergibles del tipo pozo profundo de las que destacan por la calidad de sus productos, el número de ventas anuales y principalmente tener un laboratorio de ensayos acreditado KSB, NEUMAN, BAMSA, (alemanas), GOULDS (americana), grupo GM e INDUSTRIAS MEDINA (mexicanas). Ciertamente la gran cantidad de empresas dedicadas exclusivamente a la reparación de equipos CMBS no los fabrican principalmente porque carecen de un laboratorio de pruebas, de hecho estas empresas realizan sus reparaciones sin hacer ninguna prueba para verificar que el CMBS funciona correctamente. Dentro del estado de Guanajuato se encuentran siete empresas fabricantes y en el municipio de León dos empresas dedicadas a la fabricación de bombas sumergibles tipo pozo profundo Industrias Medina y Bombas Sumergibles Otorga.

Normalmente las empresas dedicadas a la fabricación de estas rotobombas sumergibles deben garantizar que sus equipos están dentro de los rangos permitidos por la NORMA Oficial Mexicana mencionada, entonces para poder introducir sus productos en el mercado estas empresas requieren

de un laboratorio de pruebas o ensayos, donde se verifica que el producto construido esta dentro de los valores de funcionamiento que especifica la NORMA. Sin embargo la gran mayoría de estos laboratorios son obsoletos ya que operan con equipos rudimentarios no automatizados. La NOM-010-ENER-2004, “eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo” fija los valores mínimos de eficiencia energética que debe cumplir el conjunto motor-bomba sumergible de tipo pozo profundo y establece el método de prueba para verificar en laboratorio la dicha eficiencia.

La acreditación les permite tener presencia de ventas y servicios a los sectores agrícola, minero, sistemas de agua potable e industrial en general. Atender a la Comisión Nacional del Agua CONAGUA, Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM, Comisión Federal de Electricidad CFE, PEMEX y a cerca de mil Sistemas de Agua Potable, grandes y pequeños en todo el País. Siendo la acreditación la capacidad de un laboratorio para evaluar la conformidad de un producto, con la acreditación se determina el cumplimiento de que un producto o servicio fue realizado de acuerdo a una Norma. En los siguientes párrafos se presenta una breve semblanza de empresas de gran impacto en México, y que al estar acreditadas por la entidad Mexicana de Acreditación EMA pueden participar en la Licitación Pública Internacional para la adquisición de bombas y diversos equipos “Comisión Nacional del Agua” CONAGUA, concurso que representa el mayor número de ventas anuales para estos fabricantes.

KSB de México, S.A. de C.V., es una planta formada por más de 100 profesionales, está ubicada en la ciudad de Querétaro. Es una empresa manufacturera y comercializadora perteneciente a la rama metal-mecánica. La planta matriz se encuentra en Frankenthal, Alemania y fue fundada en el año de 1871. En 1954 se crea KSB de México, S.A. de C.V. como filial de KSB Alemania con el fin de atender en forma directa el emergente mercado mexicano, siguiendo las políticas y filosofías de KSB. Su laboratorio de ensayos esta acreditado por la EMA desde el año 2006.

NEUMAN, Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V., de origen contemporáneo al de KSB por ser empresas que surgieron de gente asociada a Industrias Medina. Actualmente se fabrican bombas centrifugas para agua limpia, en flujo radial y semiaxial, las cuales pueden proporcionar gastos desde 2 hasta 120 litros por segundo. De igual manera fabrican motores sumergibles trifásicos, 2 polos en 3500 rpm y 4 polos en 1750 rpm, en voltajes de 220 y 440 voltios y en

capacidades desde 4 hasta 400 HP. El laboratorio de ensayos esta acreditado por la EMA, cuenta con medidor de flujo electromecánico para la medición del gasto, medidor electrónico digital para la carga dinámica y un analizador digital con computadora e impresora para la medición de los valores eléctricos.

BAMSA, Bombas Alemanas, S.A. de C.V., fue fundada en Noviembre de 1969 iniciando en el mercado de compra-venta, reparación e instalación de equipos sumergibles de bombeo en la ciudad de Querétaro, México. Para 1970 se crea la planta industrial dedicada a la fabricación de bombas y motores eléctricos sumergibles para pozo profundo. Se fabrican tanto de bombas para la extracción de agua desde 2 a 120 litros por segundo, como de motores eléctricos sumergibles trifásicos desde 4 hasta 350 caballos de fuerza para el bombeo en pozos profundos (o cárcamos). Cuenta con laboratorio de ensayos acreditado por la EMA desde 1998.

GOULDS, Bombas Goulds de México, S. de R.L. de C.V., Seabury S. Gould fundió la primera bomba metálica hace más de 150 años atrás en Seneca Nueva York. En la actualidad, Goulds Pumps es una parte integral ITT industries, el fabricante de bombas más grande del mundo. Su cede en México se encuentra ubicada en el estado de Hidalgo. Cuenta con un laboratorio de pruebas hidráulicas acreditado por EMA.

Grupo Industrial GM S.A. de C.V., nace hace más de 25 años. Fabrican bombas centrífugas que van desde 100 a 1200 gpm con carga total dinámica desde 50 a 714 pies. La calidad y competencia técnica que ofrece el laboratorio esta respaldada por la acreditación emitida por la EMA y aprobación por parte de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía CONAE.

INDUSTRIAS MEDINA, S. A. DE C. V., fue fundada por el Sr. Tiburcio Medina Campos el 1o. de enero de 1962, bajo el nombre de TALLERES MEDINA, S.A. habiéndose constituido legalmente el 1o. de noviembre de ese mismo año, siendo su actividad la fabricación, reparación y venta de bombas sumergibles y de maquinaria en general. A partir del año 1962 y hasta 1970 se decidió efectuar un cambio de denominación social quedando el que actualmente ostenta de INDUSTRIAS MEDINA, S.A. de C. V., y así con tecnología propia se dedicó a la fabricación de bombas sumergibles, reparación de todo tipo de equipos de bombeo e inició la fabricación de motores sumergibles. En ese mismo año se establece un convenio de trabajo en sociedad con la fábrica de bombas sumergibles PLEUGER UNTERWASSERPUMPEN, G.M.B.H., de Hamburgo,

Alemania, líder mundial en ese ramo, participando adicionalmente con su tecnología. La planta cuenta con la infraestructura suficiente para fabricar bombas y motores sumergibles de la mejor calidad, con capacidades que van desde 1 hasta 170 litros por segundo, y motores desde 5 hasta 400 H.P., de 220 ó 440 voltios. Todas las bombas nuevas y reparadas, se prueban en el laboratorio de pruebas, el cual está acreditado por la EMA, autorizado por CONAE y reconocido por la Asociación de Normalización y Certificación Eléctrico ANCE.

Aunque existen otras empresas en México de menores ventas y poco conocidas que las descritas arriba, se pueden mencionar a Bombas Suárez, Indar América, S.A. de C.V., Grundfos de México y Bombas Rodase como empresas con laboratorio de ensayos acreditado, y talleres Romo, Bombas Sumergibles Otorga y Groundfus como empresas con laboratorio No acreditado situadas en la ciudad de León Guanajuato.

En la actualidad las empresas que cuentan con un laboratorio de ensayos en general, realizan en su método de prueba las mediciones de los parámetros eléctricos: voltajes trifásicos, corrientes trifásicas y el factor potencia, con un equipo llamado analizador de potencia ó en su defecto con un multímetro haciendo de lado la medición del factor de potencia, además la toma de lecturas de voltaje y corriente de cada línea se hace de forma independiente.

En cuanto a las mediciones de los parámetros hidráulicos flujo de agua y presión se realizan con otros dos equipos el caudalímetro y el medidor de presión (generalmente son de un elevado costo), en tanto que el parámetro mecánico de la velocidad de giro del eje del motor, la inferen con un instrumento llamado tacómetro de lengüetas vibratorias, que es un equipo de medición indirecta de la velocidad cuyo principio de funcionamiento se basa en la detección de vibraciones mecánicas que transmite la tubería hacia el medidor al estar en contacto con el motor, es importante mencionar que el medidor posee un alto grado de incertidumbre.

De los equipos de lengüetas vibratorias existentes, el más usado por los laboratorio de ensayos en la medición de la velocidad es el equipo M02 de rango 2000-4000rpm y el M03 de rango 2500-4500rpm, ya que la velocidad estimada para un motor de 2 polos oscila entre 3400 y 3500rpm. En la figura 5.13 se ilustra uno de estos equipos comercialmente usados en campo para la medición de la velocidad desde la tubería, el cual se utiliza con relativa frecuencia durante una prueba del CMBS. El modo de empleo es simple, se toma con ambas manos y se presiona contra la



Figura 1.1: Tacómetro de lengüetas vibratorias usado en los laboratorios de ensayos. tubería que conecta al motor, es común que se coloque en un punto cercano al motor pues ahí las vibraciones son mayores y la oscilación de la lengüeta se mejora indicando con mayor claridad la velocidad.

1.2 Panorama de la tesis

En el capítulo dos se presenta una recopilación relacionada con la eficiencia energética y método de prueba del conjunto motor bomba sumergible. Se muestran las principales características que intervienen para realizar una prueba así como los límites de la prueba, tales como los parámetros hidráulicos de presión y caudal, los parámetros eléctricos de voltajes, corrientes y factor de potencia, y el parámetro mecánico de velocidad de rotación o giro del motor.

En el capítulo tres se presenta una introducción a los métodos de medición de la velocidad. Se hace referencia a una clasificación propuesta de las técnicas de medición de la velocidad partiendo de métodos directos e indirectos observados en aplicaciones industriales y los mencionados en la literatura. Se presenta una breve descripción de dichas técnicas, resaltando el método de medición directo sin contacto provisto por un sensor inductivo, el cual fue implementado para la medición de la velocidad del motor del CMBS.

El concepto de instrumentación virtual es descrito en el capítulo cuatro, el cual presenta un enfoque de la instrumentación aplicada como un instrumento para medir señales, registrar datos y decidir las acciones de control, y evidentemente se habla de sus ventajas frente a otros sistemas

empleados para automatización.

En el capítulo cinco se presenta el diseño, desarrollo y la implementación del equipo de instrumentación virtual construido. En la etapa de diseño se hace especial énfasis al proceso de monitoreo de las principales variables electromecánicas que intervienen directamente en un laboratorio de ensayos del conjunto motor bomba sumergible. La etapa de desarrollo presenta los elementos y diagramas que conforman al hardware del equipo de instrumentación, también se describen fragmentos del código implementando en la plataforma LabVIEW.

En el capítulo seis se presentan los resultados obtenidos al probar un motor sumergible, se ilustran las curvas principales de comportamiento eléctrico del motor obtenidas con el equipo desarrollado y se comparan con un instrumento calibrado de referencia. En esa misma sección se muestra la implementación del equipo en un laboratorio de pruebas del conjunto motor bomba sumergible.

Finalmente en el capítulo siete se dan las conclusiones finales, así como las aportaciones y futuras líneas de aplicación del equipo medidor de variables electromecánicas mediante instrumentación virtual.

2 Eficiencia energética y Método de prueba

2.1 Conceptos generales

En este apartado se describen los conceptos principales referentes a la eficiencia de un equipo de bombeo, la clasificación de las bombas, las partes que integran una bomba, los requerimientos de selección de un equipo de bombeo, así como los límites y método de prueba del CMBS establecidos en la NOM-010-ENER-2004 los cuales serán ampliamente utilizados en capítulos posteriores.

Bomba. Máquina hidráulica que convierte la energía mecánica en energía de presión, transferida al agua.

Bomba sumergible. Máquina hidráulica que convierte la energía mecánica en energía de presión transferida al agua, para trabajar acoplada directamente a un motor eléctrico sumergible.

Carga. Es el contenido de energía mecánica que requiere la bomba sumergible para mover el agua desde el nivel dinámico hasta su punto final de descarga.

Carga a la descarga (h_d). Está dada por la suma algebraica de la presión manométrica medida a la descarga (convertida en metros de columna de agua y corregida con la altura a la línea de centros de la toma de señal de presión), la carga de velocidad y las pérdidas por fricción, en m, expresada por

$$h_d = P_{gd} + h_{fc} + h_v,$$

donde

- h_d Carga a la descarga, en m;
- P_{gd} Presión en la descarga, en metros de columna de agua;
- h_{fc} Pérdidas por fricción en la columna, en metros de columna de agua;
- h_v Carga de velocidad, en m.

Carga de velocidad (h_v). Es la energía cinética por unidad de peso del líquido en movimiento, expresada por

$$h_v = \frac{v^2}{2g},$$

donde

- v Velocidad del agua dentro de la tubería, en m/s,
- g Aceleración de la gravedad ($g = 9.80665m/s^2$, a nivel del mar).

Carga de total de bombeo (H). Está dada por la suma algebraica de la presión manométrica medida a la descarga (convertida en metros de columna de agua y corregida con la altura a la línea de centros de la toma de señal de presión), el nivel dinámico, las pérdidas por fricción en la columna y la carga de velocidad. Su expresión matemática es

$$H = P_{gd} + Z_d + h_{fc} + h_v,$$

donde

- H Carga total de bombeo, en m;
- P_{gd} o P_m Presión en la descarga, en metros de columna de agua, se mide directamente en el manómetro colocado inmediatamente después del cabezal de descarga. Normalmente la medición se realiza en kg/cm², referirse al apéndice para consultar los factores de conversión,
- Z_d o ND Nivel dinámico o de carga, en m,
- h_{fc} Pérdidas por fricción en la columna en metros de columna de agua. Se determina por medio de tablas proporcionadas por el fabricante o manuales de hidráulica. Las pérdidas en el codo de descarga y otros accesorios no se consideran por ser poco significativas,
- h_v Carga de velocidad, en m.

Condiciones estables. Es cuando las señales indicadas por los instrumentos de medición cumplen con las oscilaciones y variaciones permitidas, de acuerdo con la tabla 2.1:

Cuadro 2.1: Oscilaciones permisibles en el indicador de los instrumentos de medición.

Variable medida	Máxima oscilación permisible **
Flujo, Carga, Potencia	$\pm 3\%$
Frecuencia de rotación	$\pm 1\%$

Nota: Cuando se use un dispositivo de presión diferencial para medir flujo, la máxima oscilación permisible debe ser $\pm 6\%$.

** Cuando se utilicen instrumentos de medición analógicos o mecánicos el valor nominal a medir debe de quedar dentro del tercio medio de la escala de medición.

Corriente eléctrica (I). Es la intensidad de corriente que pasa a través de un conductor con resistencia R (ohm) y cuya diferencia de potencial entre sus extremos es V (volt), su unidad es el ampere.

Tensión eléctrica (V). Diferencia de potencial medida entre dos puntos de un circuito, expresada en Volt.

Factor de Potencia (fp). Es la relación de la potencia activa y la potencia aparente.

2.2 Eficiencia del conjunto motor bomba sumergible

La eficiencia del CMBS es la relación de la potencia de salida (P_s) de la bomba sumergible entre la potencia de entrada (P_e) al motor, se expresa en por ciento.

La potencia de salida es la potencia en Watt, transferida al agua por la bomba, medida lo más cerca posible del cabezal de descarga. Su expresión es

$$P_s = q_s \rho g H, \quad (2.1)$$

donde:

P_s Potencia de salida, en *Watt*;

q_v Flujo, en m^3/s ;

ρ Densidad del agua bombeada, en kg/m^3 ;

g Aceleración de la gravedad, en m/s^2 ;

H Carga total de bombeo, en m;

Mientras que la potencia de entrada es la potencia en *Watt*, que requiere el motor eléctrico trifásico acoplado a la bomba sumergible, es

$$P_e = \sqrt{3}VI f_p, \quad (2.2)$$

donde:

P_e Potencia de entrada, en *Watt*;

V Tensión eléctrica, en volt;

I Corriente eléctrica, en ampere;

f_p Factor de potencia, adimensional.

Finalmente la eficiencia (n_t) queda expresada como

$$n_t = \frac{q_v \rho g H}{\sqrt{3}VI f_p} 100. \quad (2.3)$$

Para la determinación de la eficiencia óptima del conjunto motor-bomba sumergible se requiere como prueba única la que se aplica según el método incluido en éste apartado.

Todo conjunto motor-bomba sumergible, de este tipo, comercializado a partir de la fecha de entrada en vigor de la Norma NOM-010-ENER-2004 una vez que se publique en el **Diario Oficial de la Federación** como Norma Oficial Mexicana definitiva, debe cumplir con los valores de eficiencia que se obtengan como producto de la multiplicación de la eficiencia de la bomba sumergible por la eficiencia del motor que tenga acoplado.

Para efectos de aplicación de la Norma, las bombas sumergibles, se agrupan de acuerdo a la capacidad expresada en l/s (litros/segundo), quedando los grupos definidos como se muestra en la tabla 2.2; los motores eléctricos trifásicos que deben acoplarse se agrupan de acuerdo a la potencia nominal expresada en kilowatts (kW), como se indica en la tabla 2.3.

Cuadro 2.2: Valores de referencia para el cálculo de la eficiencia mínima de la bomba sumergible.

Capacidad de la bombas sumergible (l/s)	Eficiencia (%)
Mayor que 0.3 hasta 0.5	40
Mayor que 0.5 hasta 2.0	49
Mayor que 2.0 hasta 5.0	62
Mayor que 5.0 hasta 10.0	69
Mayor que 10.0 hasta 15.0	71
Mayor que 15.0 hasta 25.0	73
Mayor que 25.0 hasta 30.0	74
Mayor que 35.0 hasta 60.0	77
Mayor que 60.0	78

Cuadro 2.3: Valores de referencia para el cálculo de la eficiencia mínima del motor sumergible.

Motor (kW)	Motor (HP)	Eficiencia (%)
Hasta 1.492	Hasta 2.0	68
Mayor 1.492 hasta 3.73	Mayor 2.0 hasta 5.0	72
Mayor 3.73 hasta 5.595	Mayor 5.0 hasta 7.5	75
Mayor 5.595 hasta 7.46	Mayor 7.5 hasta 10.0	77
Mayor 7.46 hasta 11.19	Mayor 10.0 hasta 15.0	79
Mayor 11.19 hasta 14.92	Mayor 15.0 hasta 20.0	80
Mayor 14.92 hasta 22.38	Mayor 20.0 hasta 30.0	81
Mayor 22.38 hasta 29.84	Mayor 30.0 hasta 40.0	83
Mayor 29.84 hasta 44.76	Mayor 40.0 hasta 60.0	86
Mayor que 44.76	Mayores que 60.0	87

Partes principales del CMBS

Siempre que se traten temas como procesos químicos y de cualquier circulación de fluidos, se esta entrando de alguna manera al tema de bombas .

El funcionamiento en sí de la bomba será el de un convertidor de energía, o sea transformará la energía mecánica en energía cinética, generando presión y velocidad en el fluido.

Existen muchos tipos de bombas para diferentes aplicaciones, sin embargo los factores más importantes que permiten escoger un sistema de bombeo adecuado son: presión a la carga, presión a la descarga, velocidad de bombeo, tipo de gases a bombear (la eficiencia de cada bomba varía según el tipo de gas) [3].

Hablando específicamente de las bombas sumergibles (véase figura 2.1), éste tipo de bombas es ideal para obtener presiones elevadas. Se usan principalmente en sistemas de riego, equipos de limpieza a presión, y en cualquier sistema requerido de alta presión. Además de su gran eficiencia, la bomba de alta presión tiene un diseño práctico [4].

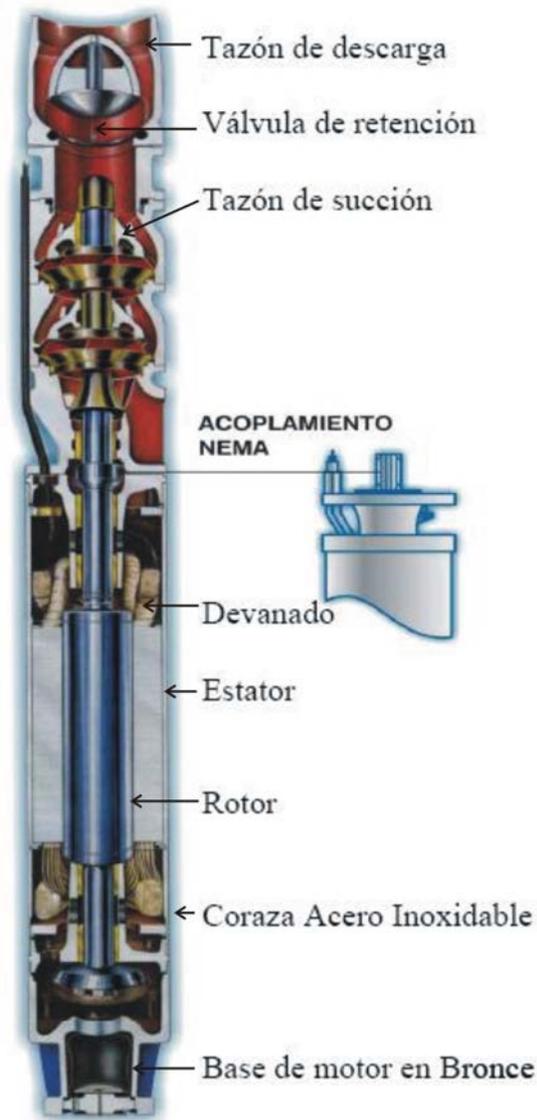


Figura 2.1: Partes principales que conforman al CMBS.

Motor. El motor sumergible resistente al agua, es un motor de inducción de corriente alterna trifásica, concebido en la esbelta ejecución como motor mojado.

El motor se llena de agua limpia antes de ser introducido al grupo electrobomba o lugar de abastecimientos, la cual sirve para el lubricado de los cojinetes y refrigeración del embobinado.

El aislamiento del embobinado, hidrófugo y resistente al envejecimiento, es de material completamente insensible contra aguas agresivas e influencias químicas, acusando una extraordinaria resistencia dieléctrica y térmica.

Mediante un dispositivo de compensación situado en la base del motor (caja del cojinete axial), se consigue aún con gran calentamiento del agua de llenado, una normal volumen de dilatación para el motor, evitándose así que en éste pueda penetrar agua del pozo. Además, el motor está protegido contra la penetración de arena por un colector con anillo laberinto y retenes dobles.

Bomba. La bomba se construye en la ejecución de etapas múltiples, pudiéndose realizar por lo tanto sin dificultades el desmontaje y el montaje. Su esbelta construcción posibilita una fácil instalación en pozos de diámetros muy estrechos.

Impulsor y difusor. Los impulsores y difusores se fabrican de materiales de alta calidad y de gran resistencia al desgaste. Gracias a su cojinete axial, que puede soportar gran carga, no son necesarias complicadas medidas hidráulicas de descarga.

Acoplamiento. La bomba y el motor forman cada uno para sí una unidad compacta. Los ejes de éstas dos unidades tienen cada uno sus propios descansos, uniéndose entre sí mediante un acoplamiento. El montaje de las dos unidades puede ser hecho por personal no especializado.

Información necesaria para elegir el equipo CMBS

A continuación se presenta un listado de las variables más importante al momento de seleccionar una electrobomba ó CMBS, tomando como referencia el esquema de la figura 2.2.

Variable	Descripción
H	Profundidad del pozo
A	Diámetro interior del pozo
B	Nivel estático (espejo de agua)
C	Nivel dinámico (nivel cuando trabaja la bomba)
D	Profundidad de instalación del CMBS
Eb	CMBS
S	Cable eléctrico trifásico para conectar aparatos de arranque
W	Aparatos eléctricos de arranque
L	Distancia horizontal del borde del pozo al tanque elevado descarga
Ha	Altura adicional al nivel dinámico
P	Tubería de presión

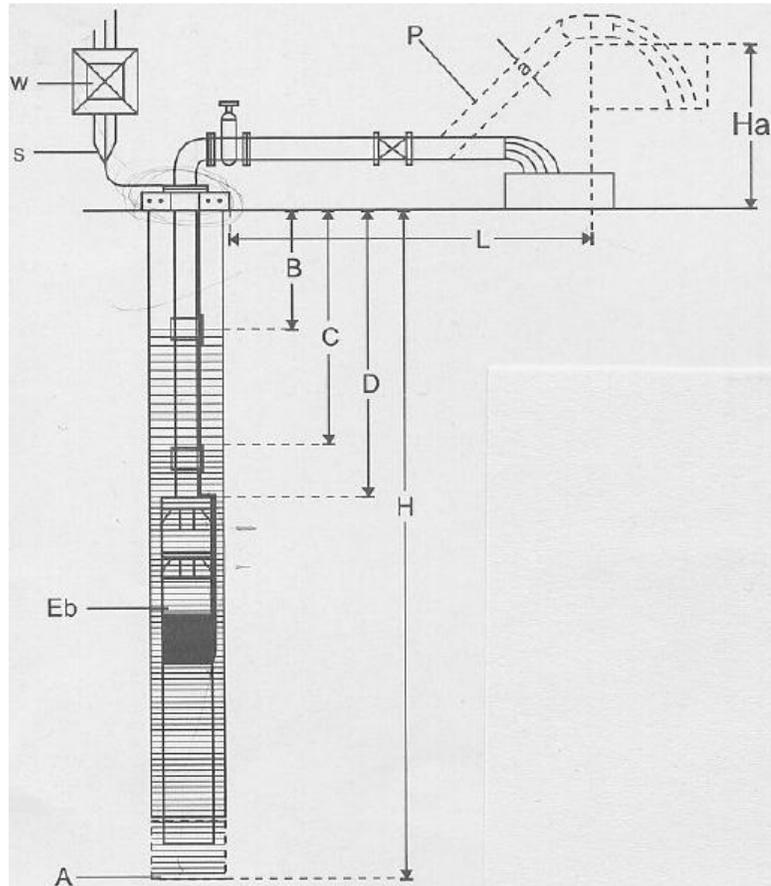


Figura 2.2: Diagrama de selección del CMBS.

2.3 Método de prueba del CMBS

La finalidad de esta sección es mencionar los límites y el método de prueba que se deben seguir de acuerdo a la Norma para garantizar el correcto funcionamiento del equipo.

Requerimientos del método de la prueba

Aplicación del método de prueba. Aplica para pruebas de bombas sumergibles de pozo profundo de flujo radial y semiaxial, accionadas por motor sumergible de cualquier capacidad especificado en las tablas 2.2 y 2.3.

Lugar de la prueba. Las pruebas al producto, deben de realizarse en un laboratorio de prueba debidamente acreditado por las entidades de acreditación y aprobado por la dependencia competente.

Fluido para la prueba. Para efectuar esta prueba se debe utilizar agua limpia a la temperatura ambiente.

Personal. El personal responsable de las pruebas debe estar acreditado ante las entidades de acreditación autorizadas para tales efectos.

Puntos a probar. Los parámetros garantizados por el fabricante serán la parte esencial de la prueba, así como la determinación de los límites de operación del equipo.

Informe de la prueba. La evaluación de los resultados de la prueba se debe hacer inmediatamente, incluyendo gráficas de la curva de operación, antes de que la instalación sea desensamblada con la finalidad de poder repetir alguna medición.

Condiciones de la prueba

Puntos a verificar antes y durante la prueba. Que las condiciones de operación sean estables de acuerdo con las oscilaciones y variaciones de las lecturas permitidas en la tabla 2.4.

Parámetros garantizados. Los parámetros garantizados por el fabricante para este método de prueba son: la eficiencia del conjunto motor-bomba sumergible para la carga y el flujo especificados en el punto de operación de la bomba sumergible, que debe ser igual o mayor que el valor del producto que se obtenga de multiplicar los valores correspondientes a la capacidad de la bomba sumergible en la tabla 2.2 y la potencia del motor sumergible en la tabla 2.3.

Nota: En ocasiones el punto de operación, seleccionado por el cliente, está a la izquierda o derecha del punto de mayor eficiencia de diseño, especificado por el fabricante del conjunto motor-bomba sumergible (punto óptimo de operación de la bomba sumergible).

Ejecución de la prueba. Para verificar el punto óptimo, se deben registrar al menos tres puntos de medición, cercanos y agrupados uniformemente alrededor de dicho punto, y para determinar el funcionamiento sobre el intervalo de operación indicado, la bomba sumergible debe ser operada desde capacidad cero hasta la máxima capacidad mostrada en la curva de operación suministrada por el fabricante, tomando como mínimo seis puntos de medición, considerando tres puntos arriba y tres abajo del punto garantizado habiendo considerado el grado de exactitud para ser llevada a cabo.

Número de lecturas a tomar durante la prueba. Se deben registrar un mínimo de tres lecturas de cada medición, previamente es necesario verificar que se cumpla con los límites de oscilación y las variaciones permitidas en las lecturas.

Corrección de la frecuencia de rotación. Por definición el número de revoluciones por unidad de tiempo a las que gira la flecha del conjunto motor-bomba sumergible, expresada en min-1 o r/min (revoluciones por minuto). Si se presenta durante la prueba diferente frecuencia de rotación a la nominal especificada (generalmente así sucede) se requiere ajustar la eficiencia,

Cuadro 2.4: Límites de variación entre mediciones repetidas.

Lecturas	Máxima oscilación permisible entre lectura mayor y menor de cada variable (%)	
	Flujo, Carga, Potencia	Frecuencia de rotación
3	0.8	1/4
5	1.6	0.5
7	2.2	0.7
9	2.8	0.9

para ello se tienen que hacer algunas correcciones de flujo, carga y potencia obtenidas durante la prueba, de acuerdo a las ecuaciones siguientes que expresan las leyes de afinidad:

$$q_0 = q_1 \frac{n_0}{n_1}$$

$$H_0 = H_1 \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2$$

$$P_0 = P_1 \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^3$$

donde:

Parámetros nominales	Parámetros leídos durante la prueba
q_0 Capacidad ó flujo;	q_1 Capacidad ó flujo;
H_0 Carga total ó altura;	H_1 Carga total ó altura;
P_0 Potencia demandada por la bomba sumergible;	P_1 Potencia demandada por la bomba sumergible;
n_0 Frecuencia de rotación.	n_1 Frecuencia de rotación.

3 Medición de la velocidad

El estudio del comportamiento de un motor eléctrico y en particular del parámetro de la velocidad del motor de una bomba sumergible ha llamado la atención a investigadores y en especial a industriales [6]. Tener conocimiento de la velocidad del motor con cierta precisión se vuelve cada vez más esencial en aplicaciones donde la eficiencia de dicho motor y su buen funcionamiento están involucrados. Existen diferentes formas de medir el número de revoluciones por minuto (rpm) de un motor en todo sector industrial, que emplean por lo general métodos ópticos o mecánicos. En este capítulo se detallan las técnicas empleadas en la medición de la velocidad angular (rotación) de un motor. Dichas técnicas se pueden clasificar como se observa en el cuadro sinóptico de la figura 3.1.

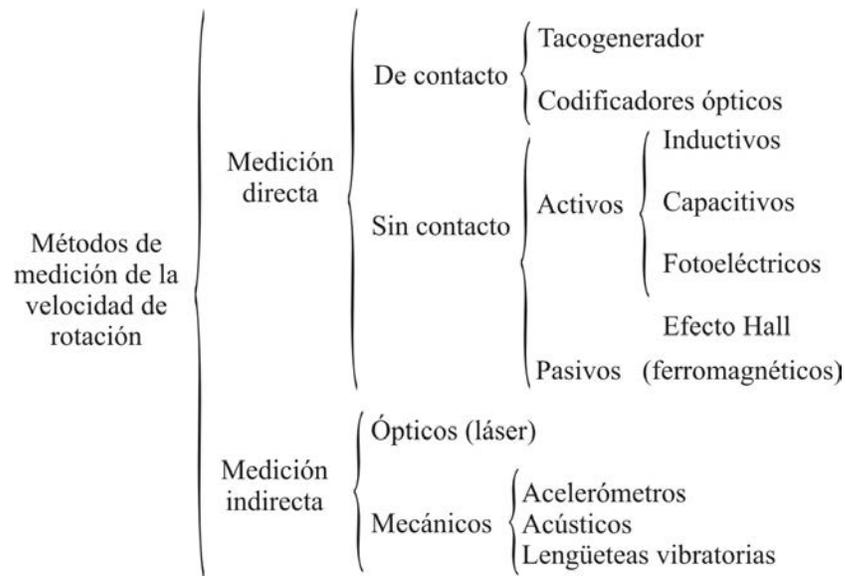


Figura 3.1: Esquema general de clasificación de las técnicas para medir la velocidad.

3.1 Métodos de Medición Directa de la velocidad

Los métodos de medición directa hacen referencia a lo cercano del sensor al eje o flecha del motor, dichos sensores pueden estar en contacto directo con la flecha o muy cercana a ésta (distancias de milímetros o centímetros). Es importante esclarecer la diferencia entre sensor y transductor.

