

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS ARMFIELD
FM20 DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA**

REALIZADO POR:

Br. Gabriela Cristina Tobía Rodríguez

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial
para optar al título de

INGENIERO MECÁNICO

PUERTO LA CRUZ, NOVIEMBRE DE 2008

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS ARMFIELD
FM20 DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA**

JURADO

El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

APROBADO

Prof. Yordy González

Asesor Académico

Prof. José E. Rengel.

Jurado Principal

Prof. Orlando Ayala.

Jurado Principal

PUERTO LA CRUZ, NOVIEMBRE DE 2008

RESOLUCIÓN

ARTÍCULO 44

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajo de grado de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

DEDICATORIA

Este logro va dedicado:

A una de las personas que más he amado en la vida y quien estoy segura estará feliz de compartir conmigo este momento. Para ti PAPÁ, que siempre fuiste mi amigo, mi consentidor y que ahora eres mi ángel y protector. Te amo y por siempre te amaré.

A mi MADRE, quien me dió el ser, vela cada uno de mis sueños, ha sido mi pilar, ejemplo de perseverancia y valor, motivo de admiración y quien me ha dado la fuerza para salir adelante. Estoy muy orgullosa de tí mami. Eres la mejor y te amo.

A mis hermanas SABRINA y MARÍA JOSÉ, quienes han estado a mi lado en todo momento y son el tesoro más grande que Dios y mis padres me han podido dar. Las quiero muchísimo.

A mis abuelos MALENA, AURORA Y JUAN, quienes me han brindado todo su amor y cariño. Y a mi abuelo JOSE a quien llevo siempre en mi mente y en mi corazón. Los quiero.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por sobre todas las cosas, por haber guiado cada uno de mis pasos para llegar hasta aquí. Gracias Señor.

A mis tías **Annie, Marlene e Isabel**, quienes han sido mis amigas, guías, cómplices y han estado a mi lado cuando más las he necesitado. Las quiero mucho, gracias.

A mis tíos **Elías, José Luis, Juan Carlos, Carlos Eduardo, Alfonso, Fernando, Julio y José Rafael**, gracias por todo el apoyo brindado para lograr esta meta. Cada día doy gracias a Dios por tenerlos a mi lado. Mil gracias.

A **Freddy Morón**, quien ha sido un gran apoyo durante este trabajo y con quien he compartido bonitos momentos. Gracias mi amor por tu cariño y comprensión. Te quiero mucho.

A mis amigos **Cesar, José, Manuel, Alex, Nestor, Henry, Irina, Krizia, Carla, Mervy y Marcelys**, quienes estuvieron conmigo a lo largo de mi carrera, y cuyo apoyo y cariño ha sido incondicional. Les deseo el mayor de los éxitos. Los quiero.

A mi amigo y compañero de trabajo **Víctor Faneite**, a quien le debo mucho en este proyecto y me ha apoyado en todo momento. Gracias Víctor, este triunfo también es tuyo.

A mi asesor y también amigo **Yordy González**, gracias por haberme guiado a lo largo de mi carrera y por la ayuda brindada en este proyecto. Mil Gracias.

Al profesor **José Guzmán** por su valiosa colaboración prestada para este proyecto.
Muchas Gracias

RESUMEN

En el siguiente proyecto se desarrolla la automatización del sistema de adquisición de datos del banco de pruebas Armfield FM20 de bomba centrífuga, con el fin de evaluar y conocer, mediante la obtención de gráficas, el funcionamiento y características del equipo. Las gráficas son generadas en un computador mediante la aplicación del software LabVIEW 8.20, quien registra los datos provenientes del sistema para mostrar las curvas de funcionamiento y parámetros medidos en el banco de pruebas. Este trabajo contempla la evaluación de las condiciones del banco, se implementa y adapta un sistema de adquisición de datos, se crea un entorno gráfico para el monitoreo de las variables, se obtienen y analizan las curvas características de la bomba, además de describir procedimientos para evaluar el comportamiento de la bomba centrífuga y el correcto manejo del equipo. Asimismo, se incluye documentación referente al banco de pruebas y a los elementos seleccionados para la automatización, diagramas, manuales y cálculos necesarios para cumplir con los objetivos del proyecto.