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una Tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como en un fototransistor), etc.

Un sensor se diferencia de un transductor en que el sensor está siempre en contacto con la variable de instrumentación con lo que puede decirse también que es un dispositivo que aprovecha una de sus propiedades con el fin de adaptar la señal que mide para que la pueda interpretar otro dispositivo

3.2.1 Métodos de Medición Directa de contacto

Cuando se piensa en medir la velocidad, y se tiene acceso a la flecha del motor por la parte posterior o paralelamente, existen dos maneras de estimar la velocidad, el tacogenerador y el codificador óptico.

a) Tacogenerador

El tacogenerador es un dispositivo para medir la velocidad angular (ver figura 3.2). Su funcionamiento es sencillo: convertir la energía rotacional del eje en cuestión, en energía eléctrica proporcional a la rotacional y que puede ser fácilmente medida. Son de fácil acoplamiento mecánico, ya sea coaxial, polea, engrane, o cadena.

Para generar la corriente a partir del giro, se acopla el tacogenerador al motor o eje que se



Figura 3.2: Tacogenerador comercial.

va a medir. Se tiene una espira situada dentro de un campo magnético fijo (creado por los dos imanes), al girar el motor, la espira girará en el interior del campo magnético, lo que provocará una corriente eléctrica. Una posible configuración podría ser la que se ve en la figura 3.3.

Este tipo de sensores están basados en la ley de inducción de Faraday. Según la cual, si una bobina con N espiras está inmersa en un campo magnético y atraviesa un flujo ϕ , se induce en ella una tensión e dada por

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}. \quad (3.1)$$

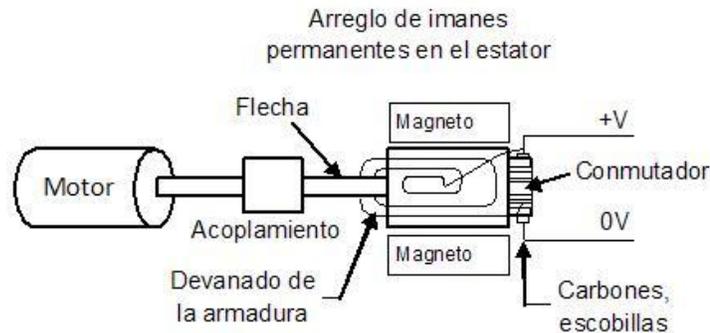


Figura 3.3: Esquema de configuración del tacogenerador.

Los denominados tacogeneradores o tacómetros de alterna son similares, en su funcionamiento, a un generador de energía eléctrica. Si se tiene un circuito de N espiras, que gira a una velocidad angular ω , inmerso en un campo magnético fijo de densidad de flujo B atravesando un área transversal S , la tensión inducida viene dada por

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = \frac{dBS \cos \theta}{dt} = NBS \sin \theta \frac{d\theta}{dt}.$$

Si $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, entonces se tendrá que $e = NBS\omega \sin \int \omega dt$, si $\omega = cte \rightarrow e = NBS\omega \sin(\omega t)$.

Se induce, por tanto, una tensión alterna de amplitud y frecuencia proporcionales a la velocidad de giro. El sensor sería mucho más práctico si sólo variara la amplitud con la velocidad de giro. Para conseguir esto, se emplea una disposición como la que se muestra en la figura 3.4. Hay dos devanados, uno de excitación y otro de detección, dispuestos con un desfase espacial de 90° . El rotor, cuya velocidad de giro se pretende medir, está formado por una serie de espiras cortocircuitadas dispuestas alrededor de un tambor. Es lo que se denomina rotor en jaula de ardilla [5]. Si el devanado de excitación se alimenta con una tensión alterna de amplitud constante y frecuencia ω_a , al girar el rotor a una velocidad ω , en el devanado de detección, se obtiene una tensión de salida de acuerdo con

$$e = kw\omega_a \sin(\omega t + \theta). \quad (3.2)$$

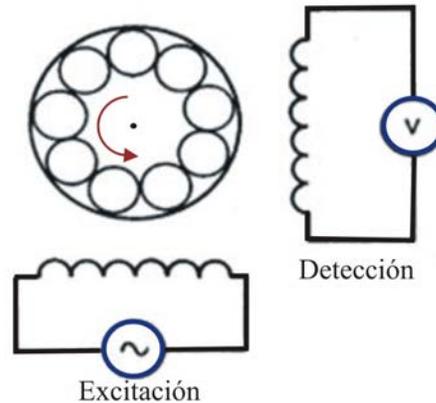


Figura 3.4: Disposición de la excitación y detección.

Se trata de una tensión de frecuencia igual a la de excitación y amplitud proporcional a la velocidad de giro. Se ha supuesto que la impedancia de entrada del instrumento de medida es alta, pues de lo contrario la corriente que circula por el devanado de salida produciría un campo magnético que se sumaría con el de excitación introduciendo un error. Como la información de interés está en la amplitud, si la velocidad de giro varía no deberá hacerlo con una frecuencia comparable a la de excitación, que actúa de portadora. Para poder demodular la envolvente sin tener que recurrir a filtros complejos, conviene que la frecuencia de la tensión de excitación sea al menos diez veces mayor que la de la velocidad a medir.

Los cambios de temperatura pueden introducir errores, pues varía la resistencia de los devanados y con ella la intensidad de excitación. Hay modelos que incluyen un termistor linealizado en serie con el devanado de excitación de tal forma que el coeficiente de temperatura del conjunto es casi nulo en el margen de temperatura que va a actuar el tacómetro. Otra solución sería excitar el primario en corriente, pero esto es más costoso. Existen tacómetros en los que la excitación se consigue con un imán permanente, y la salida se rectifica mecánica o electrónicamente. Son los denominados tacómetros de continua. La ventaja que introducen es que no necesitan excitación externa. Además la polaridad de la tensión de salida depende del sentido de giro.

Estos dispositivos pueden llegar a tener una precisión del 0.5% , por lo que puede resultar una solución aceptable a la hora de medir la velocidad angular.

Un tacogenerador mecánico comercial está formado por un generador mecánico de absoluta linealidad y un amplificador electrónico también lineal que proporciona un voltaje estable para cualquier uso de control. Su rango de operación es de hasta 7000 RPM con voltajes de salida de 5, 10, 15, 20, 30 ó 36 volts, y su linealidad es perfecta. Es importante mencionar que la precisión de estos dispositivos ésta en función del sensor que mide las señales eléctricas proporcionadas por el tacogenerador y que relaciona a voltios/rpm, además del tipo de acoplamiento involucrado.

b) Codificador Óptico

Los encoders rotativos o quadrature encoders son unos dispositivos que se utilizan como sensores de posición, ya que permiten medir con exactitud tanto la dirección como la magnitud de un desplazamiento de su eje.

Existen diferentes tipos de codificadores ópticos pero en general su funcionamiento es muy similar. Los codificadores ópticos o encoders se utilizan fundamentalmente para el cálculo de la posición angular o velocidad. Básicamente constan de un disco transparente, el cual tiene una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí; de un elemento emisor de luz (como un diodo LED); y de un elemento fotosensible que actúa como receptor. El eje cuya posición angular se va a medir va acoplado al disco.

El funcionamiento es el siguiente; cuando el sistema comienza a funcionar el emisor de luz

empieza a emitir; a medida que el eje vaya girando, se producirán una serie de pulsos de luz en el receptor, correspondientes a la luz que atraviesa los huecos entre las marcas. Llevando una cuenta de esos pulsos es posible conocer la posición del eje. Sobre este esquema básico es habitual encontrar algunas mejoras. Por ejemplo como se observa en la figura 3.5, se suele introducir otra franja de marcas por debajo, desplazada de la anterior, para poder controlar el sentido del giro; además suele ser necesario el empleo de una marca de referencia que nos ayudará a saber si hemos completado una vuelta.

Realmente los encoders miden la velocidad de giro con un contador de pulsos en el tiempo, pero se puede extrapolar la posición angular. En su interior estos encoders llevan un disco con marcas y dos sensores ópticos. Como es lógico, la resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que podamos poner físicamente en el disco.

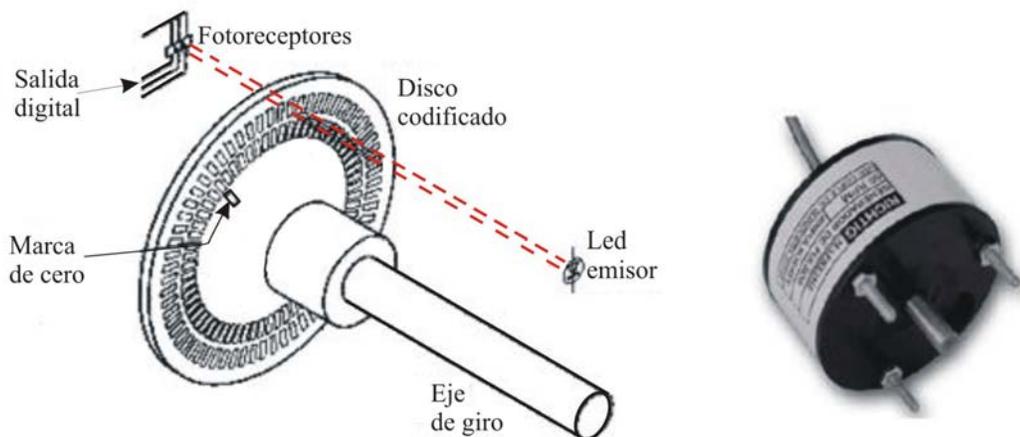


Figura 3.5: Representación interna del funcionamiento de un encoders e imagen de encoder comercial.

Existen dos tipos de Encoders:

a) *Encoders Incrementales.* Los “encoders” incrementales suministran un número específico de impulsos por cada revolución completa del eje. Esta cuenta de impulsos está determinada por el número de divisiones o segmentos del disco de codificación. Por ejemplo el disco de codificación consta de 360 segmentos, por lo tanto por revolución del eje se obtendrán 360 impulsos. Es decir, un impulso por grado angular.

Hay disponibles tres versiones del generador de impulsos rotativo: canal simple, doble y triple.

El tipo de canal simple (Señal A) es empleado donde el sentido del movimiento no cambia, ni se tienen vibraciones. En el caso contrario, son mejores los de doble canal (Señales A y B), también llamados de señales en cuadratura porque una señal está defasada en 90 grados de la otra, lo cual sirve para detectar el sentido del giro. El tercer canal (Señal Z) es una señal de posición que aparece una vez por revolución, y es empleado para regresar a ceros contadores en sistemas controlados digitalmente (CNC, PLCs, etc.).

Los problemas más frecuentes con los codificadores son causados por un pobre blindaje del conductor o, por la distancia tan larga y la frecuencia tan alta con la que trabaja el aparato.

b) Encoders Absolutos. A diferencia de los “encoders” incrementales, los del tipo absoluto proporcionan una combinación única de señales para cada posición física. Esto resulta una ventaja importante, ya que no es necesario un contador para la determinación de la posición.

La combinación de señales se establece mediante un patrón de código de sectores transparentes y opacos en varias pistas de un disco rotativo. El número de pistas de código disponibles determina la resolución máxima del codificador en la totalidad de los 360 grados. En el caso de las pistas codificadas en binario, la resolución máxima es de 2^n siendo “n” el número de pistas. Por consiguiente, para 10 pistas, la resolución es de $2^{10} = 1024$.

Una característica importante de la lectura de modo paralelo es que la posición real se registra inmediatamente cuando se conecta inicialmente la alimentación eléctrica, o después de un cambio de posición sin potencia aplicada o si se excede del número de revoluciones por minuto permitidas electrónicamente (desventajas del tipo incremental).

Aunque se ha mencionado únicamente el funcionamiento de los “encoders” rotativos, los lineales trabajan de la misma manera.

Las aplicaciones de los encoders son muy variadas ya que se puede utilizar con un contador de pulsos para medir longitudes de un material con precisión, medir velocidades acoplándose a tacómetros analógicos o digitales, medir velocidades de 20 rpms (una vuelta cada 3 segundos) o para controlar rpms con precisión en motores de velocidad variable.

La salida de pulsos se fabrica entre 1 y 200 por revolución según el requerimiento del usuario,

y arriba de 200 pulsos como solicitud especial (hasta 300 pulsos). Su eje está suspendido en baleros de baja fricción y su torque es muy pequeño.

3.2.2 Métodos de Medición Directa sin contacto

En las formas de medición directa sin contacto destacan una infinidad de sensores, sin embargo para fines prácticos podemos clasificarlos en los que requieren alimentación conocidos como activos ó electrónicos y los que no requieren ser alimentados llamados pasivos o ferromagnéticos.

Métodos de Medición Directa sin contacto por sensores activos

a) Sensores Inductivos. Este tipo de sensores se basan en el cambio de inductancia que provoca un objeto metálico en un campo magnético. Los sensores de este tipo constan básicamente de una bobina y de un imán. Cuando un objeto ferromagnético penetra o abandona el campo del imán el cambio que se produce en dicho campo induce una corriente en la bobina; el funcionamiento es sencillo: si se detecta una corriente en la bobina, algún objeto ferromagnético a entrado en el campo del imán. Como podemos deducir rápidamente, el gran inconveniente de este tipo de sensores es la limitación a objetos ferromagnéticos, aunque en aplicaciones industriales son bastante habituales.

Básicamente podemos hablar de tres tipos de sensores inductivos: los basados en la variación de reluctancia, los transformadores diferenciales y los transformadores variables.

Sensores inductivos basados en la variación de reluctancia: La inductancia de un circuito es el cociente entre el flujo magnético que concatena y la corriente que lo provoca. Si se trata de una corriente circulando por el propio circuito, se habla de autoinductancia, L . En caso contrario se habla de inductancia mutua.

Para el caso de un circuito con N espiras, que concatena un flujo ϕ y por el que circula una corriente i , la inductancia L se puede expresar como

$$L = N \frac{d\phi}{dt}. \quad (3.3)$$

Se denomina fuerza magnetomotriz (M) al producto del número de espiras por la corriente,

$$M = Ni. \quad (3.4)$$

Se denomina reluctancia magnética (R) al cociente entre la fuerza magnetomotriz y el flujo,

$$R = \frac{M}{\phi}. \quad (3.5)$$

Finalmente se obtiene $L = \frac{N^2}{R}$.

Para una bobina de sección transversal A y longitud l , en la que el material del núcleo tiene una permeabilidad magnética μ , la reluctancia magnética viene dada por

$$R = \frac{l}{\mu A}. \quad (3.6)$$

Si el circuito magnético incluye tramos en el aire y tramos en un material ferromagnético dispuestos en serie, la expresión general de la reluctancia queda como

$$R = \sum \frac{l_0}{\mu_0 A_0} + \sum \frac{l}{\mu A}.$$

Se puede establecer una analogía entre un circuito magnético y un circuito eléctrico:

Circuito eléctrico	Circuito magnético
Fuerza electromotriz (E)	Fuerza magnetomotriz (M)
Corriente eléctrica (I)	Flujo magnético (ϕ)
Resistencia eléctrica (R)	Reluctancia Magnética (R)

En el circuito magnético de la figura 3.6 la reluctancia total sería: $R = \frac{R_1}{2} + \frac{R_2}{2} + \frac{R_3}{2} + R_4$

Cualquier variación en N , μ , o la geometría del circuito magnético puede emplearse para la transducción de la magnitud física que provoca el cambio. No obstante la mayoría de los sensores inductivos son de reluctancia variable y es un desplazamiento el que la modifica, afectando sobre todo a l_0 y μ . Los primeros se denominan sensores de entrehierro variable y los segundos sensores de núcleo móvil. La aplicación de una inductancia variable a la transducción está sujeta a algunas limitaciones.

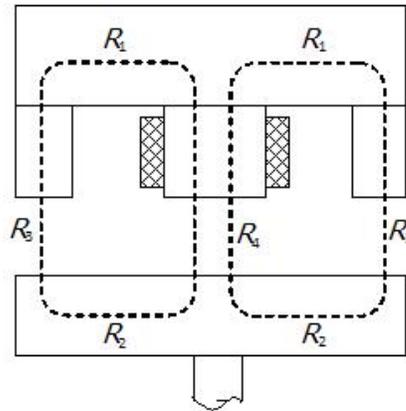


Figura 3.6: Esquema general de un sensor inductivo de reluctancia variable.

- *Los campos magnéticos parásitos:* afectan a L , por lo que puede ser necesario disponer un apantallamiento magnético a su alrededor para que los cambios observados sean sólo debidos al fenómeno a detectar.
- *La relación entre L y R no es constante en todo el dispositivo:* varía hacia los extremos del mismo porque el campo deja de ser uniforme. El flujo magnético disperso es mayor que el flujo eléctrico disperso en los condensadores. Esto limita el alcance de medida y es una fuente de interferencias para otros dispositivos o circuitos próximos.
- *L y R son inversamente proporcionales:* si el parámetro variable es la longitud, el dispositivo tendrá una impedancia inversamente proporcional a la misma. Si lo que varía es μ , entonces hay proporcionalidad entre la impedancia y la magnitud a medir.

Entre las ventajas principales se destacan las siguientes:

- Les afecta poco la humedad ambiente y otros contaminantes, a diferencia de los sensores capacitivos.
- Imponen poca carga mecánica, aunque superior a la de un condensador variable.
- Alta sensibilidad, superior a la de los sensores capacitivos.

En cuanto a las aplicaciones, las más importantes son las medidas de desplazamiento y posición, y los detectores de proximidad de objetos metálicos férricos, en particular en entornos

industriales con polvo en el ambiente y vibraciones. Estos sensores también pueden medir otras magnitudes si un sensor primario apropiado las convierte en un desplazamiento.

Sensores inductivos tipo transformador diferencial: El transformador diferencial de variación lineal se designa normalmente por sus siglas inglesas LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Se basa en la variación de la inductancia mutua entre un primario y cada uno de dos secundarios al desplazarse en su interior un núcleo de material ferromagnético, arrastrado por un vástago no ferromagnético unido a la pieza cuyo movimiento se desea medir.

A medida que el núcleo se mueve, la inductancia mutua cambia, causando que el voltaje inducido en el secundario cambie. Las bobinas están conectadas en serie pero invertidas, así que el voltaje de salida es la diferencia (por eso es “diferencial”) entre los dos voltajes secundarios. Cuando el núcleo está en su posición central, se encuentra equidistante a los dos secundarios, los voltajes inducidos son iguales pero de signo opuesto, así que el voltaje de salida es cero.

En la figura 3.7 se muestra el circuito equivalente de un LVDT. Analizándolo, se puede encontrar la expresión de la tensión del secundario (e_0) en función de los parámetros del circuito y de la tensión de entrada al primario como

$$e_0 = \frac{s(M_1 - M_2)R_c e_1}{2s^2 L_1 L_2 + s(R_2 L_1 + 2R_1 L_2) + R_1 R_2}.$$

Cuando el núcleo es desplazado en una dirección, el voltaje en una bobina aumenta mientras que en la otra disminuye, causando que el voltaje de salida también aumente desde cero hasta su máximo. Este voltaje tiene la misma fase que el voltaje del primario. La magnitud del voltaje de salida es proporcional a la distancia en que fue desplazado el núcleo (hasta cierto límite), por eso el dispositivo es descrito como “lineal” La fase del voltaje indica la dirección del desplazamiento.

Debido a que el núcleo deslizante no toca el interior del tubo, puede moverse prácticamente sin fricción, haciendo del LVDT un dispositivo muy fiable. La ausencia de contactos deslizantes o rotatorios permite que el LVDT sea completamente sellado.

Al alimentar el primario con una tensión alterna, en el secundario aparece una tensión cuyo módulo es proporcional al desplazamiento (x) del núcleo, dentro de unos márgenes. Según se

muestra en la figura, el desplazamiento puede ser positivo o negativo con respecto a la posición de equilibrio, para la cual la salida vale cero.

Obsérvese que los devanados del secundario se conectan en oposición serie. Esta es la forma de conseguir que la salida valga cero en la posición de equilibrio, para la que la tensión sea igual en ambos lados. Esta expresión se obtiene aplicando algunas simplificaciones aceptables, en cuanto

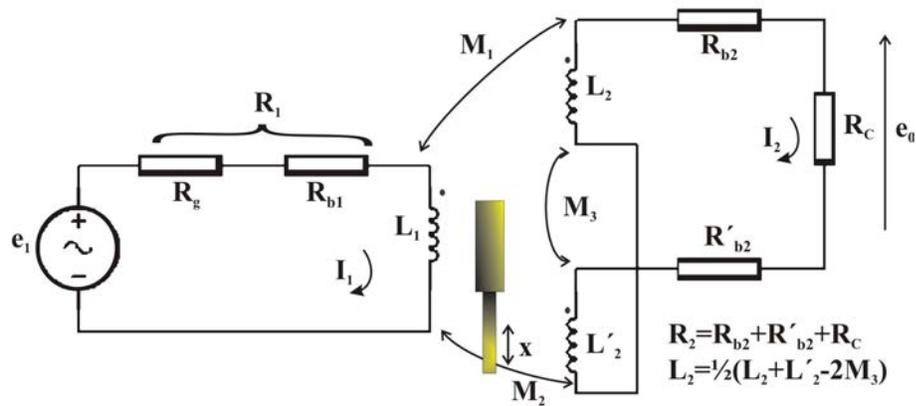


Figura 3.7: Representación interna del funcionamiento de un encoders e imagen de encoder comercial.

a los órdenes de magnitud y dependencias de los parámetros del circuito equivalente. El término $(M_1 - M_2)$ tiene un comportamiento lineal en los alrededores del punto de equilibrio del núcleo y, se puede considerar que es el único término que depende de su posición. De la expresión anterior se deduce que la sensibilidad aumenta con la resistencia de carga (R_C) y la tensión aplicada al primario.

De lo dicho anteriormente se desprende que el LVDT puede ser considerado como un generador de tensión alterna, con frecuencia igual a la de excitación del primario, modulada en amplitud por el desplazamiento del núcleo. El comportamiento descrito está sujeto a algunas limitaciones:

- *En la posición central la tensión de salida no pasa por cero:* en los dispositivos reales es imposible conseguir una simetría total en los dos bobinados y circuitos magnéticos del secundario, por esto, en la posición de equilibrio, la tensión no pasa por cero sino por un mínimo. Normalmente es inferior al 1% del fondo de escala.
- *La temperatura puede modificar la ganancia del LVDT:* un aumento de temperatura del

dispositivo incrementa al alza la resistencia del primario, con lo que baja la corriente y con ella la tensión de salida. Por esta razón, en ocasiones es recomendable una alimentación del primario en corriente. Cuando la frecuencia de alimentación es alta, predomina L1 sobre R1 y el efecto de la temperatura es menor.

Las múltiples ventajas del LVDT justifican su frecuente uso:

- *Resolución:* en teoría es infinita, en la práctica muy alta, superior al 0.1% del fondo de escala.
- *Carga mecánica mínima:* al ser muy bajo el rozamiento entre el núcleo y los devanados, la fuerza necesaria para producir el desplazamiento es prácticamente despreciable. A esta fuerza de arrastre hay que añadir la fuerza magnética que se ejerce sobre el núcleo. Es proporcional al cuadrado de la corriente del primario, es cero en la posición central y aumenta linealmente con el desplazamiento. En todo caso, la fuerza total resultante es mucho menor que la que hay que aplicar para desplazar el cursor de un potenciómetro.
- *Duración casi ilimitada y alta fiabilidad:* esto es consecuencia del bajo rozamiento de la única parte móvil, el núcleo. Su tiempo medio antes de fallar puede ser de hasta 2×10^6 hrs. (228 años).
- *Aislamiento eléctrico:* entre el circuito primario y el secundario. Y también entre el elemento sensor (núcleo-vástago) y el circuito eléctrico, ya que hay un acoplamiento magnético. Esto tiene interés cuando se realizan medidas en atmósferas peligrosas (gases y líquidos inflamables), porque queda limitada la energía que se puede disipar dentro del recinto de medida.
- *Alta linealidad:* en muchos casos hasta del 0.05% del fondo de escala.
- *Alta sensibilidad:* dependiente de la tensión y frecuencia de alimentación del primario y, de la resistencia de carga del secundario (R_C)

Aplicaciones de los LVDT:

- *Las medidas de desplazamiento y posición:* son las aplicaciones más inmediatas de los LVDT. En particular, es muy frecuente su uso como detectores de cero en servosistemas de posición. Los alcances de medida pueden ir desde $100 \mu\text{m}$ a $\pm 25 \text{ cm}$.
- Los LVDT son usados para la realimentación de posición en servomecanismos y para la medición automática en herramientas y muchos otros usos industriales y científicos.
- *Otras magnitudes:* aquí también, mediante el empleo de los sensores primarios adecuados, es posible medir magnitudes cuya variación pueda ser transformada en un desplazamiento del núcleo. Esto ocurre en el caso de presiones, aceleraciones, niveles de líquidos, etc.

Sensores inductivos tipo transformador variable: Se trata de un transformador en el que los devanados admiten un desplazamiento relativo (angular o lineal) entre ellos. Como consecuencia del desplazamiento cambia la inductancia mutua y, por tanto, la tensión inducida en el secundario. En la figura 3.8 se muestra un transformador variable con desplazamiento angular. Consideraremos que el secundario está en vacío y se aplica al primario una tensión senoidal e_1 , de modo que $i_1 = I_m \sin \omega t$.

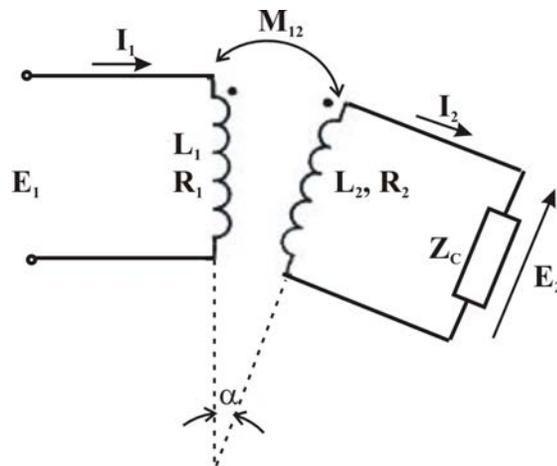


Figura 3.8: Esquema general de un sensor inductivo transformador variable.

Se observa en la expresión 3.7 como la tensión de salida tiene la misma frecuencia que la de entrada, pero su amplitud depende de la inclinación relativa entre los devanados, aunque no es proporcional. Este principio de medida se presta bien a las aplicaciones donde hay que determinar

una posición o desplazamiento angular.

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \frac{N_1 i_1}{R} = \frac{N_1 i_1}{\frac{l}{\mu S}} = \mu \frac{N_1 i_1}{l} S; \\ \phi_2 &= \phi_1 \cos \alpha \Rightarrow \phi_2 = \mu \frac{N_1 i_1}{l} S \cos \alpha; \\ M_{12} &= N_2 \frac{d\phi_2}{di_1} = N_2 N_1 \frac{\mu}{l} S \cos \alpha = M \cos \alpha; \\ e_2 &= M_{12} \frac{di_1}{dt} \Rightarrow e_2 = M I_m \omega \cos \alpha \cos \omega t.\end{aligned}\quad (3.7)$$

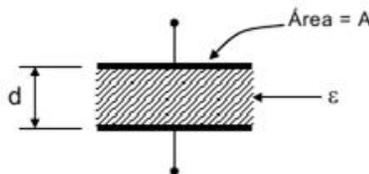
Por su construcción, soportan temperaturas y humedades más altas que otros sensores de desplazamiento angular y soportan bien choques y vibraciones, por lo que están considerados unos sensores robustos. En la figura 3.8 se muestra el esquema simplificado de un sensor de este tipo denominado potenciómetro de inducción.

b) Sensores capacitivos. Están basados en la variación de la capacidad de un condensador como consecuencia de la variación de la magnitud física a medir. Un condensador almacena una carga Q cuando es sometido a una diferencia de potencial V . La carga y la tensión están relacionadas por una constante (C) denominada capacidad,

$$Q = CV. \quad (3.8)$$

La capacidad de un condensador es función de su geometría y de la constante dieléctrica (ϵ) del material dieléctrico utilizado entre las placas. $C = f(\epsilon, \text{geometría})$ Cualquier magnitud física que modifique la constante dieléctrica o la geometría de un condensador podría ser medida midiendo la capacidad. Existen multitud de sensores capacitivos con geometrías diferentes, adaptadas a la medida de diversas magnitudes físicas.

El caso más simple es el condensador de placas paralelas que se muestra en la figura.



$$\text{De donde: } C = \epsilon \frac{A}{d}$$

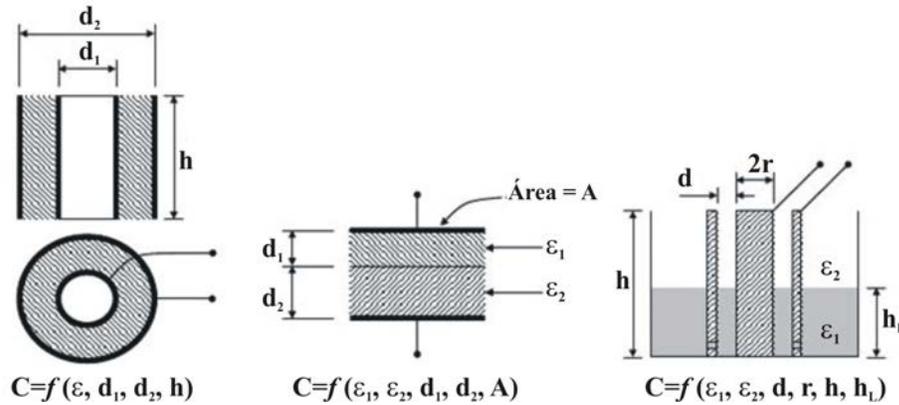


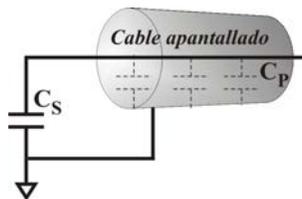
Figura 3.9: Esquemas de condensadores con diferentes tipos de geometrías.

El empleo de un condensador variable como sensor está sujeto a una serie de limitaciones.

- *Efecto borde:* en un condensador de placas paralelas, cuando la separación entre placas es mucho menor que las dimensiones laterales, este efecto es despreciable. En caso contrario, las alteraciones del campo eléctrico en las proximidades de los bordes del condensador, hacen que la capacidad real del mismo no coincida con la obtenida al aplicar la expresión teórica.
- *Aislamiento entre placas:* debe ser alto y constante. Por ejemplo, si como consecuencia de variaciones de humedad, se altera el aislamiento ofrecido por el dieléctrico y aparecen resistencias parásitas en paralelo con C , se producen variaciones en la impedancia del condensador no atribuibles a un cambio de capacidad. Es decir, parte del cambio de impedancia no es consecuencia de la magnitud que se mide.
- *Interferencias capacitivas:* si cualquier conductor próximo al condensador variable alcanza un determinado potencial con respecto a la placa de este no conectada a masa, aparecerá una capacidad parásita entre la placa y el conductor, que interfiere en la medida. Puede ser necesario apantallar eléctricamente esta placa y los cables conectados a ella respecto al entorno ajeno al sensor.
- *Cables de conexión:* al ser apantallados para evitar las interferencias capacitivas, aparece una capacidad parásita (C_P) en paralelo con la capacidad del sensor (C_S). Esto hace que se pierda sensibilidad, pues la magnitud a medir hará cambiar sólo C_S , que es ahora una parte de la capacidad total

El empleo de un condensador variable como sensor está sujeto a una serie de limitaciones.

- *Efecto borde:* en un condensador de placas paralelas, cuando la separación entre placas es mucho menor que las dimensiones laterales, este efecto es despreciable. En caso contrario, las alteraciones del campo eléctrico en las proximidades de los bordes del condensador, hacen que la capacidad real del mismo no coincida con la obtenida al aplicar la expresión teórica.
- *Aislamiento entre placas:* debe ser alto y constante. Por ejemplo, si como consecuencia de variaciones de humedad, se altera el aislamiento ofrecido por el dieléctrico y aparecen resistencias parásitas en paralelo con C , se producen variaciones en la impedancia del condensador no atribuibles a un cambio de capacidad. Es decir, parte del cambio de impedancia no es consecuencia de la magnitud que se mide.
- *Interferencias capacitivas:* si cualquier conductor próximo al condensador variable alcanza un determinado potencial con respecto a la placa de este no conectada a masa, aparecerá una capacidad parásita entre la placa y el conductor, que interfiere en la medida. Puede ser necesario apantallar eléctricamente esta placa y los cables conectados a ella respecto al entorno ajeno al sensor.
- *Cables de conexión:* al ser apantallados para evitar las interferencias capacitivas, aparece una capacidad parásita (C_P) en paralelo con la capacidad del sensor (C_S). Esto hace que se pierda sensibilidad, pues la magnitud a medir hará cambiar sólo C_S , que es ahora una parte de la capacidad total.



- *No linealidad:* su linealidad depende del parámetro que varía, de la expresión de la capacidad y de si se mide la impedancia o la admitancia del condensador. Para el caso de un condensador de placas paralelas:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}; \quad Z = \frac{1}{C\omega j} = \frac{d}{\varepsilon A j}; \quad Y = C\omega j = \frac{\varepsilon A}{d}$$

Parámetro variable	ε	A	d
Impedancia (Z)	No lineal	No lineal	lineal
Admitancia (Y)	Lineal	Lineal	No lineal

- *Alta impedancia de salida:* si se quiere medir la tensión en los terminales del sensor capacitivo, es preciso utilizar un circuito de medida que tenga una impedancia de entrada muy alta. De lo contrario se producirá un error por carga considerable. Esto no siempre es fácil de conseguir. Una alternativa consiste en medir la corriente a través del sensor, con lo que la exigencia de una impedancia de entrada alta desaparece. Cuando estudiemos los circuitos de acondicionamiento para estos sensores trataremos este punto con más detalle.

Frente a las limitaciones anteriores, los sensores capacitivos presentan una serie de ventajas que los hacen atractivos en muchas aplicaciones.

- *Estabilidad y reproducibilidad muy elevadas:* al no depender la capacidad de las propiedades de las placas, no afectan en este sentido los cambios de temperatura ni hay derivas temporales. Si el dieléctrico es el aire, ε varía poco con la temperatura. Para otros materiales, las variaciones de temperatura pueden tener más influencia. Pero en todo caso, la resistividad varía más con la temperatura, por lo que los sensores resistivos deben ser considerados menos inmunes a estos cambios de las condiciones ambientales.
- *Muy alta resolución en la medida de desplazamientos:* esto es consecuencia de la alta resolución que se puede conseguir, con los circuitos de acondicionamiento, en la medida de capacidades. Se logran detectar desplazamientos de hasta 10 pm.
- *No producen campos eléctricos ni magnéticos grandes:* esto es una ventaja frente a los sensores inductivos, que pueden producir campos magnéticos de dispersión intensos que perturban el funcionamiento de otros circuitos del entorno.

Los valores habituales de capacidad están entre 1 y 500 pF y la frecuencia de alimentación suele ser superior a 10 kHz para reducir la impedancia de salida. Entre las aplicaciones más inmediatas de los sensores capacitivos están los detectores de proximidad y las medidas de desplazamientos

lineales y angulares, niveles de líquidos y humedad. Estos sensores pueden medir otras magnitudes si un sensor primario apropiado las convierte en un desplazamiento. Por ejemplo, presión, aceleración, fuerza, etc.

c) **Sensores Foelectronicos.** El sensor de giro fotoelectrónico de manera general consta de un emisor de luz (infrarroja generalmente), y un receptor de la luz. Un disco ranurado acoplado a la flecha del motor gira dejando pasar la luz infrarroja cada vez que una ranura lo permite. Cuando la luz incide sobre el receptor, por lo general un fotodiodo o fototransistor, se produce un efecto de conducción eléctrica y es posible abrir y cerrar un circuito eléctrico. El Sensor Óptico cierra a tierra un circuito que posee una tensión de referencia, que es puesta a masa cada vez que la ranura deja pasar la luz como se observa en la figura 3.10.

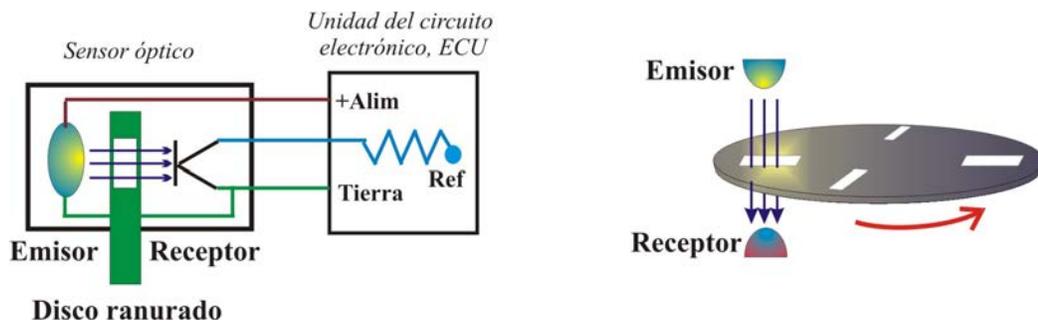


Figura 3.10: Esquema de funcionamiento de un sensor Fotoelectrónico.

Estos sensores son muy usados en algunas industrias para contar piezas, detectar colores, etc., ya que reemplazan una palanca mecánica por un rayo de luz que puede ser usado en distancias de menos de 20 mm hasta de varias centenas de metros, de acuerdo con los lentes ópticos empleados.

Funcionan con una fuente de luz que va desde el tipo incandescente de los controles de elevadores a la de estado sólido modulada (LED) de los detectores de colores. Y operan al detectar un cambio en la luz recibida por el fotodetector. Los fotodetectores son típicamente fotodiodos o fototransistores, inclinándose los fabricantes por los primeros por su insensibilidad a campos de radiofrecuencia, que podrían causar interferencia. Algunos modelos de estos sensores son fabricados con inmunidad a la luz solar incidente o reflejada. Para ello emplean haces de luz modulada que únicamente pueden ser detectados por receptores sintonizados a la frecuencia de modulación.

Los diferentes tipos de sensores se agrupan por el tipo de detección:

1. *Sensores de Transmisión Directa*. Cuando existe un receptor y un emisor apuntados uno al otro. Tiene este método el más alto rango de detección (hasta unos 60 m).
2. *Sensores Reflex*. Cuando la luz es reflejada por un reflector especial cuya particularidad es que devuelve la luz en el mismo ángulo que la recibe (9 m de alcance).
3. *Sensores Reflex Polarizados*. Son prácticamente iguales a los del tipo anterior, excepto que, el emisor tiene un lente que polariza la luz en un sentido y el receptor otro que la recibe mediante un lente con polarización a 90° del primero. Con esto, el control no responde a objetos muy brillosos que pueden reflejar la señal emitida (5m de alcance).
4. *Sensores de Foco Fijo*. Cuando la luz es reflejada difusamente por el objeto y es detectado por el hecho de que el transmisor y el receptor están estereoscópicamente acoplados, evitando con ello interferencia del fondo (3.5 m de alcance).
5. *Sensores de detección difusa*. Iguales a los anteriores pero los lentes son divergentes, y se usan para detectar objetos muy próximos (1.5 m de alcance).
6. *Sensores de Fibra Óptica*. En este tipo, el emisor y receptor están interconstruidos en una caja que puede estar a varios metros del objeto a sensar. Para la detección emplean los cables de fibra óptica por donde circulan los haces de luz emitido y recibido. La mayor ventaja de estos sensores es el pequeño volumen o espacio ocupado en el área de detección.

d) Sensores de Efecto Hall. Los sensores de efecto Hall se utilizan en los automóviles para medir velocidades de rotación o detectar la posición de un determinado elemento. Su principal ventaja es que pueden ofrecer datos fiables a cualquier velocidad de rotación. Y sus inconvenientes son la mayor complejidad y precio con respecto a un sensor inductivo.

El sensor de efecto Hall se basa en la tensión transversal de un conductor que está sometido a un campo magnético. Colocando un voltímetro entre dos puntos transversales de un cable se puede medir esa tensión. Para ello hay que hacer circular por el cable una intensidad fija y acercar un imán. Los electrones que pasan por el cable se verán desplazados hacia un lado. Entonces

aparece una diferencia de tensión entre los dos puntos transversales del cable. Al separar el imán del cable, la tensión transversal desaparece. Para poder utilizar la tensión transversal es necesario amplificarla, porque su valor es muy reducido.

Un sensor de efecto Hall utilizado en automoción se compone de:

- Un generador magnético que suele ser un imán fijo.
- Un pequeño módulo electrónico donde se encuentran los componentes que miden la tensión transversal.
- Una corona metálica con ventanas para interrumpir el campo magnético.

La corona metálica se intercala entre el imán fijo y el módulo electrónico y está unida a un eje con giro. Según la posición de la corona, el campo magnético del imán llega hasta el módulo electrónico. La tensión obtenida a la salida del módulo electrónico, una vez tratada y amplificada corresponde con un valor alto (de 5 a 12 voltios) cuando la corona tapa el campo magnético, y un nivel bajo (de 0 a 0,5 voltios) cuando la corona descubre el imán.

Los sensores de efecto Hall se suelen utilizar para detectar la posición de los árboles de levas, la velocidad del vehículo y en algunos distribuidores para determinar el momento de encendido. También pueden emplearse para determinar la posición del cigüeñal.

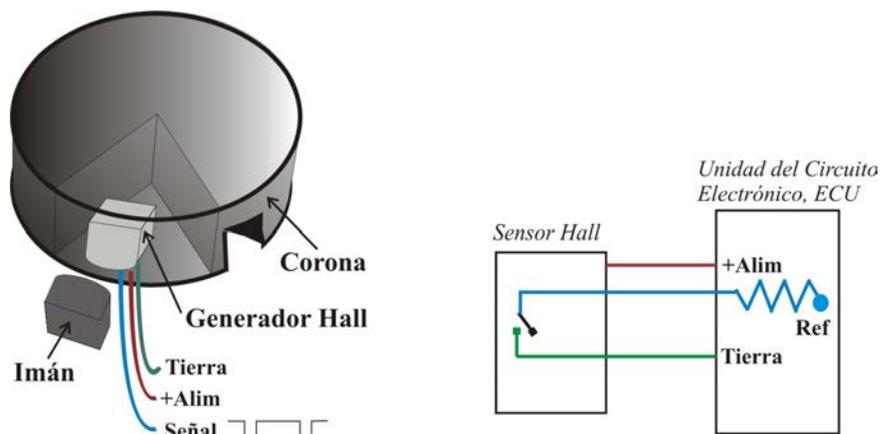


Figura 3.11: Esquema de funcionamiento de un sensor de Efecto Hall.

En la figura 3.11 se observa que el sensor de efecto Hall se conecta mediante tres cables eléctricos. Uno de ellos corresponde con el valor negativo (masa ó tierra), otro cable corresponde

con la alimentación, que suele ser de 5 ó de 12 voltios. El tercer cable corresponde con la señal de salida que varía según la posición de la corona metálica.

Para comprobar el funcionamiento de un sensor Hall basta verificar el valor de la tensión de alimentación y la variación de la tensión en la señal de salida cuando alguna ventana de la corona permite el flujo del campo magnético.

Métodos de Medición Directa sin contacto por sensores pasivos

a) Sensores ferromagnéticos. Cuando se trata de detectar el paso de una pieza metálica sin entrar en contacto con ella, se piensa inmediatamente en el sensor de proximidad. Entre los modelos inductivos, capacitivos y optoeléctricos (células fotoeléctricas), se tiene la práctica seguridad de encontrar el modelo que conviene a la aplicación. Pero existen otras alternativas. Los sensores de impulsos electromagnéticos y los sensores ferrostat, menos conocidos que los modelos citados, presentan el atractivo de ser totalmente pasivos, y algunos modelos son capaces de trabajar en entornos particularmente difíciles.

A diferencia de los sensores de proximidad inductivos, los sensores ferromagnéticos no incorporan circuitería electrónica. Para contar un número de vueltas, para medir una velocidad de rotación o una posición angular, un método muy simple consiste en montar una rueda polar en el eje de la máquina. Esta rueda incluye en su periferia un cierto número de dientes (agujeros o ranuras); la medición consiste entonces en contar el número de dientes que pasan frente a un punto fijo. Esta tarea de conteo es confinada a los detectores de impulsos.

La detección se hace sin contacto, a una distancia del orden del milímetro. Existen varios principios de detección, basados en las leyes del magnetismo. Siendo así, sensores distintos de los sensores de proximidad inductivos, que incluyen un circuito oscilador mediante transistor más o menos amortiguado por la presencia de una pieza metálica situada en sus inmediaciones.

b) Sensores electromagnéticos. Los detectores de pulsos de tipo electromagnético presentan la ventaja de no necesitar ninguna aportación de energía. La parte del detector es muy somera:

por ejemplo, no hay componentes activos, lo que permite trabajar en un gran margen de temperatura ambiente -20°C a $+150^{\circ}\text{C}$ (como estándar, mucho más allá según la demanda). A partir de este hecho, las versiones de seguridad intrínseca para funcionamiento en zonas que presentan riesgo de explosión son relativamente fáciles de aplicar.

El principio de los sensores es el siguiente; un núcleo de hierro, una bobina de inducción y un imán permanente, son los únicos elementos necesarios para la parte de detección, siendo el amplificador desplazado a una distancia que puede alcanzar la decena de metros. El paso de los dientes de la rueda influye en el campo magnético y provoca en la bobina una tensión proporcional a la velocidad de variación del flujo magnético del núcleo.

Como en cualquier medición de magnitud dependiente del tiempo, es necesario que la señal dada por el sensor sea siempre superior al umbral de detección de la electrónica. Puesto que la tensión dada por los sensores crece linealmente con la velocidad de giro, el problema no existe a altas frecuencias. Por el contrario, en la banda de bajas frecuencias hace falta controlar, para cada caso de aplicación, la magnitud de la señal dada para el número de vueltas mínimo que se deba medir. En la práctica, esta velocidad mínima es de 10 vueltas por minuto

3.2 Métodos de Medición Indirecta de la velocidad

Los métodos de medición indirecta atienden a comportamientos presentados por el movimiento de piezas mecánicas en contacto, y que son mejor conocidos como vibraciones mecánicas, las cuales se transmiten en todas direcciones por las piezas en contacto al eje del motor. Dichas vibraciones algunas veces es posible asociarlas de forma muy simple a la frecuencia de rotación, al manifestarse por desplazamientos oscilatorios en elementos en contacto al motor ó en el sonido producido.

El concepto de vibración se refiere a un cuerpo que experimenta cambios alternativos, de tal modo que sus puntos oscilen sincrónicamente en torno a sus posiciones de equilibrio, sin que el campo cambie de lugar.

Como otro concepto de vibración, se puede decir que es un intercambio de energía cinética en cuerpos con rigidez y masa finitas, el cual surge de una entrada de energía dependiente del

tiempo.

Este intercambio de energía puede ser producido por:

- Desequilibrio en maquinas rotatorias.
- Entrada de Energía Acústica.
- Circulación de Fluidos o masas.
- Energía Electromagnética.

Sea cualquiera la causa de la vibración, su reducción es necesaria debido a diversas razones entre las cuales tenemos:

- La excesiva vibración puede limitar la velocidad de procesamiento.
- La vibración es responsable de la pobre calidad de los productos elaborados por maquinas-herramientas.
- La vibración de maquinarias puede resultar en radiación de ruido.
- La vibración puede alcanzar a otros instrumentos de precisión de otras fuentes, y causar fallas de funcionamiento.

La medición de vibración, juega un papel muy importante en el desarrollo de técnicas para mitigarla o reducirla, y en el establecimiento de límites en los niveles de ruido de la maquinaria existente en una instalación industrial. Aproximadamente el 50% de las averías en máquinas rotativas se deben a desalineaciones en los ejes. Las máquinas mal alineadas generan cargas y vibraciones adicionales, causando daños prematuros en rodamientos, obturaciones y acoplamientos, también aumenta el consumo de energía. Gracias a los avances de la electrónica, actualmente se tienen instrumentos de medición altamente sofisticados que permiten cuantificar la vibración de manera precisa, a través de diversos principios. Es por esto que es muy importante, un buen entendimiento de los transductores empleados para la medición de vibración, y su interfaz con los sofisticados equipos de instrumentación y de adquisición de datos.

Los transductores de vibración son empleados para medir la velocidad lineal, desplazamiento, proximidad, y también la aceleración de sistemas sometidos a vibración. En general, los transductores empleados en el análisis de vibración, convierten la energía mecánica en energía eléctrica, lo que significa que producen una señal eléctrica la cual esta en función de la vibración. Estos pueden ser usados aisladamente, o en conjunto con un sistema de adquisición de datos.

Se pueden encontrar en diversas presentaciones que pueden ser, elementos sensores simples, transductores encapsulados, o ser parte de un sistema sensor o instrumento, incorporando características tales como totalización, visualización local o remota y registro de datos. Los transductores de vibración pueden tener de uno a tres ejes de medición, siendo estos ejes ortogonales. Al momento de seleccionar transductores de vibración es necesario considerar cinco características principales a saber: rango de medición, rango de frecuencia, precisión, sensibilidad transversal y condiciones ambientales.

El rango de medición puede ser en unidades “g” para la aceleración, en pulgadas/sec para velocidad lineal (y otras distancias en el tiempo), y pulgadas u otras distancias para desplazamiento y proximidad. La frecuencia es medida en Hertz (Hz), la precisión es comúnmente representada como un porcentaje del error permisible sobre el rango completo de medición del dispositivo. La sensibilidad transversal se refiere al efecto que una fuerza ortogonal puede ejercer sobre la fuerza que se esta midiendo, ésta sensibilidad también se representa como un porcentaje del fondo escala de la interferencia permisible. Para las condiciones ambientales, se deben considerar variables tales como la temperatura de operación y la máxima fuerza de vibración y choque, que el transductor será capaz de manejar.

3.3.1 Métodos de Medición Indirecta por medios ópticos

Vibrómetro Doppler Láser LDV.

El vibrómetro Láser Doppler es un dispositivo de medición que emplea la tecnología láser y la interferometría óptica para medir de forma remota, velocidades de superficie o vibraciones de puntos específicos en una estructura en vibración, con una alta resolución espacial, y un amplio rango de amplitud y frecuencias.

El principio de la vibrometría Láser (LDV) se apoya en la detección de un cambio Doppler en la frecuencia de la luz coherente dispersada por un objetivo en movimiento, del cual se obtiene una medición resuelta en el tiempo de la velocidad del objetivo. Para ello, se proyecta un rayo láser sobre la superficie en vibración. El cambio en frecuencia de la luz recogida de vuelta desde la superficie, es una cantidad proporcional a la velocidad de la superficie (El efecto Doppler). El instrumento mide este desplazamiento de frecuencia para producir una señal de velocidad instantánea la cual puede ser analizada subsecuentemente.

La interferometría es el proceso de cuantización del fenómeno que se observa cuando se superponen dos frentes de onda luminosos, que dependen del retraso relativo entre las ondas que se superponen.

Un vibrómetro típico comprende una "cabeza" o sensor óptico interferométrico y una unidad electrónica de control. El controlador procesa la señal de la cabeza óptica y entrega un voltaje analógico proporcional a la velocidad o desplazamiento de un punto de la superficie.

A diferencia de los transductores convencionales tales como los acelerómetros que se tienen que fijar en la superficie de prueba, los vibrómetros láser operan completamente sin contacto y no son afectados por la superficie, ni por las condiciones ambientales tales como la temperatura y presión. Los vibrómetros láser están técnicamente bien adaptados a las aplicaciones generales pero ofrecen beneficios especiales donde se imponen ciertas restricciones de medición, por ejemplo altas frecuencias de operación, alta resolución espacial u operación de transductores remotos, o por la estructura misma, la cual puede ser de una superficie caliente, de luz, o rotatoria. Las mediciones sobre tales estructuras son a menudo, aplicaciones importantes para LDVs.

La vibrometría Láser Doppler ofrece una solución particularmente versátil para muchos problemas de medición industriales. Las láminas de deflexión de estructuras mecánicas y sus componentes pueden ser medidas fácil y rápidamente, sin necesidad de superficies de prueba. El rango de medición de amplitud y frecuencia de un vibrómetro Láser abarca típicamente desde señales DC a señales de más de 300 kHz.

Puesto que la salida es directamente proporcional a la velocidad instantánea de la superficie, esta técnica ofrece una alternativa a los transductores de contacto para mediciones de movilidad.

La medición de vibración a través de vibrometría láser, siempre ha sido un problema de particular interés para las industrias aeroespaciales y automotrices, sin embargo, debido a su gran precisión, el uso de esta técnica de medición, se está difundiendo hacia otras aplicaciones y procesos industriales tales como:

- Control de Calidad de Productos
- Medición de fluidos
- Control de Calidad en Tubos de Rayos Catódicos para Televisión
- Optimización en la producción de cornetas de sonido de elevada potencia
- Evitar la excesiva vibración que pueda dañar equipos rotativos.

3.3.2 Métodos de Medición Indirecta por medios mecánicos

La medición de la vibración se puede definir como el estudio de las oscilaciones mecánicas de un sistema dinámico. Las mediciones de vibración deben ser hechas con la finalidad de producir los datos necesarios, para realizar significativas conclusiones del sistema bajo prueba. Estos datos pueden ser usados para minimizar o eliminar la vibración, y por tanto eliminar el ruido resultante. En algunas aplicaciones, el ruido no es el parámetro a controlar, sino la calidad del producto obtenido por el sistema.

Un sistema de medición y procesamiento de señales de vibración por computadora típica, está formado por:

- a) Los transductores de vibraciones (Acelerómetros, LVDTs, Sondas de Corriente Eddy) los cuales son los encargados de transformar las vibraciones en señales eléctricas.
- b) Un sistema de acondicionamiento de señal, el cual se encarga de recoger las diferentes señales, amplificarlas y llevarlas a los niveles de tensión aceptados por el sistema de adquisición de datos.
- c) La tarjeta de adquisición de datos, la cual se encarga de digitalizar la señal, realizando para ello, un muestreo discreto de la señal analógica proveniente del acondicionamiento de señal,

y de introducirla al computador donde se realizan diferentes tipos de procesamiento para obtener toda la información que se requiere para el análisis y monitoreo de las vibraciones de las máquinas.

a) Métodos de Medición Indirecta usando un acelerómetro

Los acelerómetros son dispositivos para medir aceleración y vibración. En la figura 3.12 se observa uno de estos dispositivos el cual convierte la aceleración de gravedad o de movimiento, en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, o mecanismo sometido a vibración o aceleración. Esta señal analógica indica en tiempo real, la aceleración instantánea del objeto sobre el cual el acelerómetro está montado.



Figura 3.12: Apariencia física de un Acelerómetro.

Los acelerómetros miden la aceleración en unidades “g”. Un g se define como la fuerza gravitacional de la tierra aplicada sobre un objeto o persona. Los acelerómetros son direccionales, esto quiere decir que sólo miden aceleración en un eje. Para monitorear aceleración en tres dimensiones, se emplea acelerómetros multi-ejes (ejes x,y,z), los cuales son ortogonales. Existen dos tipos de acelerómetros a saber: pasivos y activos.

Los **acelerómetros pasivos** envían la carga generada por el elemento sensor (puede ser un material piezoeléctrico), y debido a que esta señal es muy pequeña, estos acelerómetros requieren de un amplificador para incrementar la señal.

Los **acelerómetros activos** incluyen circuitos internos para convertir la carga del acelerómetro a una señal de voltaje, pero requieren de una fuente constante de corriente para alimentar el circuito.

Las opciones de salida eléctrica dependen del sistema utilizado con los acelerómetros. Las opciones analógicas comunes son voltaje, corriente, y frecuencia. Las opciones digitales son las señales paralelas y seriales. Otra opción es usar acelerómetros con una salida de cambio de estado de switches o alarmas.

Existen dos tipos de acelerómetros básicamente:

- Acelerómetros de Alta Impedancia
- Acelerómetros de Baja Impedancia

Acelerómetros de Alta Impedancia. La salida de carga del cristal tiene una impedancia de salida muy alta y se puede obtener fácilmente. Se pueden emplear técnicas especiales para obtener la señal del sensor. La alta impedancia resultante del acelerómetro es útil donde las temperaturas exceden los 120°C, prohibiendo el uso de sistemas microelectrónicos dentro del sensor. Este tipo de sensor requiere el uso de conductor para bajo ruido. Note que la señal de alta impedancia debe ser convertida a baja impedancia con un convertidor de impedancia o un amplificador de carga antes de ser conectado a un sistema de adquisición de datos. Generalmente, si la sensibilidad de salida es especificada en unidades de pC/g (pico coulombs por g) se tienen un sensor de alta impedancia.

Acelerómetros de Baja Impedancia. En un acelerómetro de baja impedancia se deben emplear sistema microelectrónicos ubicados dentro de la carcasa del sensor, para detectar la carga generada por el cristal piezoeléctrico. De esta manera, la transformación de alto a bajo es hecha en el punto de medición y solo se transmiten señales de baja impedancia desde el sensor. Una salida de baja impedancia es deseable cuando se requieren grandes distancias, también proveen una impedancia propia para la mayoría de los sistemas de adquisición de datos. Generalmente, si la sensibilidad de salida esta especificada en mv/g (milivoltios por unidad g) tales como 10 mv/g

o 100 mv/g, se tiene un sensor de baja impedancia.

Acelerómetros Piezoeléctricos

Este tipo de acelerómetros aprovechan los fenómenos piezoeléctricos en algunos materiales, para generar una señal eléctrica proporcional, a la aceleración de la vibración a la que son sometidos. El elemento activo del acelerómetro es un cristal piezoeléctrico pegado a una masa conocida. Un lado del cristal esta conectado a un poste rígido en la base del sensor. En el otro lado se encuentra adjunto un material llamado masa sísmica. Cuando el acelerómetro se encuentra sometido a vibración, se genera una fuerza, la cual actúa sobre el elemento piezoeléctrico. Esta fuerza es igual al producto de la aceleración por la masa sísmica. Debido al efecto piezoeléctrico, se genera una salida de carga proporcional a la fuerza aplicada. Puesto que la masa sísmica es constante, la señal de salida de carga es proporcional a la aceleración de la masa. Sobre un amplio rango de frecuencia tanto la base del sensor como la masa sísmica tienen la misma magnitud de aceleración, allí el sensor mide la aceleración del objeto bajo prueba.

Existen diversos materiales de cristales piezoeléctricos, que son útiles en la construcción de acelerómetros. Entre los materiales más comunes se tiene Metaniobato cerámico, Zirconato, Titanato y cristales naturales de cuarzo. Existen también, diferentes configuraciones mecánicas de las masas y cristales dentro de la carcasa del acelerómetro. Las configuraciones típicas incluyen compresión aislada, esquila, y esquila en anillo.

Los acelerómetros piezoeléctricos son extremadamente versátiles y ampliamente usados para la supervisión de maquinarias industriales. En la figura 3.13 se observa un acelerómetro del tipo industrial típico. Los acelerómetros industriales puede llegar a medir niveles de vibración en micro-gs desde 60 c.p.m. hasta unos 900,000 c.p.m. (1 a 15,000 Hz).

Comparados con otros tipos de transductores, los acelerómetros piezoeléctricos tienen las siguientes ventajas:

- Un rango de medición bastante elevado, bajo ruido de salida
- Excelente linealidad en todo su rango dinámico

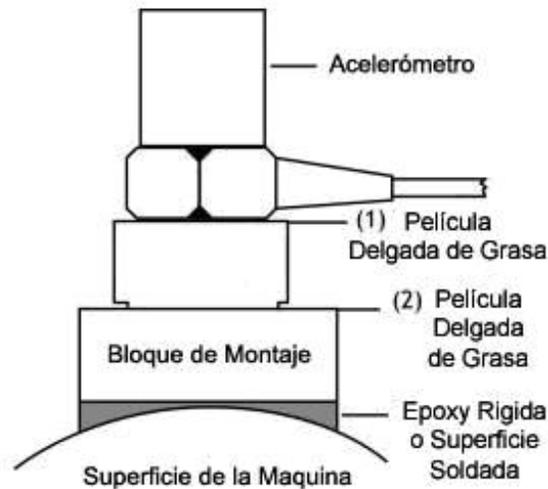


Figura 3.13: Acelerómetro Piezoeléctrico.

- Amplio rango de frecuencias
- Tamaño Compacto
- No lleva partes móviles
- Auto-generación. No se requiere alimentación externa

Transductores de Piezovelocidad

Los transductores de PiezoVelocidad (PVT) funcionan de manera similar a los acelerómetros piezoeléctricos, pero están diseñados para trabajar en sistemas de baja velocidad, en el rango aproximado de 90 a 3600 ciclos por minuto. El PVT incluye un convertidor de velocidad y emplea un elemento sensor piezocerámico y una masa sísmica densa para producir una carga de salida proporcional a la aceleración.

Adicionalmente existen otras clases de acelerómetros tales como:

- Acelerómetros de alta sensibilidad para estudios geológicos y detección de terremotos
- Acelerómetros para choque
- Acelerómetros capacitivos para baja frecuencia

- Acelerómetros miniatura
- Amplificadores y convertidores de carga
- Calibradores de vibración
- Medidores de vibración portátiles
- Monitorizado de vibraciones en máquinas industriales

b) Métodos de Medición Indirecta por medio acústico

Recientemente a surgido una innovadora forma de medir la velocidad, que es por medio de las vibraciones sonoras producidas por el movimiento de una pieza desbalanceada, el choque constante entre elementos del sistema, arrastre de un balero o buje, etc., aunque la manera más simple de detectar la velocidad es a partir del corte del aire que producen las aspas del sistema de enfriamiento del motor “ventilador”. Ciertamente este tipo de técnica no es universal como las hasta ahora mencionadas, ya que se requiere del desarrollo de un software distinto para cada caso, por ende no se tienen equipos comerciales con esta técnica [6].

El principio de funcionamiento se describe en el diagrama de la figura 3.14, donde primeramente mediante un micrófono se detectan las señales sonoras del aire (señales analógicas) originadas por el motor y que se transmiten hacia la tubería, se recomienda un micrófono unidireccional con filtro y amplificador integrado. Posteriormente se digitaliza la señal y la información generada se procesada con algún software en una computadora. Por lo general el análisis que se realiza consiste en aplicarle la Transformada Rápida de Fourier ó la Transformada Wavelet a la señal digitalizada [7], luego mediante un técnica de aprendizaje de inteligencia artificial (por lo general redes neuronales) se discrimina entre rangos de velocidad, de manera que el sistema final es relativamente inteligente para identificar la velocidad en que trabaja una máquina bajo ciertas condiciones de operación [8].

Dentro de las limitantes que presenta éste método, se pueden mencionar las siguientes:

- Durante la prueba se requiere de un ambiente de ruido controlado.

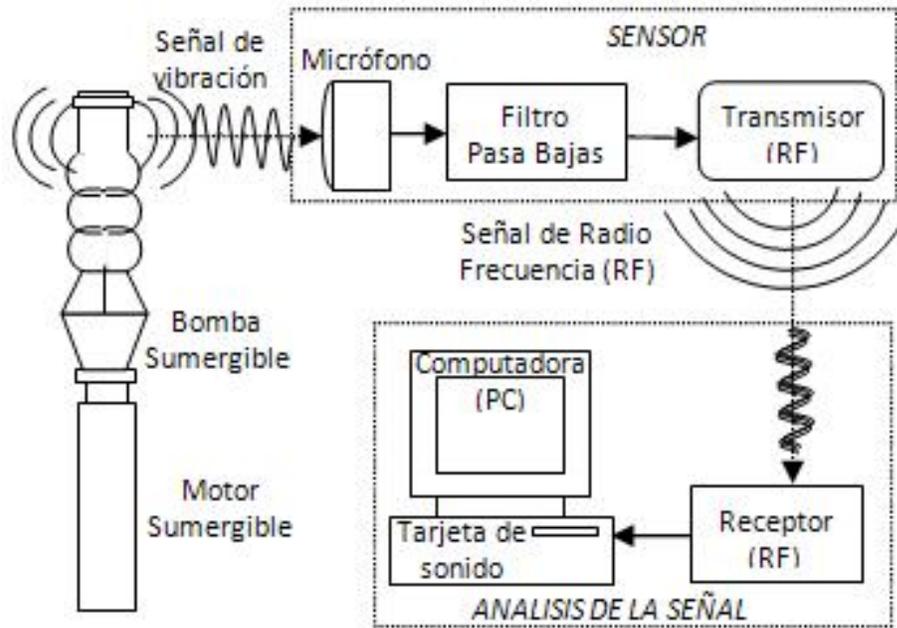


Figura 3.14: Diagrama de bloques del sistema acústico para la medición de velocidad [9].

- El sistema es sensible a perturbaciones de deterioro ó de algún tipo de falla en el motor alterando la medida de la velocidad.
- El software de interpretación de la velocidad es personalizado. Diferente para cada motor, maquinaria, lugar, carga de trabajo, etc., es decir; depende de un número de variables relativamente grande.
- La resolución del equipo ésta limitada por la tarjeta de sonido de la computadora.

c) Métodos de Medición Indirecta por Lengüetas Vibratorias

Es un instrumento que consiste de un conjunto de lengüetas metálicas calibradas cuidadosamente las cuales responden a las frecuencias de vibración, su principio de funcionamiento es muy simple, las lengüetas están diseñadas para oscilar sólo para algunas frecuencias [10], [11]. Este conjunto de lengüetas está contenido en una caja rectangular de aluminio con una escala de 2 hileras de lengüetas como se observa en la figura 3.15. Es ideal para medir revoluciones por minuto en toda clase de equipo eléctrico, centrifugadoras, turbinas o cualquier máquina que tenga una sola pieza rotativa.

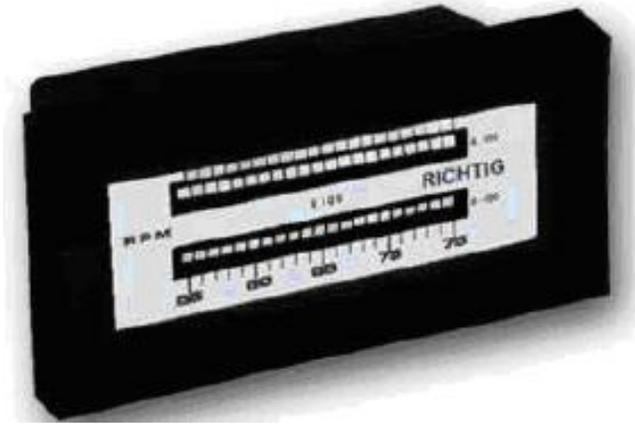


Figura 3.15: Tacómetro de lengüetas vibratorias.

En la tabla 3.1 se presentan los modelos de tacómetros comercialmente fabricados, con sus respectivos intervalos de trabajo.

Cuadro 3.1: Tacómetros de lengüetas comerciales empleados para la medición de la velocidad.

Modelo	1ra hilera	Intervalo de rpm entre lengüetas	2da hilera	Intervalo de rpm entre lengüetas
M01	1000-1500	25	1500-2000	25
M02	1000-2000	50	2000-4000	100
M03	1500-2500	50	2500-4500	100
M04	1000-3000	100	3000-5000	100
M05	1000-2000	50	2000-6000	200
M06	2500-4500	100	4500-6500	100
M07	4000-5000	50	5000-7000	100
M08	3500-5500	100	5500-7000	100
M09	5500-6500	50	6500-8500	100
M10	7000-9000	100	9000-11000	100

4 Instrumentación virtual

Muchas veces la realización de una medida requiere la intervención de varios instrumentos, unos generan estímulos sobre el dispositivo que se pretende medir y otros recogen la respuesta a estos estímulos. Este conjunto de instrumentos que hace posible la realización de la medida recibe el nombre de sistema de instrumentación. Todo sistema de instrumentación consta de unos instrumentos, un sistema de interconexión de estos instrumentos y un controlador inteligente que gestiona el funcionamiento de todo el sistema y da las órdenes para que una medida se realice correctamente.

El concepto de instrumentación virtual nace a partir del uso de la computadora personal, como forma de reemplazar equipos físicos por software, permite a los usuarios interactuar con la computadora como si estuviesen utilizando un instrumento real. El usuario manipula un instrumento que no es real, se ejecuta en una computadora, tiene sus características definidas por software pero realiza las mismas funciones que un equipo real [12].

La idea es sustituir y ampliar elementos "hardware" por otros "software", para ello se emplea un procesador que ejecute un programa específico, este programa se comunica con los dispositivos para configurarlos y leer sus medidas. En muchas ocasiones el usuario final del sistema de instrumentación sólo ve la representación gráfica de los indicadores y botones de control virtuales en la pantalla del ordenador.

El concepto de instrumentación virtual implica adquisición de señales, el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los datos e información relacionados con la medición de una o varias señales, interfaz hombre-máquina, visualización, monitoreo y supervisión remota del proceso, la comunicación con otros equipos, etc [13].

4.1 Instrumentación virtual

Un sistema de instrumentación virtual esta enfocado a los instrumentos encargados de medir señales, registrar datos y decidir las acciones de control, evidentemente, se requiere de una etapa de actuación, que conforma la interfaz entre la computadora y el sistema a controlar, por tanto esta etapa implicará drivers de potencia ó transductores de señal especiales. Además, existen otras etapas auxiliares que no intervienen en el proceso de medida, como es el caso del subsistema de alimentación.

Los inicios de la instrumentación controlable desde el ordenador, y de hecho de los sistemas de instrumentación, se sitúan a mediados de los años 60 cuando Hewlett Packard, desarrolló su bus para instrumentación HP-IB (Hewlett Packard Interface Bus) que permitía conectar su gama de instrumentos programables a un ordenador. Esta interfase ganó rápidamente gran popularidad y en 1975 fue aceptada como un estándar: el IEEE-488. Desde aquellos días hasta ahora el estándar ha sufrido varias modificaciones y el bus GPIB (acrónimo de General Purpose Interface Bus, por el que se le conoce habitualmente) se ha convertido en uno de los más populares en el campo de la instrumentación programable. La instrumentación virtual es un concepto introducido por la compañía National Instruments el año 2001, los cuales crearon un software que le permitía a la computadora realizar mediciones [14].

El término "virtual" nace a partir del hecho de que cuando se utiliza el ordenador PC como "instrumento" es el usuario mismo quién, a través del software, define su funcionalidad y "aparición" y por ello decimos que "virtualizamos" el instrumento, ya que su funcionalidad puede ser definida una y otra vez por el usuario y no por el fabricante.

La modelación de la realidad que tiene lugar como resultado la simulación, no constituye un elemento determinante para penetrar en la esencia de la misma y llegar a conocerla, es necesario el empleo de procedimientos que la complementen metodológicamente, y alcanzar entonces los objetivos y la escenificación de la misma. La simulación o virtualización consiste por tanto en la representación de la realidad [15].

4.2 Diseño de instrumentos virtuales

Para construir un instrumento virtual, sólo requerimos de una PC, una tarjeta de adquisición de datos con acondicionamiento de señales (PCMCIA, ISA, XT, PCI, etc.) y el software apropiado.

Un instrumento virtual debe realizar como mínimo las tres funciones básicas de un instrumento convencional: adquisición, análisis y presentación de datos.

La instrumentación virtual puede también ser implementada en equipos móviles (laptops), equipos distribuidos en campo (RS-485), equipos a distancia (conectados vía radio, Internet, etc.), o equipos industriales (NEMA 4X, etc.).

Existe una tarjeta de adquisición de datos para casi cualquier bus ó canal de comunicación en PC (ISA, PCI, USB, serial RS-232, RS-422, paralelo EPP, PCMCIA, CompactPCI, PC/104, VMEbus, CAMAC, PXI, VXI GPIB, etc.), y existe un driver para casi cualquier sistema operativo (WIN /3.1 /95 /2000 /XP /NT, VISTA, DOS, Unix, Linux, MAC OS, etc.).

Algunos programas especializados en este campo son LabVIEW, Logic-Bus, Agilent-VEE (antes HP-VEE), Cyber Tools, Beta Instruments Manager, Matlab Simulink, etc. Un sistema de medición y procesamiento de señales de vibración por computadora típica, está formado por:

- Los transductores de vibraciones (Acelerómetros, LVDTs, Sondas de Corriente Eddy) los cuales son los encargados de transformar las vibraciones en señales eléctricas.
- Un sistema de acondicionamiento de señal, el cual se encarga de recoger las diferentes señales, amplificarlas y llevarlas a los niveles de tensión aceptados por el sistema de adquisición de datos.
- La tarjeta de adquisición de datos, la cual se encarga de digitalizar la señal, realizando para ello, un muestreo discreto de la señal analógica proveniente del acondicionamiento de señal, y de introducirla al computador donde se realizan diferentes tipos de procesamiento para obtener toda la información que se requiere para el análisis y monitoreo de las vibraciones de las máquinas [16].



Figura 4.1: Sistema de monitoreo y control de vibración en computadora, a través de una tarjeta de adquisición de datos, acondicionamiento de señal y transductores.

Ruido del sistema

Idealmente, una señal que es digitalizada y entregada por un instrumento virtual es la misma señal que es ingresada al instrumento. Frecuentemente se pueden atribuir las diferencias entre las señales de entrada y salida al ruido del sistema, el cual proviene de un diverso número de fuentes, incluyendo el medio ambiente y el instrumento mismo [17].

El diseño de un instrumento virtual requiere que se comprenda como el ruido puede afectar la adquisición de datos, el diseño del hardware y el medio ambiente.

Si no se entienden las preocupaciones relativas tales como la interferencia electromagnética (EMI), manejo de la fuente de potencia, puesta a tierra, la configuración electrónica, etc., entonces no se puede diseñar un instrumento que sea exacto dentro de un medio ambiente eléctricamente ruidoso [18]. Para conseguir determinar el ruido en un sistema con instrumentación virtual, se debe seguir los siguientes pasos:

- Primeramente se deben poner a tierra las entradas del instrumento y medir cualquier señal de ruido remanente.
- Seleccione un canal de entrada del instrumento y conecte las entradas positivas y negativas a la tierra del mismo. Se deberán conectar las entradas del conector del instrumento tan cerca del conector como sea posible a fin de reducir cualquier acoplamiento de ruido externo sobre la conexión.
- Configure el instrumento para adquirir un millón o más de datos a la deseada velocidad de muestreo. Repase sólo los códigos binarios entregados por el instrumento.

- Ahora cuente cada vez que ocurre un código binario y coloque la información en un histograma. Para un instrumento de 16 bits, su histograma posee 216 intervalos y cada intervalo contiene la cantidad de veces que fue contado el código binario en particular.
- Luego se deberá normalizar los datos adquiridos. Debido a que el instrumento no es ideal, se deberán buscar las desviaciones de los datos con respecto al cero. Para normalizar los datos se debe dividir el número de ocurrencias en cada intervalo por el número total de muestras adquiridas. Esto provee un valor normalizado que representa la probabilidad de ocurrencia de un código en particular.
- Para determinar el peor ruido, se debe encontrar el código que posea la mayor probabilidad y compararlo con el código que se halle más lejos y posea la menor probabilidad. La diferencia entre los dos en LSBs es el mayor ruido del instrumento.

Inexactitud absoluta

La inexactitud absoluta de un instrumento virtual es la máxima diferencia entre el valor medido entregado por el instrumento y el valor real aplicado en su entrada.

Típicamente, un fabricante provee información de la exactitud absoluta para cada rango de entradas y modos que el instrumento puede manejar.

Las tablas de exactitud absoluta a menudo incluyen información de la exactitud basadas en el período transcurrido desde la última calibración del instrumento. Esta variación de la exactitud con el transcurso del tiempo se debe a la desgaste de los componentes electrónicos que constituyen el instrumento.

Para tener en cuenta este desgaste, se debe calibrar el instrumento a intervalos de tiempo determinados siguiendo un cronograma de actividades.

Exactitud absoluta

Las especificaciones de exactitud absolutas ayudan a determinar la incertidumbre general de las mediciones. La habilidad del instrumento para medir con exactitud una magnitud física varía

con una serie de factores, tales como: tiempo en servicio, temperatura, humedad, exposición al medio ambiente y abuso. Para verificar la exactitud absoluta de un instrumento virtual, se deben seguir los siguientes pasos:

- Utilice la tabla de exactitud absoluta proporcionada por el fabricante y calcule la exactitud para una entrada en particular. En muchos casos, se eligen puntos de ensayo cerca de los fondos de escala negativos y positivos del rango de entrada así como también el cero.
- Utilice una fuente de precisión y entre el valor a ensayar al instrumento.
- Compare las mediciones del instrumento con la exactitud calculada en el primer paso. Un instrumento diseñado adecuadamente que se halla calibrado provee resultados de mediciones que cumplen con las especificaciones de exactitud absoluta publicadas por el fabricante.

4.3 Calibración de instrumentos virtuales

La calibración cuantifica la incertidumbre en la medición comparando las mediciones con una norma conocida. Esto verifica que el instrumento se halla operando dentro de especificaciones establecidas.

Durante algún tiempo los usuarios comprendieron la necesidad de calibrar instrumentos tradicionales. Los mismos principios se aplican a mediciones realizadas con computadoras. Se deberían seleccionar instrumentos virtuales que provean herramientas para realizar tanto calibraciones internas (conocidas como auto-calibraciones), como calibraciones externas.

Las opciones de calibración externa e interna ofrecen dos beneficios diferentes: con la calibración externa se puede asegurar que la exactitud de la medición está sujeta a una norma conocida. Con la calibración interna, se puede ajustar el instrumento para ser utilizado en medios ambientes diferentes a los cuales se realizó la calibración externa.

La **calibración externa** requiere el uso de fuentes de alta precisión, también conocidas como patrones. Durante una calibración externa, las constantes de calibración a bordo y las referencias se ajustan con respecto a las constantes patrón externas. La calibración externa se reserva a laboratorios de metrología u otras instituciones que mantengan normas verificables. Una vez que

se completó la calibración externa, las nuevas constantes de calibración se almacenan en un área protegida de la memoria de los instrumentos y no pueden ser modificadas por el usuario. Esto protege la integridad de la calibración de la adulteración.

Debido a que la **calibración interna** no se basa en patrones externos, es un método mucho más simple. Con la calibración interna, las constantes de calibración del instrumento se ajustan con respecto a referencias precisas existentes en el mismo. Luego de que se calibró externamente el instrumento y colocado en un medio ambiente donde las variables externas, tales como temperatura, difieren de las del medio ambiente original, se puede utilizar este tipo de calibración. Finalmente, a diferencia de la calibración externa, se puede realizar una calibración interna en cualquier momento utilizando funciones del software que son provistas con el manejador de la placa del instrumento.

5 Equipo medidor desarrollado

5.1 Descripción general del equipo

El equipo de instrumentación virtual desarrollado se puede describir a partir de los elementos y variables que intervienen durante una prueba en el laboratorio de ensayos, como se muestra en la figura 5.1 los elementos principales son: el CMBS, el tablero de alimentación, la piscina, la tubería, equipos de medición de presión y caudal, y el dispositivo de medición de la velocidad desarrollado.

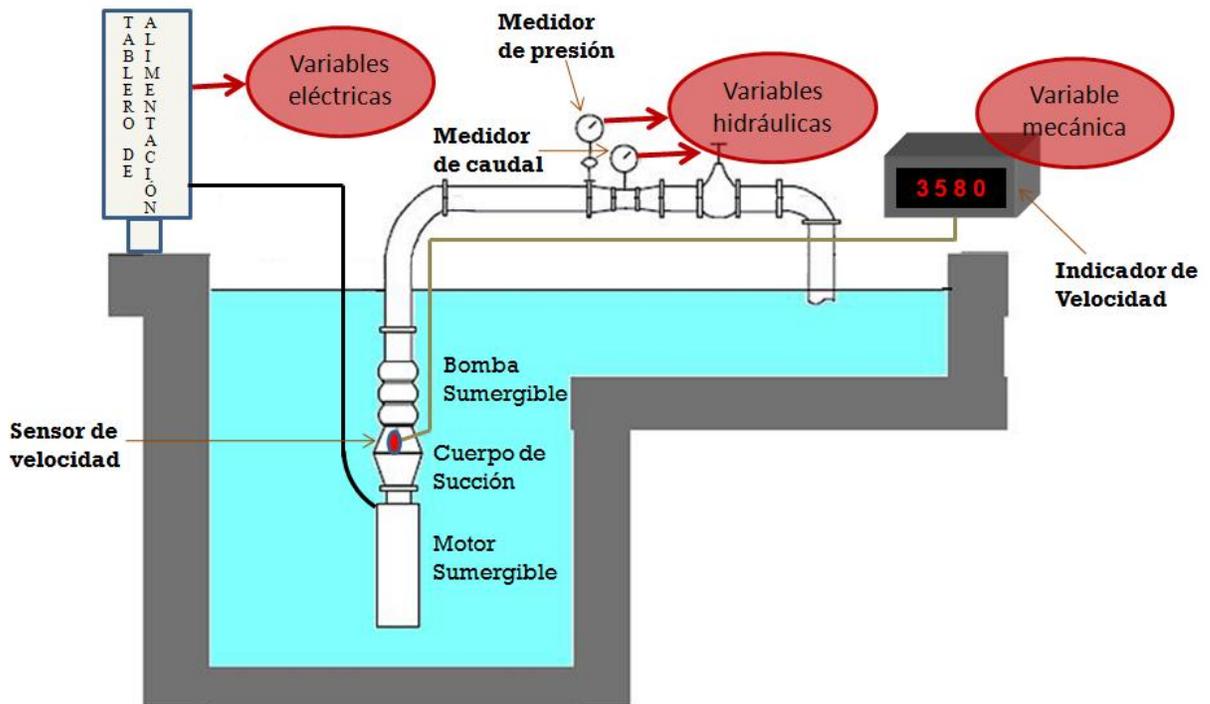


Figura 5.1: Esquema general del monitoreo de las variables que intervienen durante una prueba en piscina.

Como se observa en la figura 5.2, el instrumento virtual del equipo puede ser descrito en tres etapas:

1. Sensado. Incluye la etapa de acondicionamiento de señales
2. Adquisición de datos
3. Procesamiento de la señal

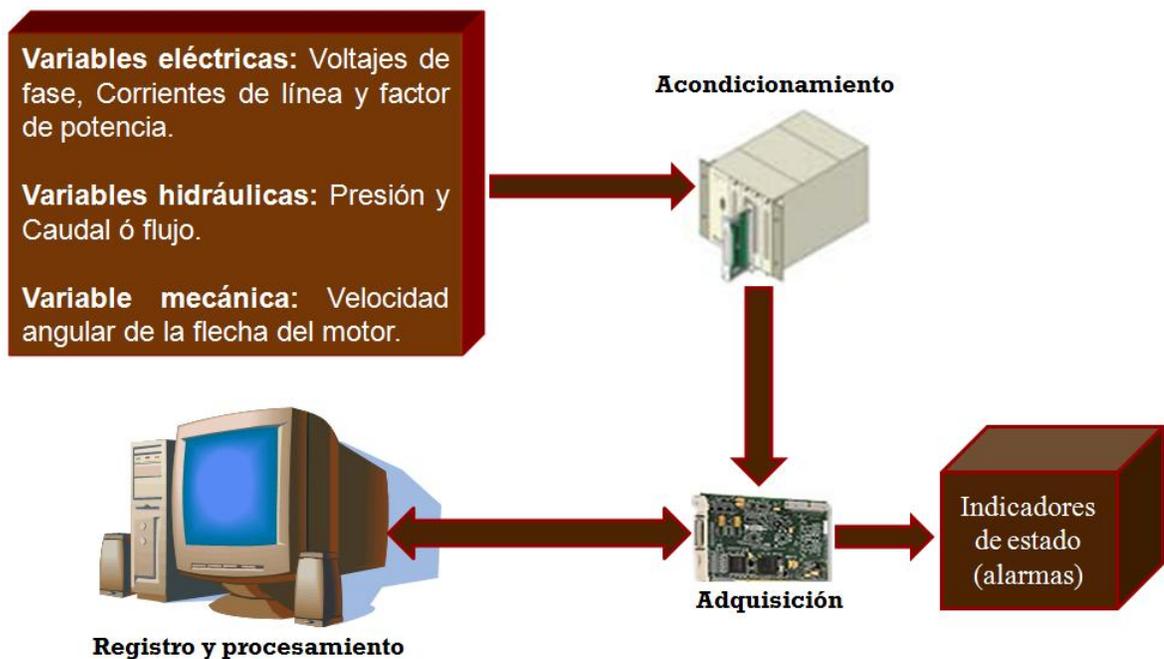


Figura 5.2: Descripción general del equipo de instrumentación virtual.

5.2 Diseño del equipo

En la sección 2.2 se mencionan las variables permitidas y los límites de oscilación. Las variables eléctricas, hidráulicas y mecánicas que deben ser monitoreadas para determinar la eficiencia del CMBS y garantizar su buen funcionamiento son: voltajes de fase, corrientes de línea, factor de potencia, presión, caudal ó flujo de agua y la velocidad angular del motor. A continuación se describe separadamente el proceso de sensado y acondicionamiento para cada variable.

Monitoreo de las variables eléctricas

a) Voltaje

El termino voltaje definido en la sección 2.1 como tensión eléctrica, se mide directamente del tablero de alimentación mediante terminales tipo caimán conectadas a cada línea de alimentación conocidas como línea A, línea B y línea C. El cable empleado para medir el voltaje directamente sobre el tablero es de 4 hilos, calibre 16, de uso rudo para exteriores (recubrimiento especial contra humedad).

Como se observa en la figura 5.3, las señales de voltaje en el tablero de alimentación trifásico están desfasadas 120 una respecto de la otra, y ciertamente puede llegar a tener una amplitud considerable cercana a $500 V_{RMS}$ (RMS son las primeras letras de las palabras inglesas Root Mean Square [19]). Por lo anterior se requiere acondicionar las señales para ser introducidas a una tarjeta de adquisición cuyo voltaje máximo es $\pm 10 V$.

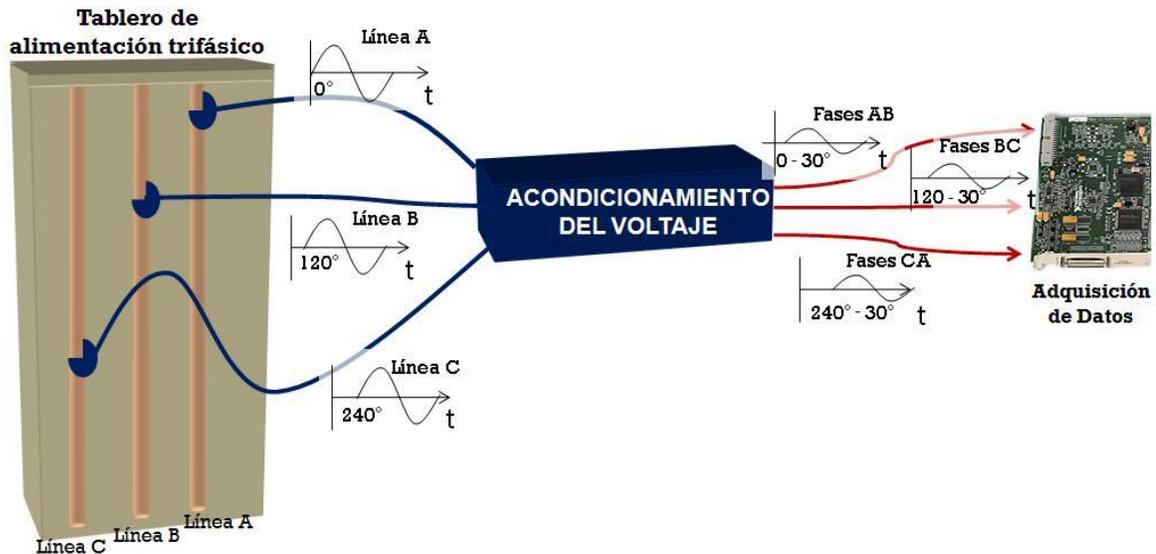


Figura 5.3: Esquema general del proceso de sensado de voltajes trifásicos sobre el tablero de alimentación.

Como los voltajes trifásicos suministrados a un motor pueden variar entre $240 V_{RMS}$ y $440 V_{RMS}$ dependiendo el tipo de conexión del motor (delta o estrella), se pensó en el uso de tres transformadores de relación de transformación 70/1 voltios y capacidad máxima 20 VA conectados como se muestra en la figura 5.4, de manera que cuando a la entrada del transformador (lado de

alta) se tengan por ejemplo $440 V_{RMS}$, a su salida (lado de baja) se tendrán aproximadamente $6.3 V_{RMS}$, que serán introducidos sin ningún problema a la tarjeta de adquisición.

Cabe mencionar que debido a que no se cuenta con un Neutro físico en la alimentación al motor (generalmente así sucede), se realiza una conexión delta-estrella entre transformadores como se observa en la figura 5.4, la conexión empleada modifica la fase de la señal original [20], es decir; el voltaje de línea que se mide a la entrada de los transformadores se modifica a su salida por voltaje de fase ó línea-neutro de acuerdo con

$$V_{linea} = [\sqrt{3} \cdot V_{fase}]_{(\theta-30)}. \quad (5.1)$$

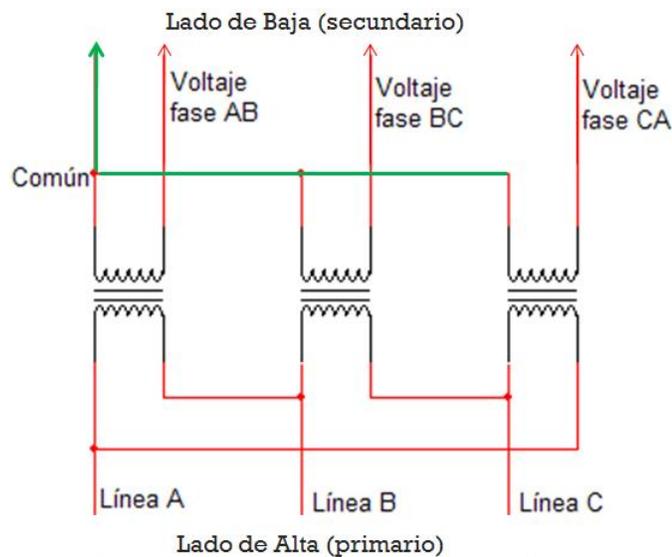


Figura 5.4: Diagrama de conexión de los transformadores que acondicionan las señales de voltajes.

b) Corriente

Para sensar las corrientes senoidales que se presentan al accionar el motor, se determina primeramente el parámetro máximo de corrientes a medir durante una prueba, considerando que el motor más grande que comercialmente se fabrica en las empresas mencionadas en la sección 1.1 es 300 Hp ($223.8 kW$), además se emplea una conexión estrella $440 V$ con factor de potencia bajo 0.8 (fuera de la Norma) para este tipo de motores, al despejar la corriente I de la ecuación de potencia de entrada de la ecuación 2.2 se obtienen $337 A$.

Para medir corrientes de magnitudes de 10 a 400 A, se emplean tres transformadores de corriente o donas de corriente como transductores, cuyo principio de transformación es similar al de los transformadores de voltaje, sólo que la relación de transformación empleada es 100/1 amperios y capacidad máxima de 10 VA, de tal manera que 337 A se transforman a 3.37 A a la salida de la dona. En la figura 5.5 se presenta un esquema de conexión y colocación de las donas en el tablero de alimentación, donde se puede apreciar como línea de alimentación pasa a través de la dona transductora.

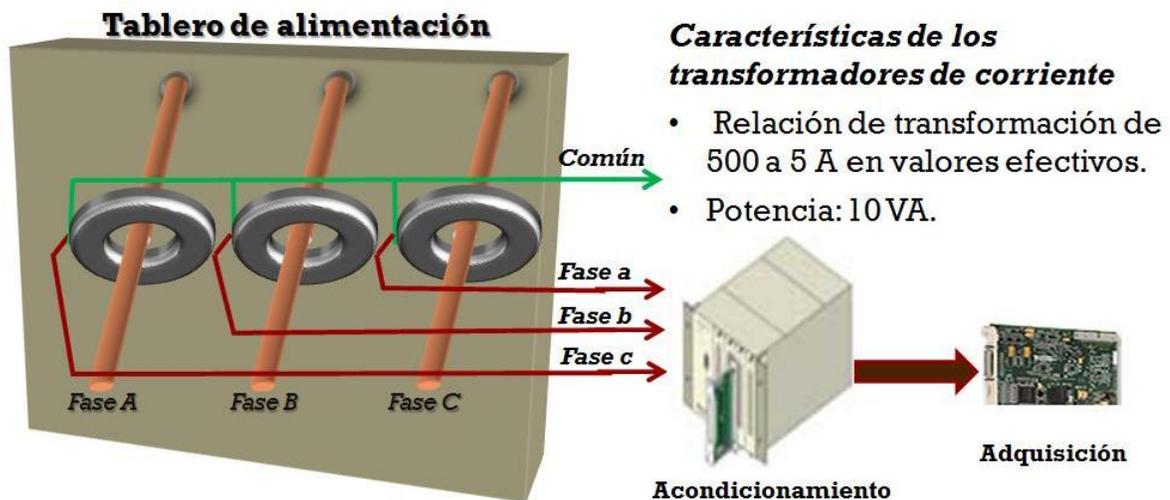


Figura 5.5: Diagrama de conexión de las donas de transductoras que acondicionan las señales de corriente.

Ciertamente las señales a la salida de las donas transductoras, son señales de corriente aún elevadas que requieren ser convertidas a voltajes antes de introducirse a la tarjeta de adquisición, para ello se realiza el acondicionamiento de las señales empleando una resistencia en paralelo, es decir; entre la línea de salida de la dona y el común ó tierra como se muestra en la figura 5.6. De esa manera se determina la corriente a partir del sensado de un voltaje en las terminales de la resistencia.

Comercialmente se seleccionó una resistencia de 1 Ohm a 10 Watts. Ya que la dona de corriente proporciona una corriente máxima de salida de 3.37A, para una resistencia de 1 Ohm se obtiene una potencia de 11.34 Watts de acuerdo con

$$P = I^2 R. \quad (5.2)$$

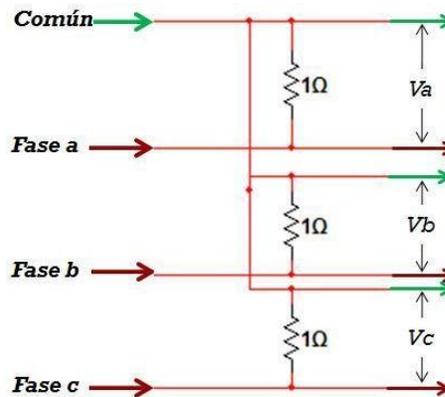


Figura 5.6: Diagrama de conexión de las donas de transductoras que acondicionan las señales de corriente.

Usando la Ley Ohm $V = IR$, al sustituir el valor de resistencia mencionado de 1 Ohm y la corriente máxima de 3.37 A, el voltaje que se registra en las terminales de la resistencia es de 3.37 V, lo cual es lógicamente aceptable para introducirse en la tarjeta de adquisición. Es importante mencionar que como se trata de señales alternas, siempre que se hable en esta sección de la medición de señales, se hace referencia a señales de amplitud positiva y negativa durante.

c) Factor de Potencia

El factor de potencia es uno de los parámetros más críticos en cuanto a las mediciones eléctricas que se realizan, en la sección 2.1 se menciona una definición perteneciente a la Norma del factor de potencia, aunque no establece como medirlo. Una de las técnicas más empleadas para determinar el factor de potencia, es registrando las variaciones de las señales de voltaje y corriente en el tiempo, luego entonces se define el factor de potencia como el desfase entre el voltaje y la corriente [21].

El desfase entre señales puede ocurrir cuando el voltaje adelanta a la corriente tratándose de un circuito capacitivo, cuando la corriente adelanta al voltaje se habla de un circuito inductivo, y cuando se esta en fase (sin desfase) se trata de un circuito netamente resistivo [22]. El motor trifásico jaula de ardilla usado en el CMBS es considerado como un circuito mayormente inductivo [23], el cual presenta un adelanto de la señal de corriente con respecto a la señal de voltaje (ver figura 5.7), y se identifica al factor de potencia como el $\cos(\theta)$, donde θ es la diferencia entre

la fase de la señal de voltaje de línea θ_{V_a} y la fase de la señal de corriente θ_{I_a} ,

$$fp = \cos(\theta). \quad (5.3)$$

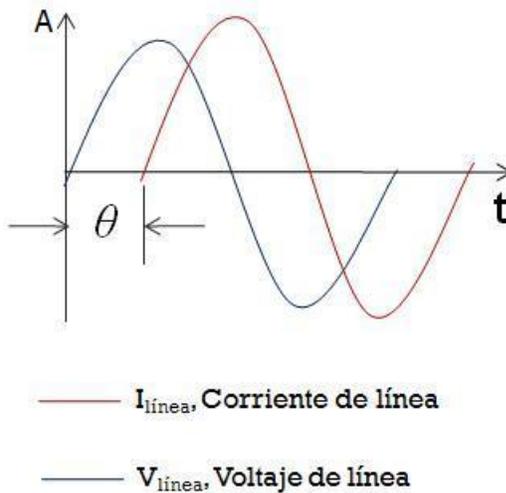


Figura 5.7: Variación de las señales de corriente y voltaje en el tiempo.

Cálculo del factor de potencia con armónicos.

Por otro lado la medición de potencia en redes eléctricas presenta nuevos desafíos en la comprensión del cálculo al enfrentar redes con presencia de armónicas de tensión y corriente. La dificultad principal ocurre cuando los parámetros calculados son interpretados, como si pertenecieran a una red en condiciones de régimen sinusoidal, cuando las condiciones reales se apartan ampliamente de esa hipótesis.

La IEEE Std. 1459-2000 define la medición de potencia en sistemas eléctricos en régimen sinusoidal, no sinusoidal, balanceado y no balanceado. La IEC adopta al igual que la IEEE la definición de Budeanu para la potencia en régimen no sinusoidal.

Los conceptos iniciales de potencia activa y reactiva, son fundamentalmente expresados en condiciones de régimen sinusoidal puro, por lo tanto las expresiones de cálculo llevan al conocido triángulo rectángulo de potencias mostrado en la figura 5.8.

A partir de esto se definen también el factor de potencia y $\cos(\phi)$, que solo en esta condición numéricamente coinciden.

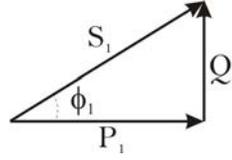


Figura 5.8: Triángulo de potencias para una señal senoidal sin armónicos.

Recordando ambos conceptos, el $\cos(\phi)$, es (trigonométricamente) el cociente entre la potencia activa fundamental y la potencia aparente fundamental. En cambio, el factor de potencia es el mismo cociente, pero de la potencia total activa y la total aparente.

$$\cos(\phi) = \frac{P_1}{S_1}, \quad (5.4)$$

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P_1}{S_1}. \quad (5.5)$$

La presencia de armónicos en tensión y corriente provoca una adición de potencia activa y reactiva armónica en el triángulo de potencias, de acuerdo con la ecuación 5.7.

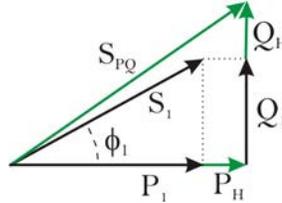


Figura 5.9: Triángulo de potencias para una señal senoidal con presencia de armónicos.

A continuación la expresión de potencia activa se desglosa en la suma de la potencia activa fundamental más el aporte de potencia activa de cada armónico. Con el mismo razonamiento expresamos la potencia reactiva con la suma de su componente fundamental y sus componentes reactivas armónicas. Ambas expresiones pertenecen a la definición de Budeanu que ha sido considerada por la IEEE y la IEC [24].

$$P_{ACTIVA} = \int P_{(t)} dt + \int \mu_{(t)} * i_{(t)} dt \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} P_{ACTIVA} &= \sum V_h * I_h * \cos(\theta_h - \alpha_h) & Q_{REACTIVA} &= \sum V_h * I_h * \text{sen}(\theta_h - \alpha_h) \\ P_{ACTIVA} &= P_1 + \sum V_h * I_h * \cos(\theta_h - \alpha_h) & Q_{REACTIVA} &= Q_1 + \sum V_h * I_h * \text{sen}(\theta_h - \alpha_h) \\ P_{ACTIVA} &= P_1 + P_H & Q_{REACTIVA} &= Q_1 + Q_H \end{aligned}$$

A partir de la figura 5.9 vemos que la definición de factor de potencia no coincidirá con la del $\cos(\phi)$.

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{S}, \quad (5.7)$$

entonces;

$$fp = \frac{P_1 + P_H}{S} \neq \frac{P_1}{S},$$

por lo tanto;

$$fp \neq \cos(\phi).$$

A continuación expresamos la potencia aparente total a partir de la aparente fundamental y la distorsión total armónica, de tensión, THD_V y corriente THD_I [25],

$$\begin{aligned} S &= V_{RMS} * I_{RMS}, \\ S &= V_1 * \sqrt{1 + THD_V^2} * I_1 * \sqrt{1 + THD_I^2}, \\ S &= S_1 * \sqrt{1 + THD_V^2} * \sqrt{1 + THD_I^2}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Desde otro punto de vista también expresamos la potencia aparente mediante las componentes fundamentales y armónicas agrupadas de tensión y corriente como

$$\begin{aligned} S^2 &= (V_1^2 + V_H^2) * (I_1^2 + I_H^2), \\ S^2 &= S_1^2 + (V_1^2 * I_H^2) + (V_H^2 * I_1^2) + (V_H^2 * I_H^2), \\ S &= S_1^2 + S_N^2. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Combinando las últimas expresiones 5.7, 5.8 y 5.9 llegamos a la conclusión que el factor de potencia incluye al coseno(ϕ) y queda afectado por un factor menor a la unidad. Por lo tanto se comprueba que siempre que existan armónicas en el sistema, el factor de potencia será menor que el coseno(ϕ).

$$fp = \frac{P_1 + P_H}{S} \rightarrow fp = \frac{P_1 * (1 + \frac{P_H}{P_1})}{S_1 * \sqrt{(1 + (\frac{S_N}{S_1})^2)}}$$

$$fp = \cos(\phi) * \left(1 + \frac{P_H}{P_1}\right) * \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2 + THD_I^2 + THD_V^2 * THD_I^2}}. \quad (5.10)$$

Teniendo en cuenta los niveles despreciables de P_H frente a P_1 y que generalmente $THD_V \ll THD_I$, obtenemos la siguiente expresión. De igual manera que la expresión anterior, el factor de potencia aproximado será siempre menor que el $\cos(\phi)$ [26],

$$fp = \cos(\phi) * \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}}. \quad (5.11)$$

Como se observa en la figura 5.10, para un sistema trifásico donde se presenta el factor de potencia como la diferencia de fase entre voltajes de fase $\theta_{V_{fase}}$ y corrientes de línea $\theta_{I_{línea}}$ y recordando la existencia de armónicos que incluye la ecuación 5.11, para el sistema trifásico se tendrá

$$fp_{3\phi} = \frac{fp_a + fp_b + fp_c}{3}. \quad (5.12)$$

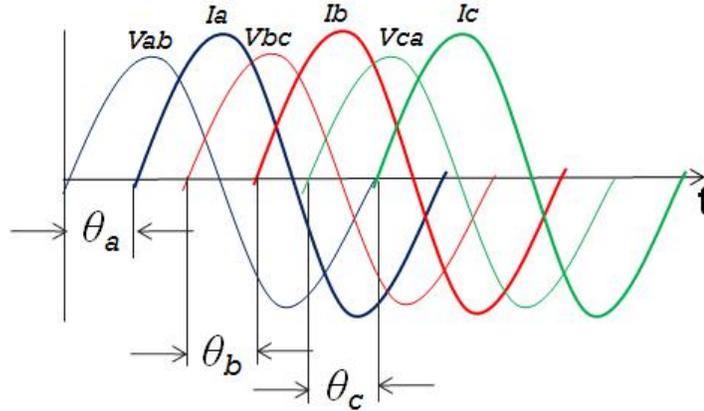


Figura 5.10: Relaciones de fase entre las señales trifásicas de voltaje y corriente.

Finalmente con el factor de potencia de la expresión 5.11, los voltajes y corrientes determinados anteriormente, se puede calcular la potencia de entrada 2.2, la cual puede reescribirse como $P_{ent} = V_{línea} I_{línea} fp$. Para un sistema trifásico balanceado se tendrá

$$V_{fase} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad \text{y} \quad I_{línea} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad \text{entonces;}$$

$$P_{ent} = V_{línea} I_{línea} fp_{3\phi}.$$

Finalmente recordando la relación 5.1 para el voltaje de línea se obtiene

$$P_{ent} = \sqrt{3}(V_{fase}I_{linea}f p_{3\theta}) \quad (5.13)$$

Monitoreo de las variables hidráulicas

a) Carga de bombeo

La diferencia de presión se determina con un medidor llamado manómetro, el cual mide la presión relativa dentro de la tubería. El parámetro hidráulico de interés señalado en la sección 2.2 es la carga total de bombeo, que se obtiene de la ecuación de Bernoulli dada por

$$P = \rho g H, \quad (5.14)$$

donde:

- P Presión en la tubería, en *Pascales*;
- ρ Densidad del agua bombeada, en kg/m^3 ;
- g Aceleración de la gravedad, en m/s^2 ;
- H Carga total de bombeo, en m.

Un manómetro digital comercial empleado para determinar la presión en la tubería, entrega por lo general como salida en un display la presión en kilopascales (*kPa*), libras por pulgada cuadrada (*psi*) ó metros columna de agua (*mca*), sin embargo también presenta una salida analógica que puede estar en miliamperios (*mA*), milivoltios (*mV*) ó voltios (*V*). Para el caso de los laboratorios de pruebas del CMBS que cuenten con un transductor de presión con salida 4 a 20 *mA*, el sistema contempla una etapa de acondicionamiento de la señal. Como se muestra en la figura 5.11a se coloca una resistencia en paralelo calculada para obtener un voltaje en las terminales de entre 1.88 *V* (4 *mA*) y 9.4 *V* (20 *mA*).

En general los manómetros digitales presentan una linealidad en la respuesta de salida. Cuando se trata de una salida analógica de 4 a 20*mA* se establece la ecuación de la recta que relaciona la corriente con la presión en la tubería. De acuerdo a la gráfica mostrada en la figura 5.11b para un equipo comercial la presión esta dada por

$$P = 0.625I - 2.5, \quad (5.15)$$

donde:

- P Presión en la tubería, en *kPa*;
- I Corriente de salida del manómetro, en *mA*.

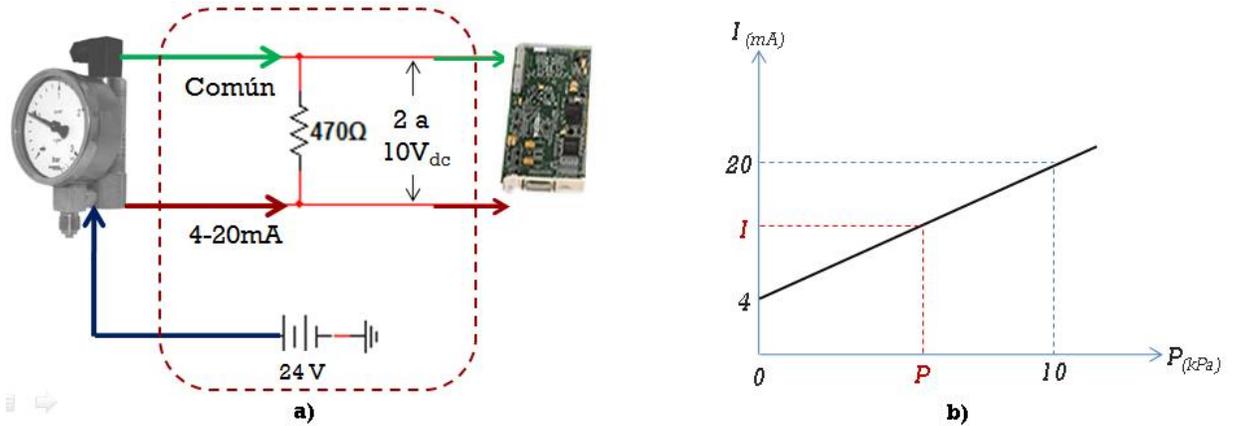


Figura 5.11: a) Acondicionamiento de la señal a la salida del manómetro para poder leerla por con la tarjeta de adquisición y b) Gráfica que relaciona la presión con la corriente a la salida de un manómetro digital.

b) Caudal

El caudal también conocido como flujo de agua ó gasto volumétrico, se determina al igual que la carga de bombeo a partir de la señal analógica generada por el instrumento de medición comúnmente llamado flujómetro ó caudalímetro. El sistema desarrollado esta pensando en una laboratorio de pruebas con la capacidad de probar equipos de hasta 300 HP y 200 lt/s . Aunque ciertamente no depende de la capacidad del instrumento de medición sino de la salida analógica que éste tenga. Tomando como referencia un equipo comercial de los más empleados en los laboratorios de pruebas del CMBS de gran capacidad, donde se tiene una señal a la salida del equipo de 4 a 20 mA para medir 0 a 200 lt/s respectivamente.

Como se muestra en la figura 5.12a nuevamente se coloca una resistencia en paralelo calculada por Ley de Ohm para obtener un voltaje en las terminales de entre 1.88 V (4 mA) y 9.4 V (20 mA), que son valores de tensión aceptables para ser introducidos a la tarjeta de adquisición.

De igual manera un flujómetro comercial presenta linealidad en la respuesta de salida. Cuando se trata de una salida analógica de 4 a 20 mA se establece la ecuación de la recta que relaciona la corriente con la presión en la tubería. De acuerdo a la gráfica mostrada en la figura 5.12b para un equipo comercial el caudal esta dado por

$$Q = 12.5I - 50, \quad (5.16)$$

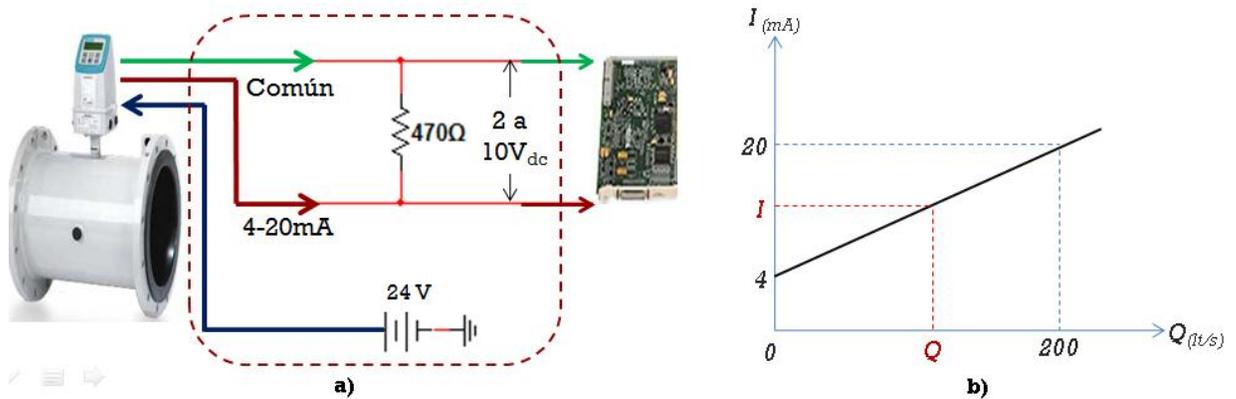


Figura 5.12: a) Acondicionamiento de la señal a la salida del flujómetro para poder leerla por con la tarjeta de adquisición y b) Gráfica que relaciona el caudal con la corriente a la salida de un flujómetro digital.

donde: Q Caudal ó Flujo de agua en la tubería, en lt/s ;
 I Corriente de salida del flujómetro, en mA .

Monitoreo de la variable mecánica

Equipo de medición de la velocidad empleado actualmente.

En la actualidad la estimación de la velocidad de un motor resulta ser indispensable para la elaboración de curvas características del conjunto motor-bomba. Tratándose de bombas sumergibles de pozo profundo se ha encontrado que las normas contemplan una tolerancia de ± 18 rpm en su toma de lecturas, y que los equipos industrialmente fabricados para esta aplicación presentan una resolución de 100 rpm. El conocer con exactitud la magnitud de la velocidad puede ayudar a prevenir fallas severas en el motor de una bomba a través de su monitoreo constante, determinar las curvas características de una bomba de forma real y no estimativa, además de conocer más a detalle el fenómeno eléctrico hidráulico que se presenta en un sistema de bombeo para la mejora en el diseño [27].

Observando los equipos comercialmente existentes para medir la velocidad como lo son; el tacómetro de indicación directa, el contador de revoluciones en un intervalo de tiempo, el dínamo, el contador óptico, el frecuencímetro y el estroboscopio, todos están limitados a aplicaciones donde el rotor o flecha del motor sea de fácil alcance y manipulación, donde las condiciones ambientales

no influyan o alteren en la medición. Los instrumentos existentes en el mercado para medir la frecuencia de rotación de manera directa en el conjunto motor-bomba no existen comercialmente, la razón se debe a que dicho conjunto no está diseñado para colocar algún dispositivo o ser modificado en su interior (poco espacio), otro factor es la enorme perturbación originada por el movimiento del agua, presentada en el único punto visible de la flecha del motor (entrada), y el factor más importante es la profundidad a la que se encuentra la bomba sumergible de la superficie del agua, la cual puede llegar a ser de 500m.

El equipo de medición que comúnmente se utiliza para estimar la frecuencia de rotación del motor de una bomba sumergible, se basa en aprovechar la transmisión de vibraciones a lo largo de la tubería conectada a la bomba, las cuales son captadas por un equipo cuyo principio de funcionamiento es mecánico. Técnicamente consiste de un conjunto de lenguetas calibradas cuidadosamente, las cuales responden a las frecuencias de vibración. Este conjunto de lenguetas está contenido en una caja rectangular metálica con una escala de 2 hileras de lenguetas como se observa en la figura 5.13.



Figura 5.13: Medición indirecta de la velocidad del motor mediante un tacómetro de lenguetas vibratorias.

El tacómetro de lenguetas vibratorias es ideal para medir de forma estimativa la velocidad en toda clase de equipo eléctrico, centrifugadoras, turbinas o cualquier máquina que tenga una sola pieza rotativa.

La resolución del tacómetro de lenguetas es baja de alrededor de 100rpm para velocidades cercanas a 3600rpm, además es muy impreciso pues es susceptible a las perturbaciones del agua,

es decir; durante la prueba en laboratorio del conjunto motor-bomba la toma de lectura de las RPM muestra una oscilación de varias lengetas dificultando su interpretación con precisión, además el equipo se descalibra rápidamente por el ambiente y el uso frecuente, y aunque es económico requiere en todo momento de un operador para la interpretación de la lectura.

Dispositivo propuesto para la medición de la velocidad.

En la figura 5.14 se muestra un esquema general del proceso de medición de la velocidad del motor desarrollado como parte del equipo de instrumentación virtual. Se puede observar como el dispositivo encargado de sensar la velocidad es sumergible. pues es acoplado directamente al cuerpo de succión del CMBS. El sensor genera pulsos cuadrados de voltaje y se conducen a través de un cableado hasta la superficie del agua, donde se introduce a la tarjeta de adquisición para ser digitalizada y procesada por el software del equipo, el instrumento virtual.

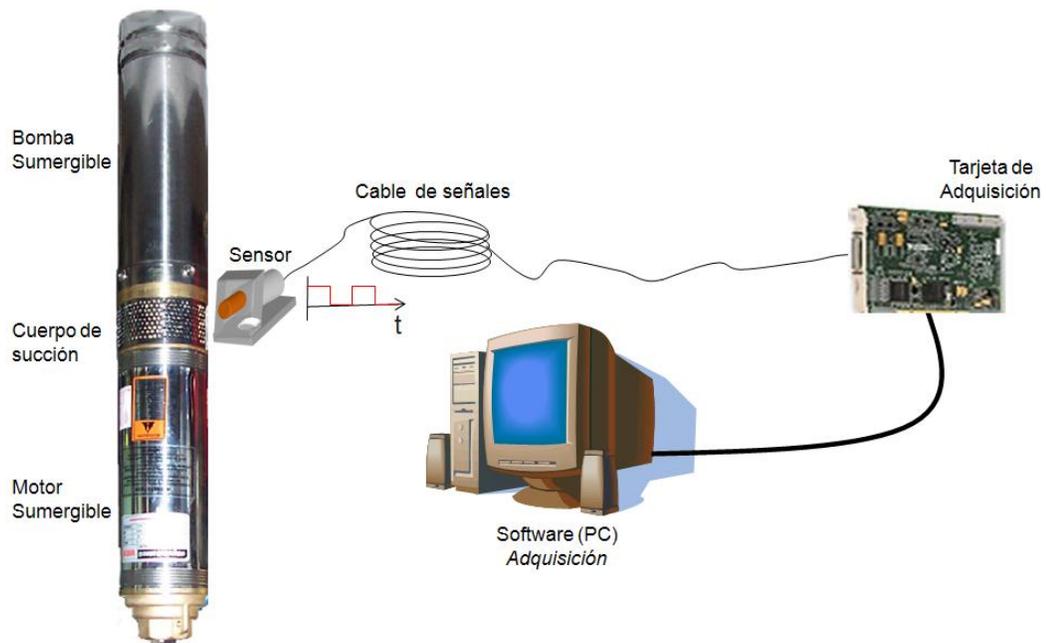


Figura 5.14: Descripción general del proceso de medición de la velocidad.

5.3 Desarrollo del equipo

El equipo de instrumentación virtual para automatizar el laboratorio de ensayos del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo se desarrollo en varias etapas, las cuales se describen brevemente a continuación:

1. **Tablero de simulación.** Se construyó físicamente un tablero simulador del proceso de prueba de un laboratorio de ensayos del CMBS, donde se simulaban los voltajes, las corrientes, la presión y el caudal con potenciómetros insertados en el tablero, las señales de voltaje existentes en los potenciómetros se leen por un tarjeta de adquisición NI USB-6212 tipo Chasis, y finalmente se procesan por una versión inicial del programa.
2. **Desarrollo del Gabinete y componentes (*equipo versión 1*).** Se desarrollo un equipo de instrumentación virtual que permitía el monitoreo de las variables eléctricas y su almacenamiento en una base de datos. El equipo fue probado con varios motores de distinta potencia y bajo diferentes condiciones de carga mediante un freno electromagnético.
3. **Desarrollo del dispositivo de medición de la velocidad.** Conjuntamente con el paso anterior se trabajo en el desarrollo del dispositivo de medición de velocidad. Se realizo el diseño y fabricación de la montura, el programa contador de pulsos y la integración del sensor al equipo.
4. **Mejora de Gabinete, componentes y medidor de velocidad (*equipo versión 2*).** Se realizó la mejora en los transductores de voltaje y corriente para darle un aspecto profesional de mayor seguridad, se cambio la tarjeta de adquisición por la NI USB-6211 de reducido tamaño y se integró la lectura de la velocidad modificando el programa del equipo de version 1, para lograr realizar un monitoreo simultaneo de las variables eléctricas y la variable mecánica.
5. **Automatización del laboratorio de ensayos (*equipo versión 3*).** Se integraron al proceso de monitoreo del paso anterior las variables hidráulicas y se insertaron elementos de seguridad como indicadores para el control del proceso de prueba, con lo que se obtuvo la automatización del laboratorio de ensayos del CMBS.

El gabinete y sus componentes

Una de las partes principales del equipo es el gabinete ó tablero de control, como se observa en la figura 5.15 el gabinete esta conformado por 3 transformadores, la tarjeta de adquisición, un circuito impreso donde se realiza el acondicionamiento de señales hidráulicas, y los rieles donde se protege el cableado, es importante señalar que todo el cableado se encuentra perfectamente identificado, dándole al gabinete un aspecto profesional.



Figura 5.15: Imagen que muestra los elementos principales al interior del gabinete.

El equipo esta pensado en la posibilidad de ser calibrado, haciéndolo fácilmente desmontable y transportable, para ello se adecuó en la parte superior del gabinete 4 conectores hembra donde conectan y desconectan los sensores, al igual que el cable de comunicación hacia la computadora.

En la figura 5.16 se presenta un diagrama general de las conexiones principales y elementos que conforman el gabinete, detallando el nombre asignado para cada cable encontrado en el tablero,

la conexión entre transformadores el circuito de acoplamiento de señales, la tarjeta de adquisición y las indicadores de alarma (A1, A2, A3 y A4).

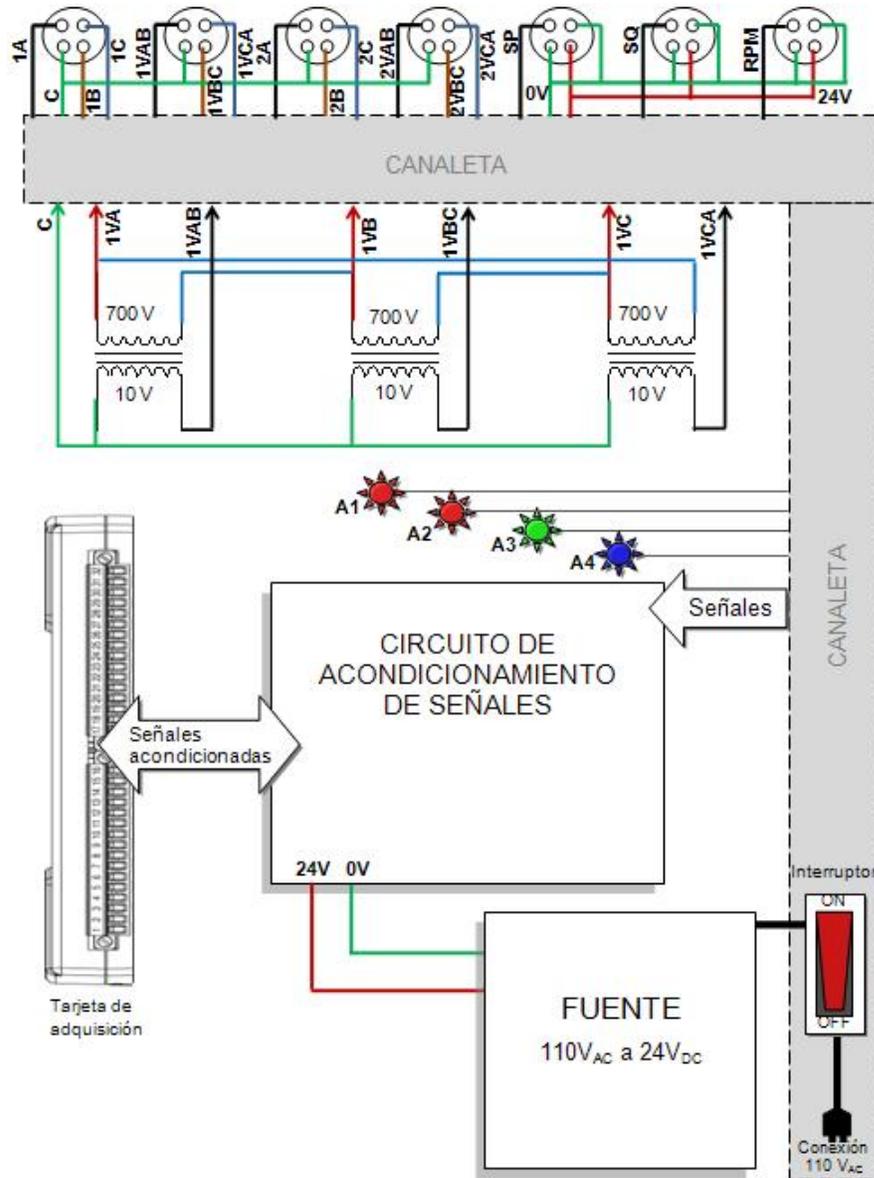


Figura 5.16: Diagrama de conexiones visibles dentro del gabinete.

Para identificar la función de algún cableado, por ejemplo en los conectores hembra de la tapa superior del gabinete, observando la leyenda el primer número hace referencia al tablero 1 (220V) y un 2 (440V), como se explicará más adelante en las conexiones a la entrada de la tarjeta.

En la figura 5.17 se muestra una fotografía de las primeras pruebas realizadas en el recientemente equipado laboratorio de procesos del CIO, donde se observan algunos de los elementos que acompañan al gabinete, como son: cables conector macho enchufados sobre el mismo gabinete, en el arrancador del motor sumergible se tienen los conectores tipo caimán para el sensado del voltajes y las donas transductoras de corriente, montado sobre el cuerpo de succión del motor el dispositivo sensor de velocidad, a su derecha un equipo medidor de velocidad llamado pulsómetro y la tarjeta de adquisición tipo chasis con que se contaba inicialmente.



Figura 5.17: Imagen del equipo durante una prueba, donde se muestran los elementos principales conectados al gabinete.

El dispositivo sensor de la velocidad

Con la finalidad de mejorar la resolución y la precisión, disminuir las oscilaciones en las lecturas y principalmente realizar la adquisición simultánea de la velocidad con las demás variables, se pensó en un dispositivo de acoplamiento directo de bajo costo e inmune a las perturbaciones del agua. Se implementó un *sensor inductivo* sellado herméticamente y cableado con protección IP67 (contra ambientes duros e inmerso constantemente en el agua). Una de las características más importantes del sensor inductivo utilizado es la distancia de sensado de $2.5\text{mm} \pm 10\%$.

Para poderlo montar en cualquier motor se diseñó una montura primeramente en aluminio como se observa en la figura 5.18a, la cual permite realizar dos ajustes: profundidad y altura

del sensor, con lo que se garantiza el poder instalar el sensor en cualquier cuerpo de succión del CMBS. Al ser colocada la montura en el único punto visible de la flecha del motor “cuerpo de succión”, el sensor esta expuesto a la fuerza ejercida por la succión del agua a la entrada de la bomba, donde constantemente es golpeado. Por lo anterior la montura a instalar esta fabricada en acero de 1/4 de pulgada de espesor, con lo que se evitan deformaciones o vibraciones en la montura que pudiesen afectar el sensado. En la sección de resultados presentan otras fotografías de la montura, el sensor y otros elementos que intervienen en la medición de la velocidad del CMBS.

Como se trata de un sensor inductivo se requiere de un material ferromagnético colocado en el rotor que sirva para que el sensor detecte el giro del mismo. El dispositivo considera que el motor y la bomba se acoplan con un eje cilíndrico hueco que generalmente puede ser de tres dimensiones dependiendo el tamaño de motor. Así se establecen como patrones de referencia 3 aros intercambiables tipo abrazaderas con un elemento saliente de hierro como se observa en la figura 5.18b.



Figura 5.18: a) CMBS con el dispositivo sensor de la velocidad acoplado. b) Cuerpo de succión del CMBS donde se permite observar el sensor, la montura y la abrazadera colocada sobre el rotor.

La tarjeta de adquisición de datos

Como se ha venido mencionado a lo largo de este capítulo, se empleó una tarjeta de adquisición para digitalizar las señales, se puede observar en la figura 5.19a la tarjeta utilizada de marca National Instruments modelo USB-6211, la cual cuenta con un conector para USB figura 5.19b. Las ventajas de utilizar una tarjeta de adquisición comercial son muchas, sin embargo podemos decir que es fácilmente configurable y muy confiable durante el proceso de muestreo de múltiples señales, aunque por lo general son de un costo elevado.

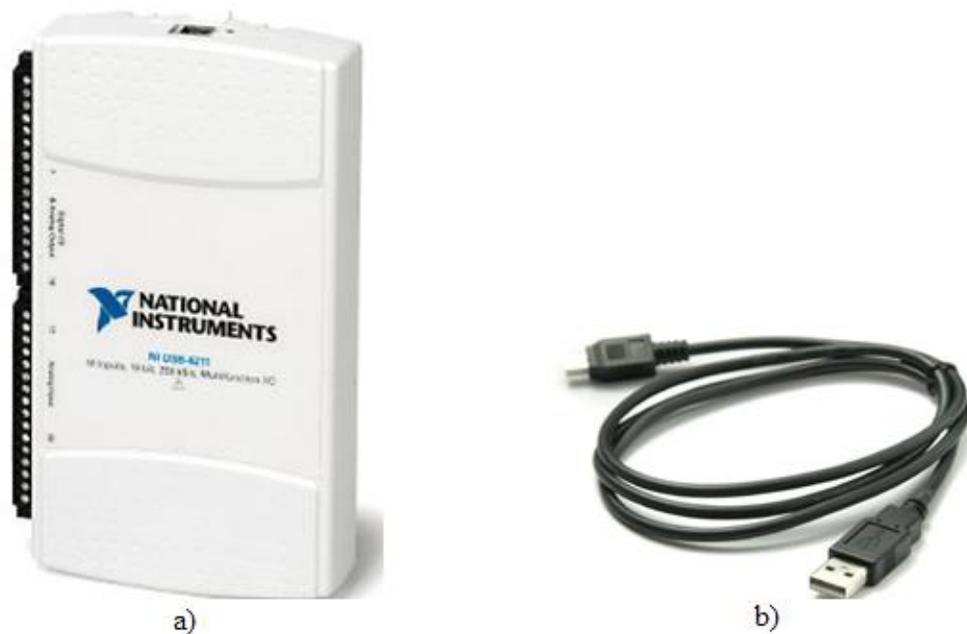


Figura 5.19: a) Tarjeta de adquisición NI USB-6211 con terminal tipo tornillo. b) Cable de conexión para puerto USB.

Las características completas de la tarjeta de adquisición se presentan en el anexo B, de las cuales podemos mencionar como las más importantes las siguientes:

Sistema Operativo	Windows , Linux , Mac OS
Familia de Productos DAQ	Serie M
Tipos de Medida	Voltaje
Canales de una sola terminal	16
Canales Diferenciales	8
Resolución	16 bits
Velocidad de Muestreo	250 kS/s
Rango de Voltaje Máximo	± 10 V
Precisión Máx. de Voltaje	2.69 mV
Sensibilidad Máx. de Voltaje	91.6 μ V
Rango de Voltaje Mínimo	± 200 mV
Mínima Precisión de Voltaje	0.088 mV
Mínima Sensibilidad de Voltaje	4.8 μ V
Muestreo Simultáneo	No
Memoria Interna	4095 muestras
Salida Analógica Canales	2
Capacidad de Corriente Total	4 mA
Conector de E/S	Terminales de tornillo

En la figura 5.20 se muestran las conexiones realizadas en la tarjeta de adquisición, detallando las letras con que se designado nombrar a cada señal. Esta información ayuda significativamente a interpretar las conexiones en el gabinete de la figura 5.15.

EL Instrumento Virtual

El software de procesamiento de la señal, SPS, cuenta con una interface de usuario que está diseñada para tener una interacción amigable entre el operador y el programa. Se utilizó el software LabVIEW (por sus siglas en ingles, Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench). La interfaz de usuario y el análisis de la señal fueron elaborados en LabVIEW. La interfaz de usuario, o panel frontal, cuenta con controles interactivos que pueden ser manipulados fácilmente por el usuario. Dicho panel frontal puede ser visto como un instrumento físico, donde

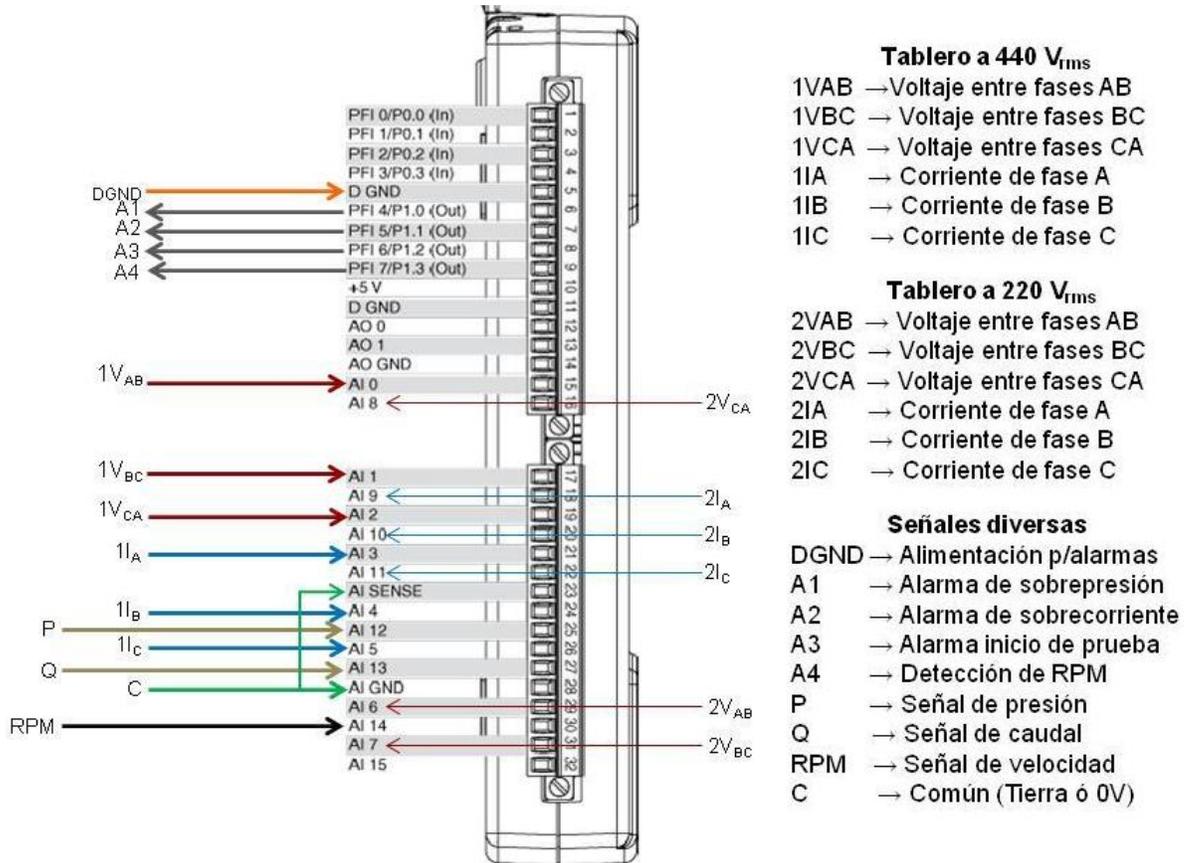


Figura 5.20: Diagrama de conexiones realizadas en la tarjeta adquisición NI USB-6211. el usuario puede visualizar los resultados en la pantalla del monitor de la computadora.

Para el desarrollo del equipo en su etapa de programación se consideraron varios aspectos como son: los límites de variación asignado para cada las variable, cifras significativas, oscilación permitida, el tiempo de captura entre lecturas, etc., que se establecen en la Norma [1], también se toman aspectos relacionados con la automatización de laboratorios [15] que optimizan el proceso de prueba de un laboratorio de ensayos del CMBS.

En la figura 5.21 se muestra una imagen del panel frontal del instrumentación virtual del equipo, donde se puede observar en un recuadro las variables eléctricas voltajes entre fases, corrientes de fase y el factor de potencia respectivamente en magnitudes RMS. En otro recuadro las variables hidráulicas flujo y altura manométrica ó altura total de bombeo en las unidades requeridas para el operador (lt/s y m). Finalmente en un recuadro de mayor tamaño se ilustra la velocidad del motor en revoluciones por minuto, la cual es estimada cada segundo.



Figura 5.21: Panel frontal del sistema de Instrumentación Virtual.

En la figura 5.22 se muestra el código principal completo desarrollado en LabVIEW. Se eligió esta plataforma por la facilidad de programación y la flexibilidad de realizar posibles cambios significativos en el código, por otro lado es posible realizar interfaces gráficas de buena calidad. Para una mejor descripción del programa desarrollado, se presentan fragmentos del código principal, en el siguiente orden:

- Monitoreo de voltajes y corrientes,
- Monitoreo del factor de potencia,
- Monitoreo de la presión y el caudal,
- Monitoreo de la velocidad,
- Presentación de los resultados en tabla,
- Proceso de almacenamiento de la información,
- Indicadores de funcionamiento "Alarmas".

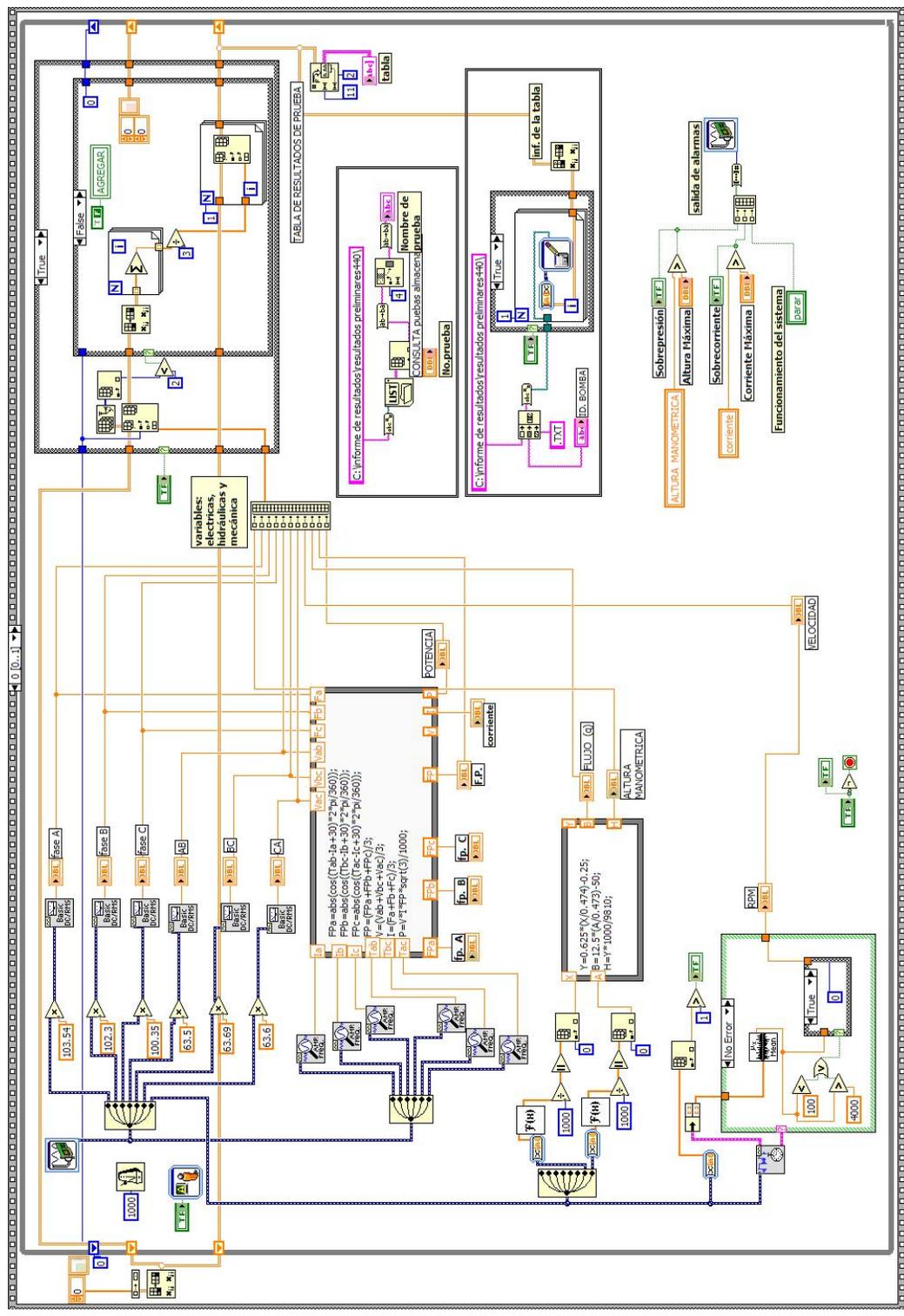


Figura 5.22: Código principal del Instrumento Virtual desarrollado en LabVIEW.

a) *Monitoreo de voltajes y corrientes.*

En la figura 5.23 se muestra un fragmento del código principal, se puede resaltar el hecho de la utilización de constantes numéricas, ajustadas ligeramente durante el proceso de pruebas al sistema. Las constantes representan la relación de transformación calculada para los transformadores de voltaje y donas de corriente mencionadas en la sección 5.2. Por razones de fabricación la relación de transformación en los transformadores de voltaje no era exactamente 70/1, al determinar experimentalmente la relación de transformación se obtuvieron las relaciones de transformación siguientes: 63.50, 63.69 y 63.60. Para el caso de las donas de corriente se utilizan resistencias comerciales en paralelo a la entrada de la tarjeta para que al circular la corriente por ésta la tarjeta lea un voltaje, pero antes de instalar las resistencias en el circuito se determinó experimentalmente el valor real de cada resistencia, donde se observó una variación en el valor ohmico. El ajuste correspondiente a la relación de transformación de las donas de corriente queda fija en: 103.54, 102.3 y 100.35.

Finalmente al multiplicarse cada variable eléctrica por su respectiva constante ajustada, se obtienen lecturas de voltaje y corriente aceptables en valores RMS, los cuales son mostrados mediante indicadores en el panel frontal.

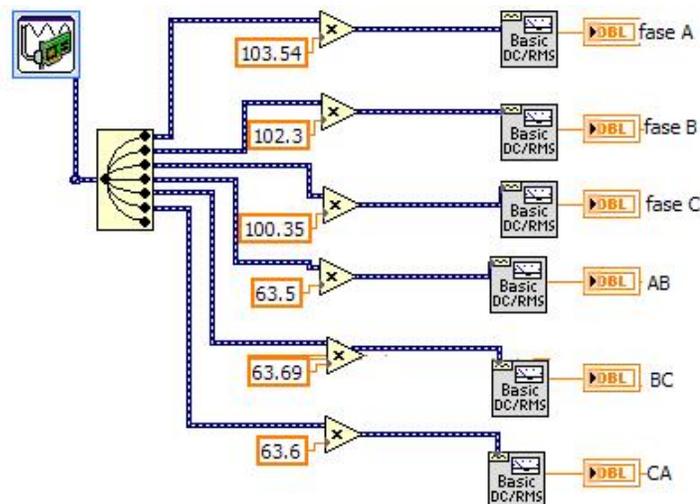


Figura 5.23: Fragmento del código principal donde se realiza el monitoreo de voltajes y corrientes.

Es importante mencionar que la frecuencia de muestreo seleccionada es de 10000 muestras/segundo por canal, es decir; cada canal opera adquire 10000 muestras cada segundo, lo cual es suficiente si se considera que el teorema de Nyquist establece que se deben tener una frecuencia de muestreo de al menos el doble de la frecuencia a obtener [29]. Ahora bien, en México se trabaja con seales de voltaje de 60 Hz, pero si se considera que para los motores de inducción trifásicos jaula de ardilla los primeros armónicos son los más significativos (hasta el séptimo), se deberá considerar como mínimo una frecuencia de muestreo del doble de 7×60 , 840 Hz.

Para visualizar de mejor forma la señal al gráficarla se necesitaba un mayor número de puntos, y pensando que el equipo puede ser adaptado para realizar el análisis de la señal como es el estudio de armónicos en lo que se refiere a la calidad de la energía [30], se fijó la frecuencia de muestreo del equipo a 10000 muestras/segundo.

b) Monitoreo del factor de potencia.

Para el cálculo del factor de potencia se empleó una subrutina provista por LabVIEW como se muestra en la figura 5.24, la cual extrae el ángulo de fase de la señal que se le introduce sin tomar en cuenta la distorsión armónica descrita en la sección anterior, usando las ecuaciones 5.1, 5.12 y 5.13, se determina el factor de potencia para cada fase, el factor de potencia trifásico y la potencia activa total. Finalmente con los voltajes y corrientes obtenidos anteriormente se determina la potencia de entrada en kilowatts.

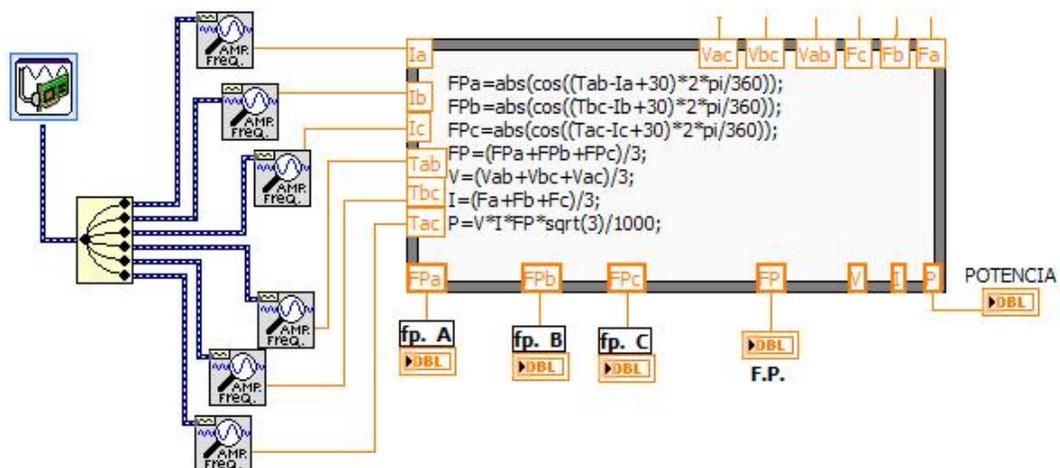


Figura 5.24: Fragmento del código principal donde se realiza el monitoreo del factor de potencia.

c) Monitoreo de la presión y el caudal.

El proceso de medición de la presión y el caudal, no es tan directo como en el caso de voltajes y corrientes, ya que como recordarán las señales de presión y caudal son señales analógicas de voltaje que en la mayoría de los equipos viene sumada a una gran cantidad de ruido [16], que habrá que filtrar.

El proceso de filtrado digital se detalla en el fragmento de código de la figura 5.25, en la cual se observa que el primer paso es la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier, FFT, esto genera una señal discreta compuesta por valores complejos dispuestas en un arreglo [31], por lo que a continuación se obtiene el valor absoluto de la señal, finalmente se selecciona el índice correspondiente a la señal directa “índice 0” del arreglo. Con los valores de voltaje filtrados y usando las ecuaciones 5.14, 5.15 y 5.16 se determina la presión y el caudal.

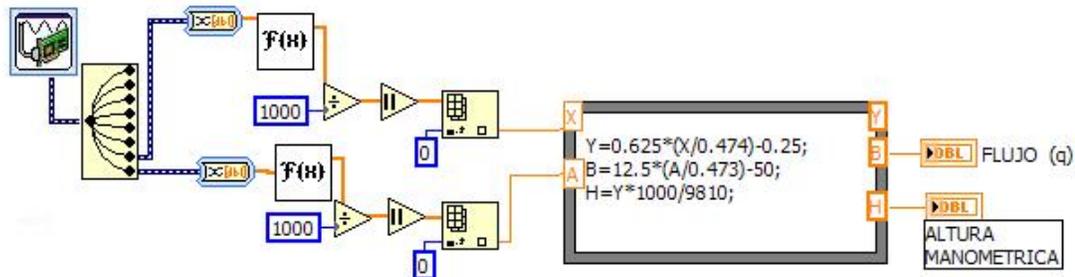


Figura 5.25: Fragmento del código principal determina la altura manométrica y el flujo.

d) Monitoreo de la velocidad.

Para el monitoreo de la velocidad primeramente se observó en un osciloscopio la señal generada por el sensor inductivo, la cual consistía en un tren de pulsos cuadrados de magnitud aproximada a 10 V cuando el sensor es alimentado con 12 V. Luego se implementó el fragmento de código mostrado en la figura 5.26, mediante el uso de una subrutina para el conteo de pulsos provista por LabVIEW se determinó la velocidad, como durante el cálculo de la velocidad la rutina genera 10 valores de velocidad, mediante la rutina “Mean” se calcula el promedio de estos valores.

También se dotó al Instrumento Virtual de un led indicador del movimiento del rotor, el cual se insertó en la pantalla del panel frontal, y éste parpadea mientras el motor está en funcionamiento.

En el código de la figura 5.26 se muestra el principio de operación del led.

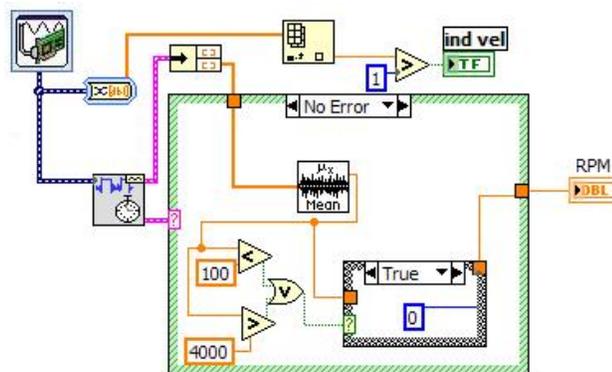


Figura 5.26: Fragmento del código principal donde se determina la velocidad.

e) Presentación de los resultados en una tabla.

Como una herramienta de monitoreo adicional, se presentan en forma tabular los datos previamente capturados, manteniendo un registro del comportamiento del CMBS durante el proceso de prueba. Al dar click en el botón **AGREGAR** (ver figura 5.21) un dato de cada variable es tomado cada segundo durante 3 segundos, luego el sistema promedia e imprime el resultado en la tabla. Es importante mencionar que el número de muestras que promedia el sistema es configurable, se toman 3 lecturas por el hecho de ser el mínimo número de lecturas a tomar durante una prueba como se mencionó en la sección 2.3.

f) Proceso de almacenamiento de la información.

Para el proceso de almacenar la tabla generada se desarrollo un fragmento de código mostrado en la figura 5.28, bajo un rutina condicionante que sólo requiere de un click en el botón **guardar** (ver figura 5.21), para que inmediatamente la información de la tabla sea almacenada en un directorio, que se encuentra localizado en siguiente ruta *C:\informe de resultados\resultados preliminares440* para el caso del tablero de 440V. También existe un directorio para 220V dentro de la carpeta *informe de resultados*.

En el caso de que se desee realizar una búsqueda de alguna prueba previamente guardada, se desarrollo el fragmento de código mostrado en la figura 5.29 que permite buscar en orden



Figura 5.29: Fragmento del código encargado de buscar una prueba anteriormente almacenada. led en color rojo que puede verse en el panel frontal. La señal de salida de una alarma se realiza a través de la tarjeta de adquisición con los puertos digitales, para así encender los leds colocados en la puerta del gabinete.



Figura 5.30: Fragmento del código principal encargado de generar las salidas de alerta..

5.4 Implementación del equipo

Para la implementación del sistema en campo, primeramente se le realizaron pruebas al equipo con diferentes motores (sumergibles y no sumergibles) bajo condiciones de carga variables, con lo que se obtuvo un ajuste y hasta cierto punto validación de las lecturas desplegadas en el panel frontal. Seguido de numeros ensayos y experimentos finales, se implemento el sistema en un laboratorio de pruebas de una empresa de fabricación y reparación de bombas sumergibles de la ciudad de León Gto., donde la misma empresa puso a su disposición un CMBS con capacidad de 20 HP para realizar el monitoreo de las variables que intervienen durante la prueba, y verificar el comportamiento del real CMBS.

En la figura 5.31 se muestra el laboratorio de pruebas con que se cuenta actualmente en la empresa donde se realizaron las pruebas finales, se observa en la parte media de la imagen como cuelga de una cadena el CMBS antes de ser sumergido en la piscina con el dispositivo sensor de la

velocidad previamente instalado, al fondo de la imagen se aprecia un enorme gabinete de control “obsoleto” donde se realiza el arranque del motor.



Figura 5.31: Implementación del equipo en una empresa con laboratorio de pruebas del CMBS.

Se puede observar de la figura 5.31 la instalación del equipo para automatizar el laboratorio de pruebas, conectando las terminales de voltaje y corriente del gabinete a los alimentadores de voltaje (tablero de alimentación) para el sensado de las variables eléctricas.

Antes de sumergir en la piscina el CMBS, se inserto el dispositivo sensor de velocidad a la entrada del cuerpo de succión del CMBS como se muestra en la figura 5.32a, se puede observar claramente entre el motor y la bomba a la montura ajustable que sujeta al sensor de velocidad.

La prueba se realizó en aproximadamente 10 minutos cuando generalmente les toma alrededor de 40 minutos, resaltando el hecho de que en la empresa su laboratorio “no acreditado” sólo mide voltajes y corrientes de una de las líneas de alimentación, no miden el factor de potencia, se cuenta con un auxiliar del laboratorio en todo momento para estimar la velocidad con el equipo tacómetro de lenguetas vibratorias, y conjuntamente con los valores de presión y caudal se registran

todas las lecturas mencionadas a mano en una tabla tipo bitácora.

En la figura 5.32b se muestra como el auxiliar de laboratorio esta presente durante toda la ejecución de la prueba para interpretar las lecturas de velocidad, presión y caudal de los medidores analógicos sujetos en el depósito de agua.



Figura 5.32: a) CMBS con el dispositivo sensor de la velocidad previamente instalado antes de ser sumergido en la piscina. b) CMBS sumergido en la piscina y operando bajo la supervisión constante de un auxiliar del laboratorio de pruebas.

Durante las pruebas del CMBS en piscina, las lecturas observadas en el panel frontal de la computadora fueron comparadas con el equipo de medición con que se contaba en el laboratorio, un multímetro. Como se presenta en la figura 5.33 la lectura de velocidad del motor en RPMs corresponde a la mencionada en la literatura para un motor de características similares.

El equipo esta diseñado para que el ensamble y conexión de los elementos externos al gabinete sea muy simple, rápido y de fácil transportación, aproximadamente toma 10 minutos el realizar la conexión de todos los elementos, además se requiere de poca capacitación para su uso dado que es un desarrollo hecho a la medida de las necesidades de los laboratorios de pruebas en México.

Por todo lo anterior se puede mencionar que el *equipo de medición de variables electromecánicas mediante instrumentación virtual* para automatizar el laboratorio de pruebas del CMBS tipo pozo profundo reúne las características necesarias para ser calibrado en situ o en las instalaciones de un laboratorio de calibración acreditado, siendo entonces una alternativa viable para lograr la acreditación de una laboratorio de pruebas e incluso, el equipo se puede emplear como una herramienta para mejorar el método de prueba del CMBS que establece la Norma NOM-010-ENER-2004.



Figura 5.33: Monitoreo y captura de las variables que intervienen durante el proceso de prueba del CMBS, empleando el equipo de instrumentación virtual.

6 Resultados

En este capítulo se presentan las pruebas, ensayos y experimentos más significativos sobre el equipo de instrumentación virtual, así como los resultados obtenidos en cada fase del trabajo.

Para la realización de pruebas del comportamiento del equipo, se contaba con un motor eléctrico trifásico y un tablero de alimentación de voltaje variable 0 a 220 V como elementos de referencia a monitorear. Las pruebas básicamente consistían en la comparación y ajuste entre las lecturas arrojadas por el equipo de instrumentación virtual desarrollado y otros equipos de medición de uso común como el multímetro y el ampérmetro de gancho, obteniendo finalmente una mínima desviación aceptable en la lectura visualizada en el equipo para las variables eléctricas y de velocidad.

Por otro lado los ensayos realizados para generar la confiabilidad del equipo, consistieron en una serie de pruebas a diferentes motores trifásicos tanto sumergibles como no sumergibles con que se contaba en el laboratorio, durante el ensayo de cada motor se observó su comportamiento eléctrico y se comparó la lectura visualizada en el equipo con la observada en otros medidores, inicialmente se registraba la diferencia en distintos puntos durante la prueba y se realizaban ligeros ajustes en la programación, hasta finalmente generar un equipo confiable en cierto rango de medición.

Finalmente se presenta uno de los experimentos realizados con el equipo para determinar *la eficiencia de un motor sumergible*, el cual forma parte del CMBS. El experimento se llevo a cabo implementando el equipo a un banco de frenado electromagnético para análisis de par-velocidad de motores eléctricos, en los resultados obtenidos se puede observar el comportamiento real del motor. Con el experimento se puede inferir la capacidad de implementar el equipo a otras aplicaciones, y como éste puede ser incorporado como herramienta de investigación en el estudio

de máquinas eléctricas, hidráulicas, térmicas, etc.

6.1 Pruebas de laboratorio

Pruebas de ajuste

En la figura 6.1a se muestra la primera versión del equipo de instrumentación virtual desarrollado, donde se visualizan las señales de voltaje y corriente en el tiempo así como los valores RMS para cada señal, facilitando la comparación directa con otros equipos de medición como se muestra en el figura 6.1b y 6.1c.

El equipo fue probado empleando un motor trifásico de 20 HP en vacío, con alimentación de 220 V. La prueba permitió ajustar de manera inmediata las lecturas visualizadas de voltaje y corriente. El ajuste se realizó modificando ligeramente las constantes en las relaciones de transformación descritas en la sección 5.3.



Figura 6.1: a) Panel frontal del equipo *versión 1* donde se monitorean las señales de voltaje y corriente en el tiempo, así como los valores en RMS. b) Equipo empleado para la comparación de voltajes, multímetro marca Autonics modelo DM-332. c) Equipo empleado para la comparación de corrientes, ampérmetro de gancho marca Autonics modelo 8EW-3900CL.

Para las pruebas de ajuste de la lectura de velocidad, se utilizó un motor trifásico de 1 HP alimentado con una fuente regulable de voltaje como se observa en la figura 6.2a. Variando el voltaje de alimentación del motor se conseguía modificar la velocidad del motor. Mediante el

sensor inductivo se realiza la detección de la velocidad utilizando como referencia la ranura (para caña) sobre el eje del motor, con un pulsómetro de alta precisión se codifican los pulsos del sensor a revoluciones por minuto, por otro lado se presenta también la lectura de la velocidad en el monitor de la computadora, durante la prueba comparativa se observo una oscilación de 1rpm del equipo con respecto al equipo patrón.

En las primeras versiones del instrumento virtual, se utilizo un sensor inductivo de 0.2mm de distancia de sensado, complicando la medición directa sobre el eje del motor como se observa en la figura 6.2b, en ese momento se contaba con la tarjeta de adquisición NI-USB 6212 con característica de 4 canales de entrada analógicos simultáneos, dada la limitante en el número de canales se desarrollo paralelamente al programa de monitoreo de variables eléctricas anterior un programa de monitoreo de la velocidad. Como se observa en la figura 6.2c, la lectura de velocidad visualizada en el monitor de la computadora corresponde con la velocidad del equipo de referencia.



Figura 6.2: a) Elementos principales para la prueba y ajuste del parámetro velocidad del motor. b) Prueba de velocidad para un motor de 1 HP utilizando un sensor inductivo y un pulsómetro como medidor de referencia. c) Comparación entre el equipo de instrumentación virtual y el indicador de referencia pulsómetro marca Autonics serie MP5W.

Ensayos de validación

Para garantizar la confiabilidad del equipo, se realizaron varios ensayos. Los ensayos permitieron validar el equipo y caracterizar los parámetros eléctricos, hidráulicos y de velocidad.

En la figura 6.3 se muestra el ensayo realizado al equipo con dos motores trifásicos no sumergibles separadamente, el primero a la izquierda de 30 HP y el segundo a la derecha de 20 HP, ambos alimentados a 220V. Durante el ensayo el equipo monitorea las variables eléctricas de voltaje, corriente y factor de potencia, las lecturas son visualizadas en la computadora y comparadas directamente con un multímetro y un amperímetro de gancho.

Al probar el equipo con estos motores se validan las lecturas eléctricas, pero no el parámetro de velocidad, ya que la velocidad de estos motores en vacío es cercana a 1800rpm y la velocidad de los motores que conforman al CMBS oscila alrededor de los 3500rpm.



Figura 6.3: Primeros ensayos del equipo sobre 2 motores no sumergibles alimentados a 220V, con capacidad de 30HP y 20HP respectivamente, la velocidad de giro es cercana a 1800rpm en vacío.

Al comparar el equipo de Instrumentación Virtual, VI, contra un equipo medidor de voltaje y corriente marca Autonics, y contra un equipo analizador de potencia marca AMPRO, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 6.1.

Cuadro 6.1: Comparativa de parámetros eléctricos.

Equipo	Vab (voltios)	Vbc (voltios)	Vca (voltios)	Ia (ampere)	Ib (ampere)	Ic (ampere)	f.p.
AMPRO	222.3	223.4	221.6	22.54	21.33	21.05	0.7
AUTONICS	222.3	223.2	221.0	22.4	22.3	20.5	—
Equipo VI	222.1	223.3	221.5	22.45	21.30	20.98	0.68

En la figura 6.4 se muestra el ensayo realizado al equipo con un motor sumergible de 2HP (en posición vertical) alimentado a 220V. En el cuerpo de succión del motor se localiza insertado el sensor inductivo de velocidad, se puede observar en el monitor de la computadora que la velocidad indicada en la pantalla es de 3583rpm, mientras que la observada con el pulsómetro es 3585rpm para ese instante. Detrás de la computadora se aprecia el gabinete y los elementos principales que lo integran.



Figura 6.4: Ensayo del equipo utilizando un motor sumergible de 2HP alimentado a 220V, la velocidad de giro detectada seala 3583 rpm, considerando que el motor se encuentra en vacío.

En la figura 6.5 se muestra el ensayo real (completo) del equipo VI, con un CMBS de capacidad 30HP sumergido en una piscina de 20m de profundidad. El ensayo se llevo a cabo en un laboratorio de pruebas de bombas sumergibles tipo pozo profundo. Como se muestra en la imagen el laboratorio es rudimentario y obsoleto, sin embargo con el equipo propuesto se pudo optimizar el tiempo de duración de la prueba del CMBS a 10 minutos, tomando un promedio de 6 lecturas por cada uno de los 9 puntos, dando un total de 54 puntos, cada uno de los puntos incluye todos los parámetros eléctricos, hidráulicos y de velocidad solicitados por la norma.

En el recuadro superior derecho de la figura 6.5 se puede observar con mayor claridad el equipo, así como la lectura de velocidad indicada como 3434rpm, contra los 3433rpm medidos con el equipo pulsómetro.



Figura 6.5: Ensayo del equipo VI sobre el CMBS de capacidad 30HP en un laboratorio de pruebas de bombas sumergibles tipo pozo profundo.

Estudio experimental de dos motores sumergibles

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos al estudiar el comportamiento de dos motores sumergibles, uno de 5HP y otro de 2HP, ambos bajo diferentes condiciones de operación. El estudio experimental consiste en el monitoreo de variables eléctricas (voltajes, corrientes y factor de potencia) y variables mecánicas (velocidad y el par) bajo diferentes condiciones de operación, desde el motor en vacío (sin carga) pasando por las condiciones nominales de operación (plena carga) hasta el frenado total del motor donde la velocidad comienza a decaer (cerca de 3000rpm).

Durante el estudio del comportamiento del motor las variables eléctricas son registradas por el equipo VI y comparadas con diferentes equipos de medición como se muestra en la figura 6.6, aunque se tomó como referencia el equipo *analizador de la calidad de la energía* FLUKE 435, el cual es un equipo que se encuentra calibrado y realiza el monitoreo trifásico simultáneo de voltajes corrientes y factor de potencia.



Figura 6.6: Equipos de medición utilizados para el monitoreo de las variables eléctricas durante el estudio del comportamiento del motor.

Para la realización del experimento se utilizó un banco de pruebas conocido como freno electromagnético, en la figura 6.6 se puede observar el banco del freno electromagnético. Las partes principales que lo conforman son: una base acondicionada para montar el motor sumergible, un disco con electroimanes en su interior cuyo campo magnético generado es regulado mediante un par de perillas, así como el tablero de alimentación de 220V, el cual provee de energía al motor y al freno electromagnético.

El funcionamiento del banco consiste en que a partir de la variación de la intensidad de campo magnético generado con los electroimanes del banco, las líneas de campo magnético generado pasan a través de un disco de aluminio unido a la flecha del motor, forzando al motor a reducir su velocidad (frenarlo). El frenado del motor puede verse como una carga a vencer por el eje del motor. Ciertamente el programa del equipo VI desarrollado se adecuó para esta aplicación, ya que para el estudio del comportamiento del motor se requiere conocer la potencia mecánica desarrollada por el motor.

Para determinar la potencia mecánica se incluyó en la etapa de sensado, una celda de carga unida en un extremo a un brazo que tiene el disco con electroimanes, de tal manera que conociendo la **fuerza** ejercida por el motor al oponerse al freno del disco magnético y la **distancia** radial del centro del eje del motor a la celda de carga se determina el **par**. Conociendo el par y la velocidad del motor se determina con cierta facilidad la potencia mecánica ó potencia de salida del motor

de acuerdo con

$$P_{sal} = T\omega,$$

donde:

P_{sal} Potencia de salida ó potencia mecánica en *Watts*;

T Par en *N·m*;

ω Velocidad angular en *rad/s*.

Los motores sumergibles utilizados en la etapa experimental tienen las características de placa ó valores nominales de operación siguientes:

Descripción	Motor 1	Motor 2
Potencia	5 HP	2 HP
Velocidad	3450 rpm	3450 rpm
Corriente	15 A	7.5 A
Alimentación	220 V	220 V
Factor de Potencia	0.8	0.65
Conexión	Estrella, 2 polos	Estrella, 2 polos

a) Curvas características obtenidas para el motor de 5 HP

Los resultados presentados a continuación fueron obtenidos con el registro automático de lecturas que realiza el equipo VI, como ya se mencionó las condiciones de operación del motor se varían, comenzando desde el motor sin carga (vacío), pasando por plena carga (3450rpm), hasta el frenado del motor (rotor bloqueado). Durante la prueba el equipo VI toma una lectura por segundo de las variables que intervienen en el estudio del comportamiento del motor, como son: voltajes de línea, corrientes de línea, factor de potencia, velocidad y fuerza (mediante la celda de carga).

El tiempo total de duración de la prueba fue de aproximadamente 6 minutos, logrando así la adquisición de 360 lecturas. Las gráficas que se presentan a continuación involucran la toma de todos los puntos, y se toma siempre como referencia la velocidad del motor, ya que el cambio de velocidad esta directamente relacionado con el aumento de carga en el motor, y el experimento se centra en el estudio del comportamiento eléctrico del motor.

En la gráfica de la figura 6.7 se muestra como el voltaje de alimentación esta desbalanceado y como a plena carga el voltaje manifiesta un comportamiento abrupto en sus tres líneas. Cuando la velocidad disminuye por debajo de las 3300rpm el voltaje de alimentación presenta un decaimiento de aproximadamente 4 voltios.

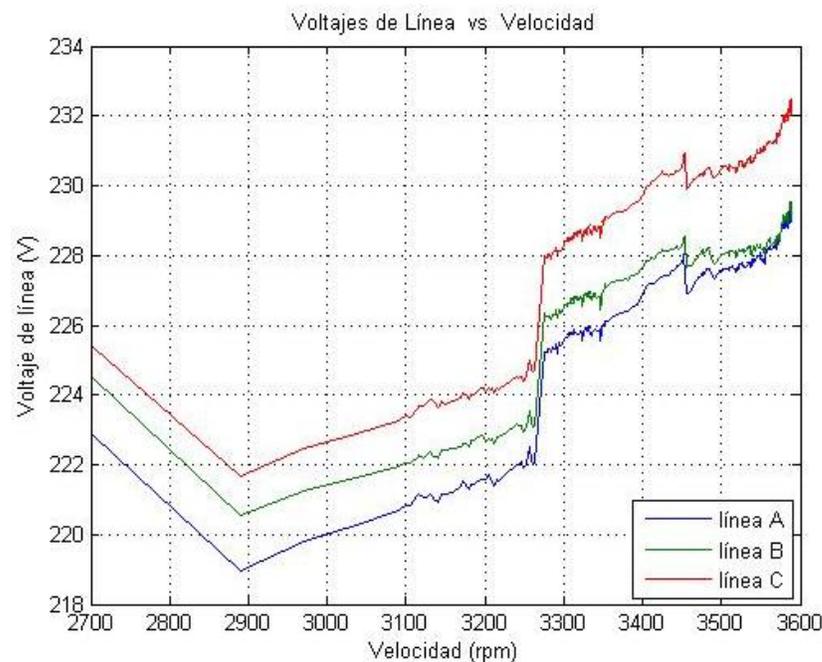


Figura 6.7: Gráfica del comportamiento de los voltajes de línea en función de la velocidad, para un motor sumergible de 5HP obtenida con el equipo de instrumentación virtual.

En la gráfica de la figura 6.8 se muestra la variación de las corrientes en función de la velocidad, debido al aumento de carga en en la flecha del motor la velocidad disminuye, sin embargo las corrientes aumentan alcanzando los 17.63A a plena carga, éste dato es muy interesante considerando que la placa del motor establece como corriente a plena carga 15A.

En la gráfica de la figura 6.9 se muestra el comportamiento del factor de potencia f_p en función de la velocidad, como era de esperarse el f_p es muy pequeño (cercano a 0.22) cuando el motor está en vacío, a medida que la carga aumenta hasta alcanzar la condición de plena carga se incrementa el f_p hasta alcanzar un valor de 0.79 en condiciones nominales de operación. El f_p máximo alcanzado es de 0.85 a 3290rpm y como puede verse se mantiene por arriba de 0.8 al continuar disminuyendo la velocidad por aumento de la carga.

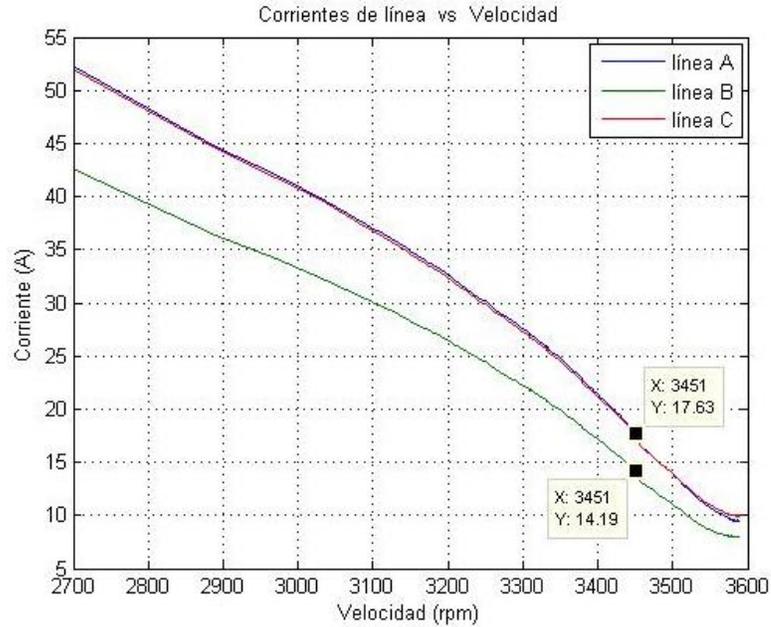


Figura 6.8: Gráfica del comportamiento de las corrientes de línea en función de la velocidad, para un motor sumergible de 5HP obtenida con el equipo de instrumentación virtual.

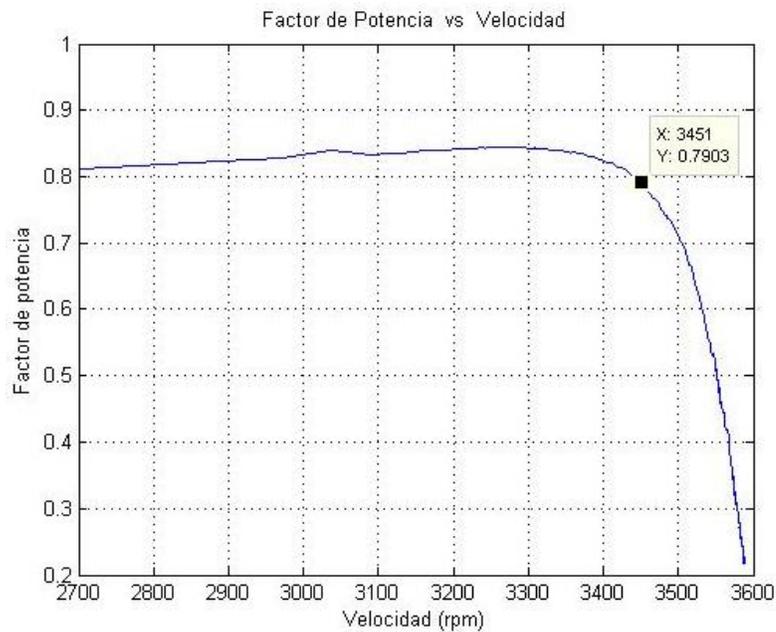


Figura 6.9: Gráfica del comportamiento del factor de potencia en función de la velocidad..

En la gráfica de la figura 6.10 se muestra el comportamiento del par en función de la velocidad. Es interesante observar la respuesta del motor ante el aumento de carga, se puede apreciar como el motor presenta un par igual 10.63Nm en condiciones de operación de plena carga, lo que equivale a levantar un peso de 41kg .

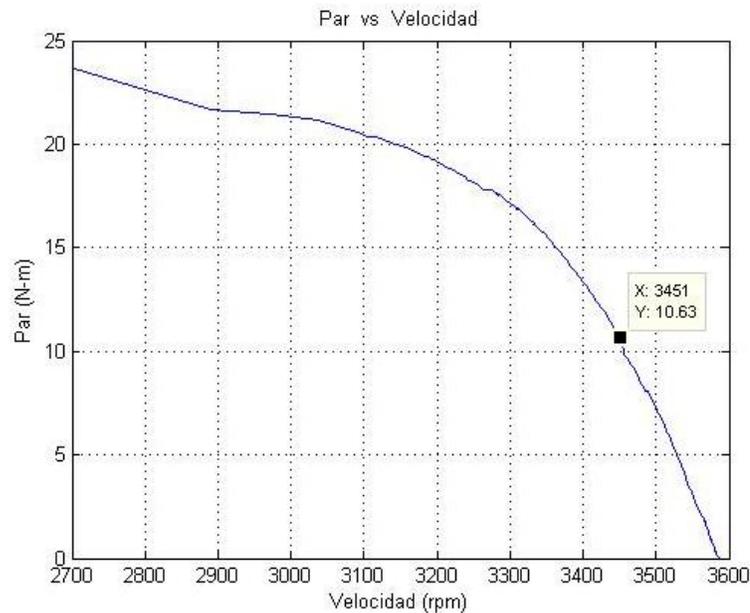


Figura 6.10: Gráfica del comportamiento del par en función de la velocidad.

En la gráfica de la figura 6.11 se muestra el comportamiento de la potencia de salida ó potencia mecánica en función de la velocidad, es claro ver como la potencia se incrementa a medida que la velocidad disminuye ó que el par se incrementa. Un dato interesante de ésta gráfica es el que presenta el motor a condiciones de plena carga originando una potencia mecánica de 5.149HP , el cual se encuentra ligeramente arriba del dato de placa.

Se debe mencionar en este momento que un motor clase C como lo es éste, se diseña a partir de la velocidad y condiciones nominales de carga. Observando los datos de placa impuestos por el fabricante, el motor debe producir los 5HP a 3450rpm , lo cual es correcto considerando la variación permitida en la Norma [1].

Finalmente en la gráfica de la figura 6.12 se muestra el comportamiento de la eficiencia en función de la velocidad, se puede observar que la eficiencia alcanzada en condiciones nominales de operación es igual a 74.06% , aunque el valor de eficiencia máximo se localiza ligeramente arriba

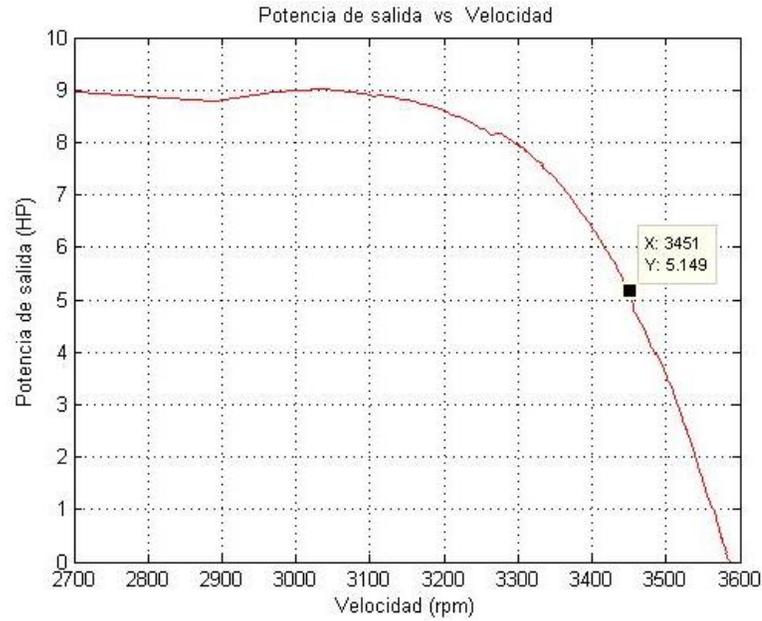


Figura 6.11: Gráfica del comportamiento de la potencia de salida en función de la velocidad.

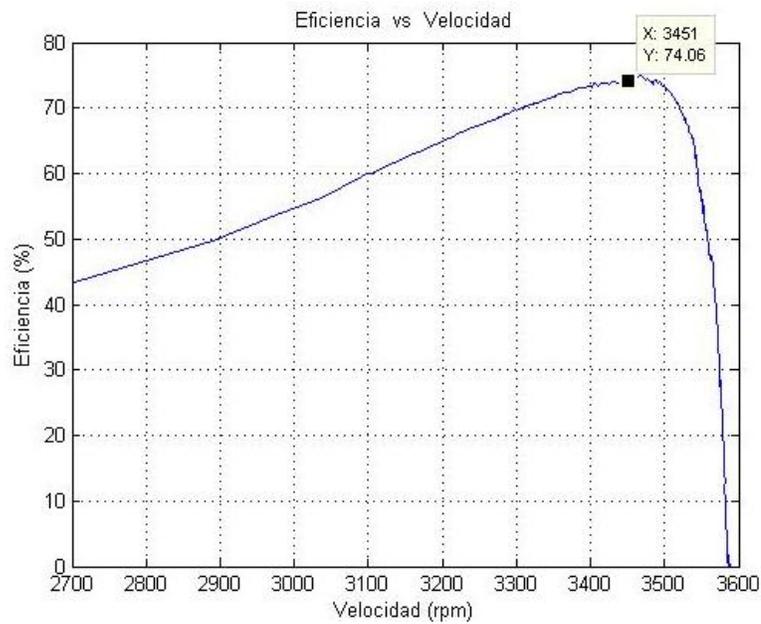


Figura 6.12: Gráfica del comportamiento de la eficiencia en función de la velocidad para el motor sumergible de 5HP monitoreado con el equipo de instrumentación virtual.

a 3460rpm con 75.15%, sin embargo a ésta velocidad de la figura 6.11 se observa que la potencia de salida es 4.712HP. Se puede concluir de acuerdo a lo establecido en la tabla 2.3, que el motor trabaja dentro de los rangos permitidos de eficiencia [33].

b) Curvas características obtenidas para el motor de 2 HP

En las gráficas 6.13 a 6.17 se presentan los resultados obtenidos empleando un motor de inducción jaula de ardilla sumergible de **2 HP** con velocidad nominal estimada en 3450 rpm de datos de placa. Se observa de las gráficas que el comportamiento de ambos motores concuerda con lo mencionado en la literatura [36], a excepción del factor de potencia señalado en la figura 6.15.

En la realización de esta prueba en particular se modifico un poco el programa para realizar una corrida continua, y así tomar un número de lecturas mayor, aproximadamente 300 datos fueron tomados con una velocidad de un dato/segundo, lo cual origino una reducción bastante significativa en el tiempo de realización del experimento. Le toma alrededor de 5 minutos al equipo virtual el realizar un barrido desde el vacío hasta el frenado del motor, observándose en las gráficas como se mejora la curva de comportamiento del motor.

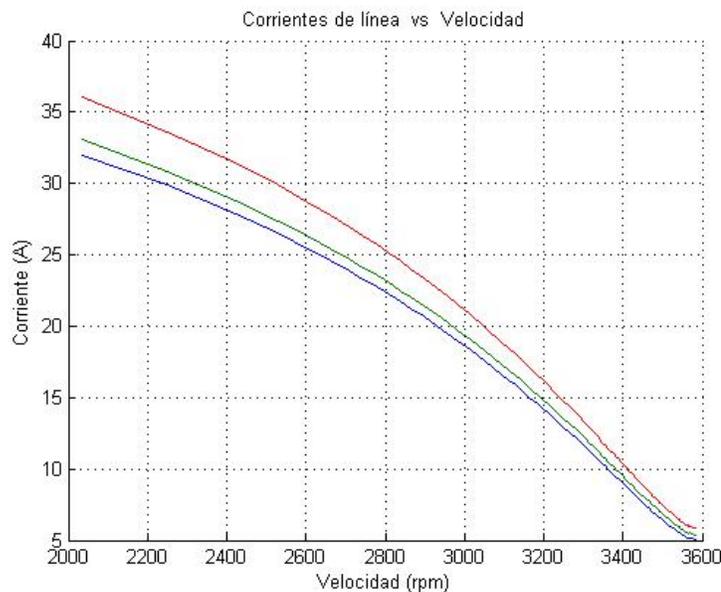


Figura 6.13: Gráfica del comportamiento de las corrientes de línea en función de la velocidad, para un motor sumergible de 2HP obtenida con el equipo de instrumentación virtual.

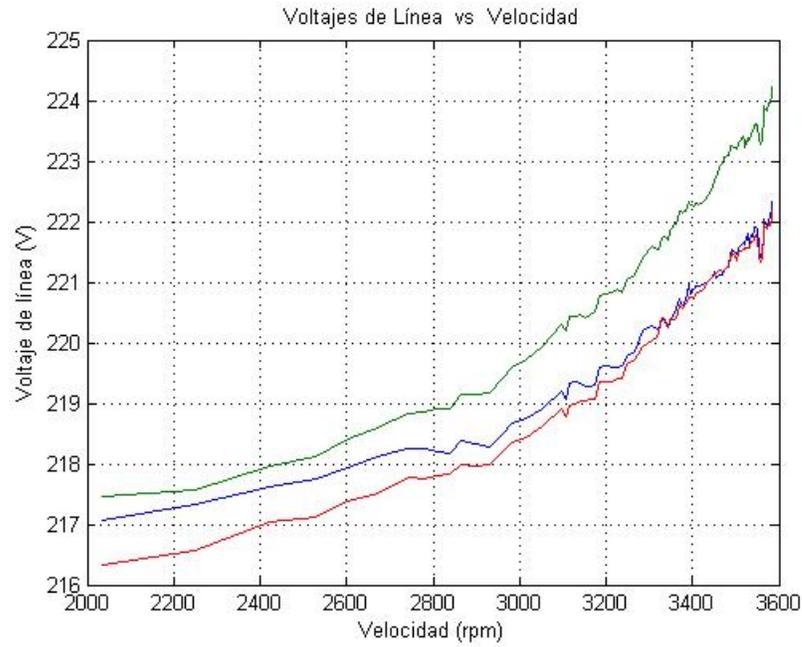


Figura 6.14: Gráfica del comportamiento de los voltajes de línea en función de la velocidad, para un motor sumergible de 2HP obtenida con el equipo de instrumentación virtual.

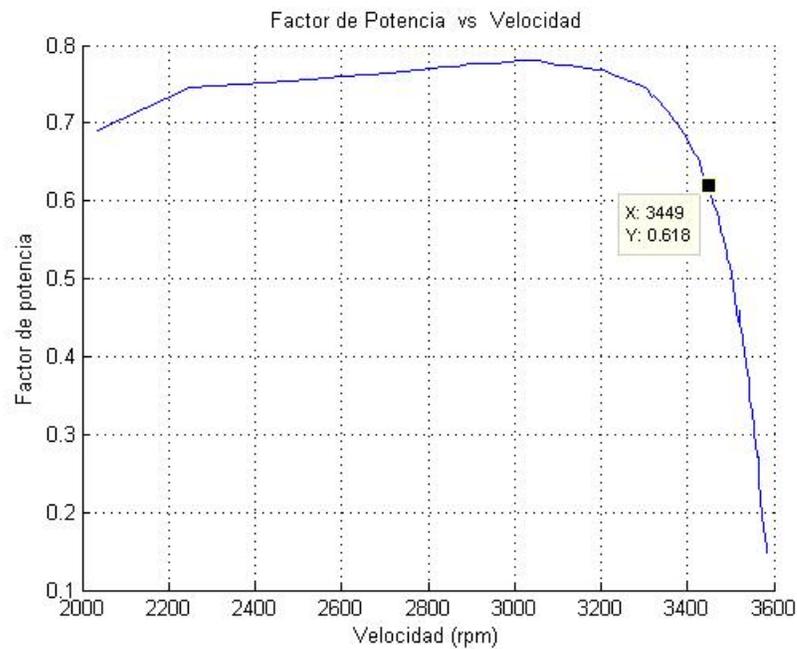


Figura 6.15: Gráfica del comportamiento del factor de potencia en función de la velocidad, es claro ver que se encuentra por debajo de lo que se establece en los datos de placa a su velocidad nominal.

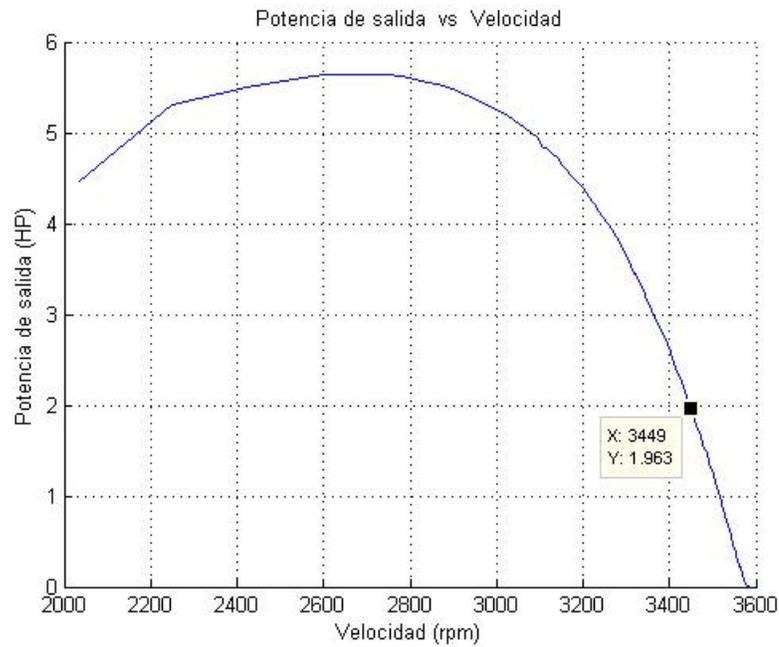


Figura 6.16: Gráfica del comportamiento de la potencia de salida en función de la velocidad.

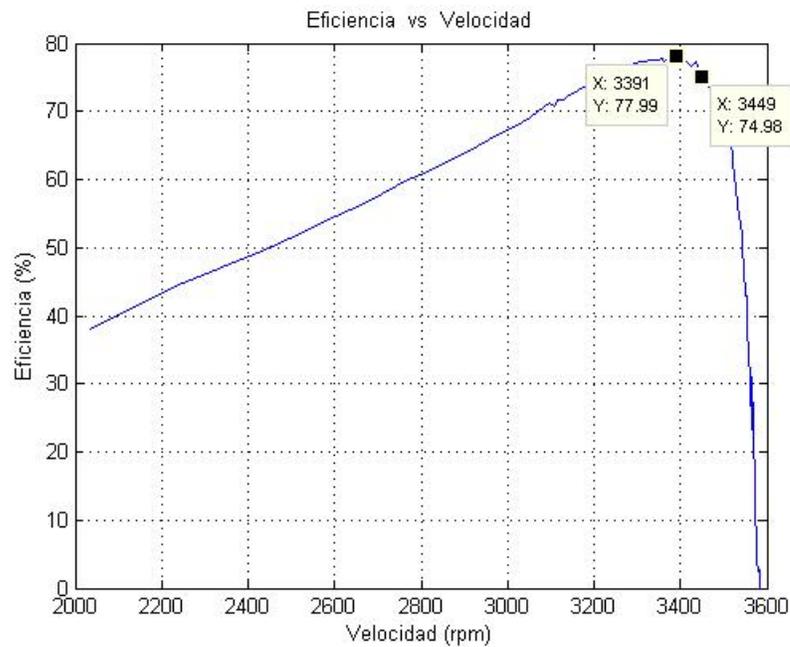


Figura 6.17: Gráfica del comportamiento de la eficiencia en función de la velocidad para el motor sumergible de 2HP.

6.2 Resultados

Como se mencionó en el apartado anterior, las lecturas adquiridas por el equipo son comparadas simultáneamente con el equipo de referencia Fluke 435. En las siguientes gráficas se presenta una comparación del sistema contra el Fluke tomando solamente 20 puntos, cada lectura fue registrada aproximadamente cada $10rpm$, partiendo de la operación del motor en vacío ($3585rpm$) hasta las $3400rpm$, considerando para cada punto un sensado de las variables eléctricas trifásicas de: voltaje, corriente y factor de potencia. En las gráficas 6.18 a 6.21 se puede observar el comportamiento del equipo de instrumentación ante diferentes situaciones de operación del motor de 5 HP.

Es importante resaltar que durante las pruebas del motor sin carga se observó un incremento considerable en la amplitud del tercer armónico, lo cual obviamente modifica el factor de potencia [37] por la gran distorsión armónica presentada como se menciona en la sección 5.2. La información obtenida de las gráficas nos indica si el motor fue bien diseñado o si se encuentra trabajando en mal estado. Por ejemplo en el consumo de corriente se observa que es un poco más alta de lo mencionado en la literatura para un motor de 5HP [38], aunque su eficiencia es aceptable no deja de llamar la atención. Por otro lado en la tabla 6.2 se observa el error absoluto obtenido de la diferencia entre el equipo de instrumentación y el FLUKE, los resultados muestran que el equipo es hasta cierto punto estable, sin embargo para poder asegurar que las lecturas están dentro los límites de medición mencionados en el capítulo 2 es necesario se calibre con una organismo autorizado.

Cuadro 6.2: Error absoluto entre el equipo y el Fluke.

Parámetro	Error absoluto
Corriente Ia	-0.1585 A
Corriente Ib	-0.2549 A
Corriente Ic	-0.5583 A
Voltaje Vab	-0.3364 V
Voltaje Vbc	-0.5506 V
Voltaje Vca	-0.4235 V
Factor de potencia	-0.0281

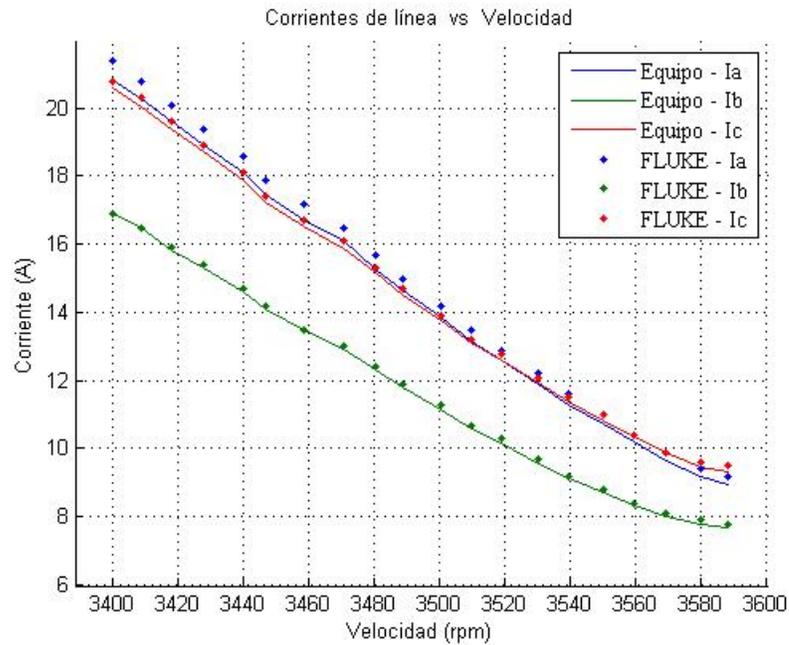


Figura 6.18: Comportamiento de las corrientes monitoreadas con el equipo VI y el equipo de referencia.

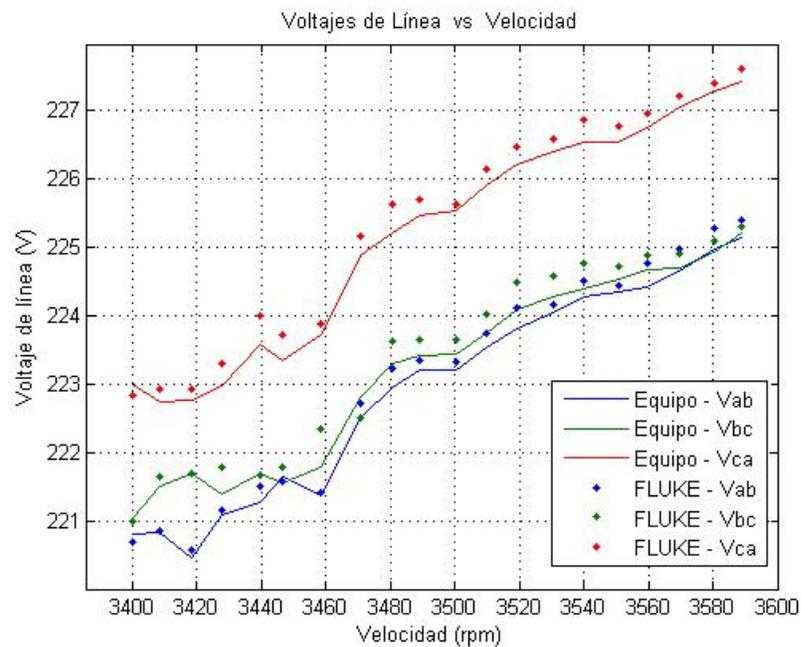


Figura 6.19: Comportamiento de los voltajes monitoreados con el equipo VI y el equipo de referencia.

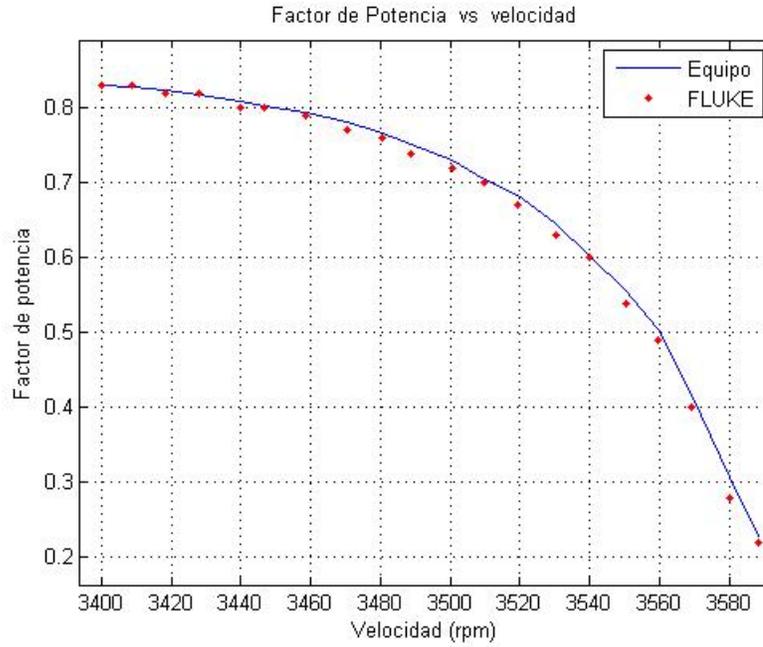


Figura 6.20: Comportamiento del factor de potencia monitoreado con el equipo VI y el equipo de referencia.

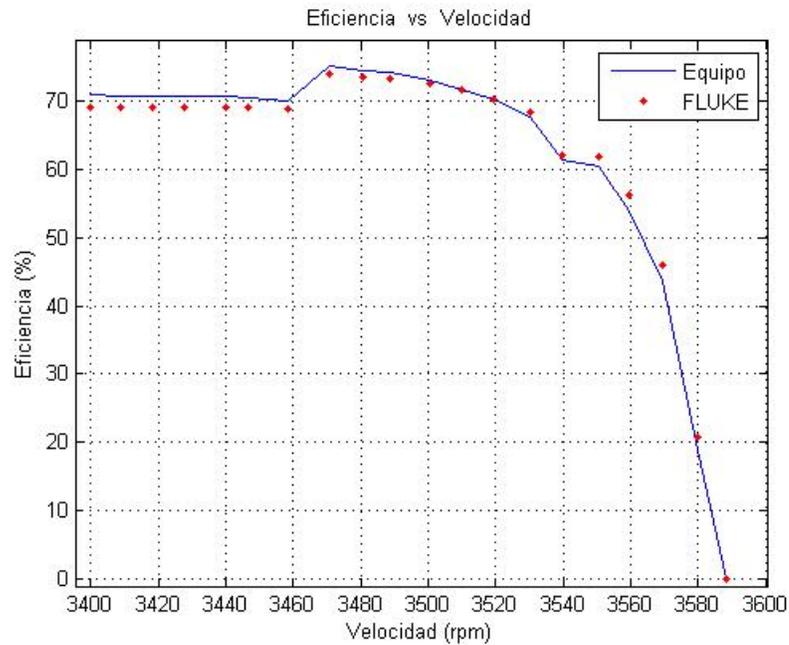


Figura 6.21: Comportamiento de la eficiencia calculada con el equipo VI y la visualizada en el equipo de referencia.

7 Conclusiones

En éste trabajo de tesis presentamos el diseño, desarrollo e implementación de un equipo basado en instrumentación virtual para la medición (monitoreo, control y registro) de las variable electromecánicas (eléctricas, hidráulicas y mecánicas) que intervienen durante el proceso de prueba del CMBS, el cual sirve como herramienta de estudio del comportamiento del CMBS. Una de las ventajas más importante de éste equipo, es que tiene la posibilidad de optimizar el laboratorio de pruebas, automatizando el proceso rutinario de toma de lecturas de voltajes, corrientes, factor de potencia, presión y flujo, el cual se realiza constantemente durante el ensayo de una prueba del CMBS en el laboratorio. Como parte de este trabajo, también se realizó una investigación sobre algunas de las técnicas más empleadas en la medición de la velocidad angular encontradas en la literatura, para desarrollar e implementar un dispositivo de fácil instalación al CMBS, lo cual resultó en una innovación muy atractiva pues posee la capacidad de determinar la velocidad del motor con mayor resolución y menor oscilación que el que existe comercialmente en este ramo, y con la enorme ventaja de realizar el monitoreo y registro de la velocidad del motor simultáneamente con las demás variables.

Las pruebas de laboratorio realizadas al equipo de instrumentación mencionadas en el capítulo seis, consistieron en la toma de lecturas con el equipo y su comparación con otros instrumentos de medición, para determinar el comportamiento del sistema y reajustarlo, como se observó en algunos de los componentes que integran el hardware del equipo, al presentar una ligera variación en su valor respecto a la especificada por el fabricante, como fue el caso de la relación de transformación de los transformadores de voltaje y las donas de corriente. En el mismo capítulo se detallan los ensayos de repetibilidad para generar la confiabilidad del sistema empleando motores de distintas capacidades e instrumentos diversos para comparar voltajes, corrientes y el factor de potencia obteniendo los mismos resultados.

Finalmente se hicieron algunos experimentos sobre dos motores sumergibles tipo pozo profundo sobre un banco de frenado electromagnético para determinar las curvas de comportamiento del motor y con ello *la eficiencia del motor sumergible*. Con el experimento se puede inferir la capacidad de implementar el equipo a otras aplicaciones, y como éste puede ser incorporado como herramienta de investigación en el estudio de máquinas eléctricas, hidráulicas, térmicas, etc., haciendo del **equipo medidor de variables electromecánicas mediante instrumentación virtual** un instrumento que puede ser útil tanto en laboratorios de universidades como a industriales, como una herramienta de monitoreo simultáneo.

7.1 Aportaciones

Cuando el objetivo en la medición de diversos parámetros que intervienen durante una prueba o experimento es el monitoreo y la adquisición simultánea de dichos parámetros, el equipo medidor de variables electromecánicas resulta un herramienta ideal para este tipo de aplicaciones. Es una nueva manera de realizar el proceso de medición rutinario y repetitivo que incluso puede tener mayor aportación de errores en la medición por el simple hecho de mover el equipo de un punto a otro ó de realizar el registro de los datos alternadamente con otros equipos de medición que se tengan. Hasta el momento sólo se presentó el monitoreo de algunas variables electromecánicas asociadas con el estudio de los motores eléctricos pertenecientes al CMBS, tales como las *variables eléctricas*, voltaje entre fases trifásico a 220V y 440V, las corrientes de línea trifásicas hasta 300A y el factor de potencia, las *variables hidráulicas*, presión y caudal y las *variables mecánicas*, velocidad angular de la flecha del motor, y el torque ó par.

De lo anterior podemos concluir que la principal contribución de este trabajo es por un lado, ampliar las posibilidades de selección y/o diseño de motores de inducción con vistas a la mejora de los mismos proporcionando información de las curvas de comportamiento del motor de una manera fácil, rápida y confiable, y por otro lado, generar un herramienta con la capacidad de automatizar el proceso de pruebas del CMBS en un laboratorio de ensayos con base a su protocolo de pruebas.

Se enumeran a continuación de forma más detallada las aportaciones que se desprenden de

este trabajo.

1. Al emplear el equipo en un laboratorio de ensayos se logra reducir el tiempo de realización de la prueba a un tiempo aproximado de 15 minutos cuando antes le tomaba más de una hora al encargado.
2. Se desarrolló e implementó un dispositivo capaz de medir la velocidad del motor directamente desde la flecha del rotor y en forma simultánea con las demás variables para cada punto durante la prueba, las lecturas observadas tienen una oscilación y rango de trabajo dentro de lo que establece el método de prueba en el capítulo 2.
3. El equipo realiza un sensado de las variables eléctricas de voltaje y corriente en el tiempo, monitoreando y desplegando la información de los parámetros eléctricos, hidráulicos y de velocidad de manera simultánea. Con el monitoreo de las señales en el tiempo es posible determinar el factor de potencia para cada fase como el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente, y así calcular el factor de potencia trifásico.
4. El equipo es fácilmente validable y se puede mandar calibrar, ya que sólo costa de un gabinete desmontable y una laptop para su funcionamiento. El proceso de adquisición, monitoreo y control de la información sólo requiere de una persona y los archivos de datos generados al guardar la información se almacenan en una base de datos debidamente ordenada y de fácil acceso.
5. Su costo es inferior al de un equipo analizador de potencia comercial pero con las mismas cualidades, pues realiza la adquisición de las señales de voltajes y corrientes en función del tiempo.

7.2 Trabajo a futuro

El equipo medidor desarrollado ha mostrado ser una herramienta útil y eficaz para el monitoreo y adquisición simultáneo de las variables electromecánicas mencionadas. Por tal motivo y porque pueden existir más parámetros que requieran ser observados y medidos se proponen las siguientes líneas de trabajo para continuar el realizado en esta tesis.

- Implementar el equipo en un túnel de viento para facilitar el estudio aerodinámico de álabes. Esto permitiría obtener información mucho más confiable y rápida del comportamiento de los álabes.
- Al implementar el equipo como herramienta de estudio del comportamiento de los fluidos en una tubería y dotándolo de sensores para la medición de la velocidad del fluido, su temperatura, etc., se podría determinar con mayor claridad la influencia de los parámetros que intervienen en la mejora de las tuberías y el transporte de los fluidos.
- Alterar un motor y obtener las curvas par-deslizamiento de forma que se pueda evaluar el efecto que tienen las posibles modificaciones del motor con vistas a mejorar su eficiencia [39].
- Implementar el equipo en el desarrollo de un calorímetro de alta precisión facilitaría la toma de lecturas de las variables involucradas y con ello cuantificar la pérdida de energía en máquinas eléctricas [40].
- Utilización del equipo con fines didácticos como lo haría un analizador de potencia con la ventaja de agregar nuevos algoritmos al software del equipo como la Transformada de Park ó la Transformada de Clark, facilitando la comprensión de conceptos como el de vectores espaciales empleados en el modelado de la posición y la velocidad de máquinas eléctricas rotativas [41].

A Plan de negocios

En este apéndice, planteamos el desarrollo de un plan de negocios, el cual esta enfocado a solicitar fondos económicos para poner en operación una empresa dedicada a la fabricación e implementación de tecnología que de solución a los problemas actuales que presenta la industria. Para esto mostramos la fiabilidad y sustentabilidad del proyecto, realizando un estudio del emprendedor, del mercado y de la misma empresa.

Resumen ejecutivo

Nombre del proyecto: *Equipo medidor de variables electromecánicas* **EMVE**

Nombre del incubado: *Salomón Rodríguez Carrera*

¿QUE ES EMVE?

EMVE, será una empresa integrada por un equipo de especialistas en diferentes áreas del conocimiento científico, tecnológico y humano, que trabajarán juntos para generar soluciones a los problemas y necesidades actuales de nuestros clientes.

FILOSOFÍA DE TRABAJO EN EMVE

La naturaleza nos enseña que los sistemas y organismos vivos funcionan por la división y organización de estos en sub-sistemas más sencillos y especializados, con igual importancia. Los sistemas u organismos vivos, cumplen sus funciones de forma eficiente, se reparan así mismos, crecen y evolucionan en formas más complejas y más eficientes. Siguiendo esta filosofía de trabajo, en **EMVE** se dará solución a un problema o necesidad de nuestros clientes en un proceso que consiste de tres fases o etapas:

Fase I. Proceso de análisis y división. Los cinco grupos principales que componen EMVE estudian en conjunto el problema o la necesidad de nuestro cliente, al que también se le involucra en el proceso de resolución y desde ese momento pasa a formar parte de nuestro grupo EMVE. El problema inicial es dividido en sub-problemas menos complejos.

Fase II. Proceso de resolución experta. Cada parte del problema inicial de la fase anterior, será resuelta por personal de EMVE experto o especialista y con talento en el área del conocimiento científico, tecnológico y humano que el sub-problema requiere. Durante esta fase de resolución de sub-problemas, es importante que los grupos se retroalimenten y comuniquen entre sí constantemente.

Fase III. Proceso de Integración. Finalmente, cada grupo de EMVE participará en el proceso de composición de la solución final, que es la mejor y más oportuna para nuestro cliente.

¿QUIENES TRABAJARÍAN EN EMVE?

Nuestro equipo será integrado por investigadores e ingenieros en diferentes áreas del conocimiento y de la técnica actual. Nuestra organización constará de cinco subsistemas o divisiones por áreas de especialidad teniendo todos los mismos niveles de jerarquía e interconectados, el porcentaje de participación de cada área en un proyecto depende de la naturaleza del problema o necesidad a resolver. Como podemos ver en el organigrama de la empresa, el cliente es parte importante e indispensable en la búsqueda de la mejor y más pronta solución a su problema o necesidad, y si la naturaleza del problema lo requiere, se integra otro equipo de especialistas de apoyo externos a EMVE.

ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL DE EMVE

EMVE será una empresa dedicada al diseño, fabricación y venta de equipos medidores especializados en el área del monitoreo de variables electromecánicas: voltajes, corrientes, factor de potencia, velocidad angular, temperatura, presión, caudal, fuerza, etc. EMVE estará dirigido a distintos sectores productivos tanto públicos como privados tales, como empresas del área metal

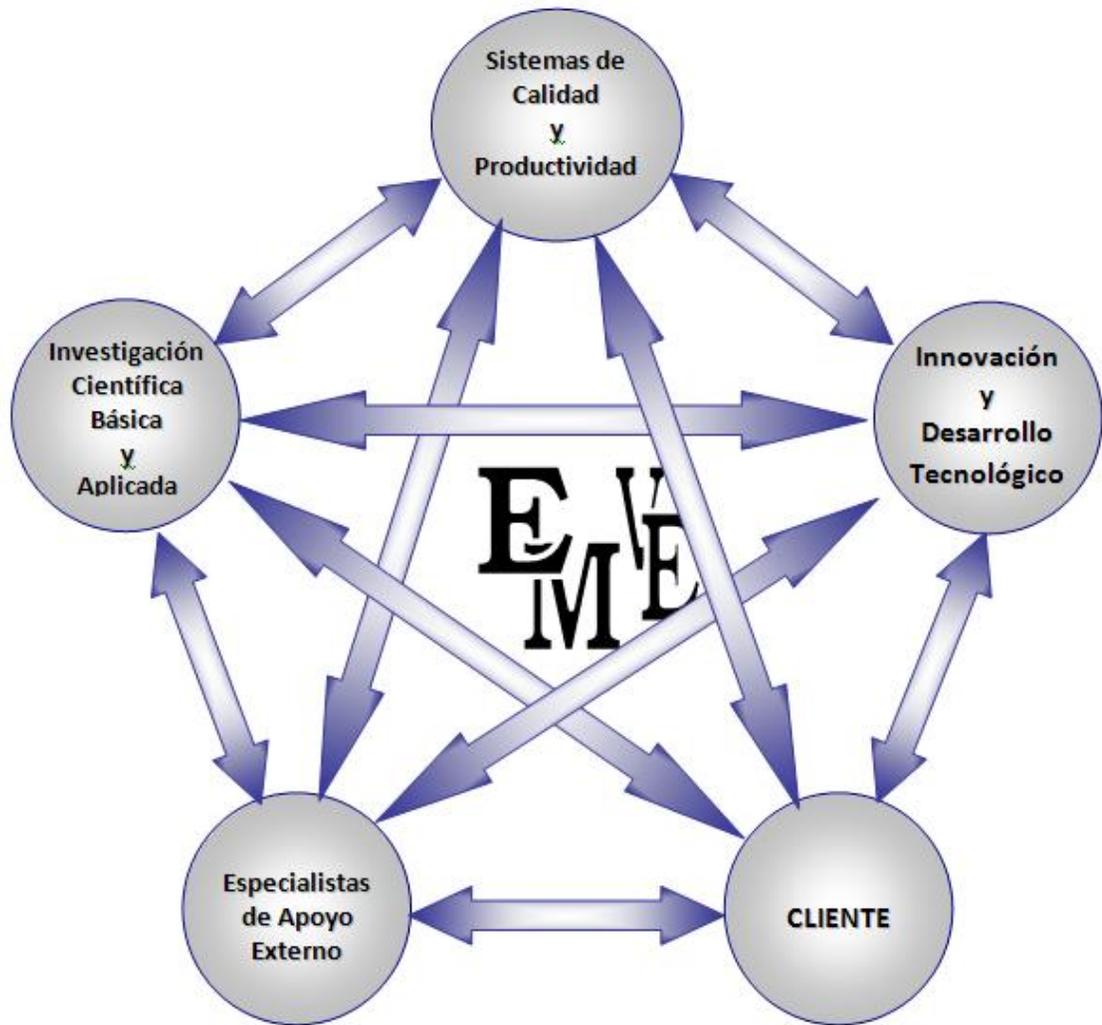


Figura A.1: Organigrama de la empresa.

mecánica y escuelas con la necesidad de modernizar su laboratorio a un bajo costo.

La producción se llevará a cabo con el apoyo de la empresa Soluciones Científicas e Industriales, SCI. Las ventas se realizarán en un punto específico en la Ciudad de León, y vía internet donde se ofrecerán otros servicios que motivarán al cliente a elegir por nuestro servicio y la compra de un equipo. Es importante mencionar que el equipo desarrollado es flexible y modular a las necesidades del cliente.

Además de la venta del equipo de medición electromecánica, el cliente podrá solicitar la instalación del equipo, capacitación de uso e incluso soporte técnico.

La empresa busca excelencia y calidad en sus productos y servicios, ya que contará con personal altamente capacitado para la investigación y desarrollo tecnológico, así como personal especializado para la instalación, capacitación y soporte técnico.

INFORMACIÓN DEL EMPRESARIO

Salomón Rodríguez Carrera. Nació el 13 de Noviembre de 1983 en la ciudad de León Gto., México. Es egresado del Instituto Tecnológico de León (2006), obteniendo el reconocimiento de mejor egresado de la Licenciatura en Ingeniería Electromecánica, otorgado por la Asociación Nacional de Facultades y Escuelas de Ingeniería ANFEI a los mejores egresados de ingeniería del país. Durante su trayectoria como estudiante obtuvo reconocimientos por su destacada participación en el área de Ciencias Básicas, Proyectos de Creatividad e Innovación, Proyectos Industriales y Proyectos de Investigación.

Ha participado en diversos proyectos de investigación concretándolos en soluciones a problemas actuales. Algunos de sus proyectos consisten en: Prototipo de freno manual en automóvil para discapacitados, Diseño de dispositivos para maquinaria de soldadura por resistencia para diversas empresas del ramo automotriz, Diseño de una máquina para medir el grado de suavidad en la piel en la industria del cuero y el calzado, Diseño de un Software de Monitoreo y Control de Saliencias Espaciales en Motores Jaula de Ardilla, Diseño de un Sistema de Detección de Fallos para motores de inducción trifásicos jaula de ardilla y su control mediante instrumentación virtual, Implementación de un inversor lineal y su control mediante instrumentación virtual, Diseño e implementación de un dispositivo sensor instrumentado para medir las revoluciones por minuto de una bomba sumergible, Desarrollo e Implementación de un Sistema Automatizado mediante Instrumentación virtual para el laboratorio de pruebas de la empresa Bombas Medina. Ha laborado como profesor-investigador en la Universidad de la SALLE Bajío y como profesor por honorarios en el Tecnológico de León. Concluyó sus estudios de maestría en el Centro de Investigaciones en Óptica obteniendo el grado de Maestro en Optomecatrónica.

Su inclinación por los sistemas de control automáticos, instrumentación virtual y sistemas inteligentes, orientados a la solución de problemas industriales, inspiran en él un gran sentido por seguirse preparando, siendo una persona honesta, activa, inquieta, participativa, de gran

potencial y deseosa de aprehender y transmitir conocimiento. Su deseo es ser un emprendedor con ideas novedosas que den solución a problemas actuales.

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO Y VALOR DISTINTIVO

Durante un estudio realizado a algunas empresas ubicadas en la ciudad de León, Gto., se observó el proceso de monitoreo, control y registro de las variables que intervienen durante la prueba del CMBS, principalmente se identificó que las instalaciones y los equipos de medición son en algunos casos obsoletos, y en otros inadecuados, originando que el proceso de prueba del CMBS en el laboratorio sea deficiente.

El equipo presentado esta basado en la instrumentación virtual para realizar una medición simultánea (monitoreo, control y registro) de las variable electromecánicas (eléctricas, hidráulicas y mecánicas) que intervienen durante el proceso de prueba del CMBS, el cual sirve como herramienta de estudio del comportamiento del CMBS. Una de las ventajas más importantes de éste equipo, es que tiene la posibilidad de optimizar el laboratorio de pruebas, automatizando el proceso rutinario de toma de lecturas de voltajes, corrientes, factor de potencia, presión y flujo del CMBS, el cual se realiza constantemente durante el ensayo de una prueba en el laboratorio.

También se puede implementar el equipo a otras aplicaciones como herramienta de investigación en el estudio de máquinas eléctricas, hidráulicas, térmicas, etc. En otras palabras el equipo de medición de variables electromecánicas mediante instrumentación virtual puede ser útil tanto en laboratorios de universidades como a industriales, como una herramienta de monitoreo simultáneo de parámetros eléctricos, hidráulicos y mecánicos.

Las amenazas latentes de la empresa están en los institutos de investigación y empresas de países desarrollados que tiene mayor equipo para el desarrollo y comercialización de nuevas tecnologías.

En la actualidad el desarrollo tecnológico está aun en desarrollo, para que la empresa comience a operar se requiere de inversionistas que retomen el proyecto para comenzar a encubar y generar por lo menos 5 empleos de alto nivel (Investigadores) y otros tantos para administración y producción.

Ventaja competitiva

Conocer el comportamiento de las variables eléctricas (voltajes, corrientes y factor de potencia), variables hidráulicas (flujo y presión) y las variables mecánica par y velocidad ó frecuencia de rotación, permite determinar entre muchas otras cosas las condiciones saludables de un motor, estimar su eficiencia, la carga aplicada, etc., sin embargo los instrumentos existentes para estimar estos parámetros actúan por separado, es decir; se pueden visualizar las lecturas eléctricas con un equipo, las hidráulicas con otros dos equipos y de manera estimativa la velocidad, de tal forma que la toma de las lecturas no simultaneas conllevan mayor tiempo e introducen mayor error en el cálculo de la eficiencia del conjunto motor bomba donde intervienen todas las variables mencionadas. El equipo tiene la enorme ventaja de realizar el monitoreo de todas las variables de forma simultanea, además con un click realiza el registro de datos en una tabla para que al finalizar la prueba se almacene la información en una base de datos.

Factores de éxito

1. El equipo es flexible y se puede adecuar al estudio de variables electromecánicos indistintamente.
2. Es de bajo costo comparado con los equipos que existen actualmente.
3. Es el único equipo de monitoreo y adquisición simultánea de parámetros eléctricos, mecánicos e hidráulicos.
4. Al cumplir con la especificaciones de la NOM-010-ENER-2004, la implementación de éste equipo en un laboratorio es viable cuando se está en proceso de adquirir la certificación.

Impacto económico y social del proyecto

La empresa generará directamente 3 empleos de alto valor a investigadores tecnológicos, otros 2 empleos a personal administrativo y de ingeniería, con una generación de 10 proyectos por año con una ganancia variable. Socialmente ayudará a motivar a las empresas a invertir en investigación y desarrollo tecnológico, pues tendrán a su alcance una empresa integradora, con aplicación científica y comprometida con el desarrollo industrial.

PLANEACIÓN ESTRATÉGICA

Misión

Dar un servicio de desarrollo tecnológico e investigación aplicada a distintos sectores productivos e industriales, con la finalidad de que los clientes mejoren sus procesos y/o productos.

Visión

Ser la empresa de asesoría y desarrollo tecnológico de impacto industrial con mayor venta en México y reconocida internacionalmente por su alto sentido de innovación.

Valores

Servicio. Atender necesidades de nuestros clientes.

Calidad. Desarrollar tecnología de vanguardia con alto valor agregado.

Confialilidad. El contar con personal altamente calificado y de competencia internacional para atacar la problemática desde distintos enfoques.

Objetivos

1. Resolver problemas de mejora en el producto ó proceso,
2. Mejorar los procesos de monitoreo de control de las variables que intervienen en un proceso,
3. Generación de empleo en las distintas áreas del organigrama,
4. Satisfacer al cliente con un excelente servicio en todas sus fases.

Lema de la empresa

Nuestro talento hace la diferencia

MERCADOTECNIA

Para que la empresa EMVE realice todas las actividades de negociación necesarias, para desarrollar tecnología aplicada y satisfacer al cliente, así como asignar un precio al producto, promoverlo,

distribuirlo, etc., es necesario realizar un estudio profundo de mercadotecnia. Por tanto se realiza un diagnóstico permanente, en el cual se analizan distintos escenarios (segmentación del mercado) y se realizan propuestas de comercialización para una eficiente interacción con el mercado potencial.

Oferta

En ésta etapa, se analizan la cantidad de equipos de medición que entran al mercado y que resultan competitivos con nuestro equipo, un estudio de empresas dedicadas al desarrollo de tecnología en instrumentación, investigación relacionada con estos medidores, y el costo del producto.

En la actualidad se tiene la competencia de una sociedad formada por 12 empresas internacionales de reconocida calidad dedicadas al desarrollo de equipos de medición de parámetros eléctricos, mecánicos e hidráulicos. A pesar de la competencia, cabe mencionar que las empresas internacionales desarrollan tecnología relacionada con las mediciones y con tecnologías diversas, que además utilizan tecnologías obsoletas y no muy eficientes.

Demanda

Para la demanda de nuestros productos se tiene un enorme mercado, el cual se puede generalizar hablando de la problemática que se puede atender:

- Empresas de metal-mecánica con la necesidad de modernizar su maquinaria.
- Empresas con problemas en la generación de productos en serie con alta calidad (mejora de los procesos de inspección).
- Empresas con la necesidad de medir parámetros poco convencionales.
- Empresas con la necesidad de reducir sus tiempo de prueba al automatizar sus procesos de medición y optimizarlo con base a su Norma.

Referencias

- [1] NORMA Oficial Mexicana NOM-010-ENER-2004, *Eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y método de prueba.*
- [2] Documento técnico, *Eficiencia en sistemas de bombeo*, Comisión nacional del agua, pp. 5-10. México, 2003.
- [3] Ronald V. Giles, *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. editorial McGraw Hill de México. 1980.
- [4] Claudio Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, Segunda edición, Del Castillo S.A., pp. 113-125. 1986.
- [5] H.Iura, K. Ide, T. Hanamotom, and Z. Chen, *An Estimation Method of Rotational Direction and Speed for Free-Running AC Machines Without Speed and Voltage Sensor*, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, No. 1, pp. 153-159, Ene. 2011.
- [6] N. Roy, P. Purkait, K. Bhattacharya, Application of Wavelet and Fourier Transform for Vibration Analysis of Motor, IEEE Indicon conference India, 11-13. 2005.
- [7] V. C. Chancey, G. T. Flowers, *Identification of Transient Vibration Characteristics Using Absolute Harmonic Wavelet Coefficients*, Journal of Vibration and Control, vol 7, No. 1175. 2001.
- [8] G. Betta, C. Liguori, A. Pietrosanto *A Multi-Application FFT Analyzer Based on a DSP Architecture*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 3, pp. 825-832. (2001).

- [9] Chinmaya Kar, A.R. Mohanty, *Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 20, pp. 158-187. 2006.
- [10] G.K. Singh, S. A. K. S. Ahmed, *Vibration signal analysis using wavelet transform for isolation and identification of electrical faults in induction machine*, *Electric Power Systems Research*, vol. 68, pp. 119-136. 2004.
- [11] M. Ch. Pan, P. Sas, H. V. Brussel, *Machine condition monitoring using signal classification technique*, *Journal of Vibration and Control*, vol. 9, pp. 1103-1004. 2009.
- [12] J. Mitchell. *Machinery Analysis and Monitoring*, Pennwell Books, Second edition, Oklahoma, USA, pp. 134-160. 1993.
- [13] P. Hong, D. Anderson, D. Williams, J. Jackson, J. Echard. *DSP for Practicing Engineers: A Case Study in Internet Couser Delivery*. IEEE Transactions on Education, vol. 47, No. 3, pp. 301-310. Ene. 2004.
- [14] S. Huang, K. Tan, and T. Lee, *Automated fault detection and diagnosis in mechanical systems*, IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 37, No. 6, pp. 1360-1364, Nov. 2007.
- [15] A. Gardel, I. Bravo, J. Luis, and P. Revenga, *Remote Automation Laboratory Using a Cluster of Virtual Machines*, IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 57, No. 10, pp. 3276-3283, Oct. 2010.
- [16] J. Proakis, D. Manolakis, *Tratamiento Digital de señales*, Prentice Hall. 2005.
- [17] L. Karma, *Real-Time Digital Signal Processing*, Arizona State University. 2004.
- [18] F. Wang, C. K. Mechefske, *Adaptive modelling of transient vibration signals Mechanical Systems and Signal Processing*, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 20, pp. 825-842. Oct. 2006.
- [19] J. Montao, *Reviewing Concepts of Instantaneous and Average Compensations in Polyphase Systems*, IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 58, No. 1, pp. 213-217, Ene. 2011.
- [20] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Fourth edition, Mc Graw Hill, pp. 85-90. 2004.

- [21] Aller José Manuel, *Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la teoría general*, Primera edición, Editorial Equinoccio Universidad Simón Bolívar, pp. 110-117. 2008.
- [22] M.P. Kostenko, L.M. Piotrovski, *Máquinas Eléctricas*, Vol. I, Second edition, Editorial Mir, Moscu 1979.
- [23] H. Auinger *Determination and Designation of the Efficiency of Electrical Machines*, Power Engineering Journal, Feb. 1999.
- [24] EC 34-2, *Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests*. 2000.
- [25] Carnovale, Daniel J. *Power Factor Correction and Harmonic Resonance: A Volatile Mix*. Electrical Construction & Maintenance, Jun 1, 2003.
- [26] J. Montao, *Reviewing Concepts of Instantaneous and Average Compensations in Polyphase Systems*, IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 58, No. 1, pp. 218-220, Ene. 2011.
- [27] Claudio Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, Segunda edición, Del Castillo S.A., pp. 201-206. 1986.
- [28] X. Liang and O. Ilochonwu, *Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications*, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, No. 1, pp. 271-280, Ene. 2011.
- [29] A. Oppenheim, A. Willsky, S. Nawab. *Señales y Sistemas*, Segunda edición, Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 2000.
- [30] EC&M's Practical Guide to Quality Power for Sensitive Electronic Equipment.
- [31] S. A. S. Al Kazzaz., G.K. Singh, *Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques*, Electric Power Systems Research, vol. 65, pp. 197-221. 2003.
- [32] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Valeria Hrabobovcova, *Desing of Rotating Electrical Machines*, Jhon Wiley & Sons, Ltd, pp. 153-220. 2008.

- [33] Hamid A. Toliyat, Gerald B. Kliman, *Handbook of Electric Motors*, Second Edition, Revised and Expanded, Published by CRC Press Taylor and Francis Group, LLC, pp. 25-54. Jun. 2004.
- [34] P. Salmerón and J. C. Montao, *Instantaneous power components in polyphase systems under nonsinusoidal conditions*, Proc. Inst. Elect. Eng. Sci. Meas. Technol., vol. 143, No. 2, pp. 151-155, Mar. 1996.
- [35] P. Pandit, J. Mazumdar, T. May, and W. G. Kollner, *Real-Time Power Quality Measurements From a Conventional AC Dragline*, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 58, No. 1, pp. 213-220, Ene. 2011.
- [36] Aller José Manuel, *Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la teoría general*, Primera edición, Editorial Equinoccio Universidad Simón Bolívar, pp. 115-117. 2008.
- [37] Carnovale, Daniel J. *Power Factor Correction and Harmonic Resonance: A Volatile Mix*. Electrical Construction & Maintenance, Jun 1, 2003.
- [38] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, and M. Pastorelli, *Induction Motor Efficiency Measurements in accordance to IEEE 112-B, IEC 34-2 and JEC 37 International Standards*, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 3, No. 1, pp. 7803-7817, Ene. 2003.
- [39] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Valeria Hrabobovcova, *Desing of Rotating Electrical Machines*, Jhon Wiley & Sons, Ltd, pp. 153-220. 2008.
- [40] Wenping Cao, Keith J. Bradley and Azzeddine Ferrah, *Development of a High-Precision Calorimeter for Measuring Power Loss in Electrical Machines*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement., vol. 58, No. 3, Mar. 2009.
- [41] Degner, M.W., *Flux, Position and Velocity Estimation in AC Machines Using Carrier Frequency Signal Injection*, Ph.D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1998.