INDICE

RESOLUCIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vi
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	xi
1.1 GENERALIDADES:	xi
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 OBJETIVO GENERAL:	13
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	14
CAPÍTULO II: MARCO TEORICO	¡Error! Marcador no definido.
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN;	¡Error! Marcador no definido.
2.2 FUNDAMENTOS TEORICOS	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1 Banco de Pruebas	¡Error! Marcador no definido.
2.2.2 Sistemas de Bombeo	¡Error! Marcador no definido.
2.2.4 Terminología Básica en Bombas	¡Error! Marcador no definido.
2.2.5 Curvas Características de las Bombas Centrífugas;	¡Error! Marcador no definido.
2.2.6 Rendimiento de las Bombas.....	¡Error! Marcador no definido.

2.2.7 Variables	¡Error! Marcador no definido.
2.2.8 Instrumentación y control	¡Error! Marcador no definido.
2.2.9 Sistema de Control Automático	¡Error! Marcador no definido.
2.2.10 Señales	¡Error! Marcador no definido.
2.2.11 Sensores/Acondicionadores de Señales	¡Error! Marcador no definido.
2.2.12. Sistema de adquisición de datos (SAD)	¡Error! Marcador no definido.
2.2.13 Software LabVIEW	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	51
3.1 GENERALIDADES	51
3.2 DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS ARMFIELD FM20	51
3.2.1 Descripción de los Componentes de la Unidad:	51
3.2.2. Descripción de los Sensores/Acondicionadores de Señal	53
3.2.3. Descripción del Sistema de Adquisición de Datos	56
3.2.4 Características de los Componentes de la Unidad de Demostración	56
3.3 CONDICIONES ACTUALES DEL BANCO DE PRUEBAS.....	58
CAPÍTULO IV: ADAPTACIÓN DEL NUEVO SISTEMADE ADQUISICIÓN DE DATOS	¡Error! Marcador no definido.
4.1. GENERALIDADES	¡Error! Marcador no definido.
4.2 ADAPTACIÓN DE LOS SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL	¡Error! Marcador no definido.
4.2.1. Sensor de Presión Diferencial SPW1	¡Error! Marcador no definido.
4.2.2. Sensor de Presión Diferencial SPW3	¡Error! Marcador no definido.
4.2.3. Sensor de velocidad rotacional SSO1	¡Error! Marcador no definido.

4.2.4. Sensor de Temperatura STS1	¡Error! Marcador no definido.
4.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS SELECCIONADO	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1 Unidad de Voltaje	¡Error! Marcador no definido.
4.3.2 Tarjeta de Adquisición de Datos	¡Error! Marcador no definido.
4.3.3 Módulo de Adquisición de Datos.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4 UNIDAD DE PROCESAMIENTO	¡Error! Marcador no definido.
4.5 DISEÑO DEL ENTORNO GRÁFICO MEDIANTE EL SOFTWARE LabVIEW 8.20	¡Error! Marcador no definido.
4.5.1 Panel Frontal	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2 Diagrama de Bloques	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO V: RESULTADOS	91
5.1 GENERALIDADES	91
5.2 DATOS OBTENIDOS DEL BANCO DE PRUEBAS.....	91
5.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS FM20	93
5.3.1 Variables del Proceso en Función del Tiempo.....	94
5.3.2 Curva Altura-Caudal de la Bomba Centrífuga.....	99
5.3.3 Curva Potencia-Caudal de la Bomba centrífuga	100
5.3.4 Punto de Operación de la Bomba:.....	102
5.4 PROCEDIMIENTOS PARA EVALUAR Y DEMOSTRAR EL COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA	103
5.4.1 Práctica de Laboratorio	103
5.5 MANUAL DE OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	105
5.5.1 Pasos a Seguir Antes de Poner en Funcionamiento el Equipo:.....	106

5.5.2 Pasos Para Usar el Banco de Pruebas y el Sistema de Adquisición de Datos	106
RECOMENDACIONES	111
BIBLIOGRAFÍA	112
APENDICES.....	100

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades:

El avance de la tecnología en los últimos tiempos le ha dado a los procesos industriales otra perspectiva, desplazando en muchas oportunidades una ardua labor de mano de obra humana por la supervisión de los procesos a través de computadoras. Esto se ha logrado mediante la automatización de sistemas y procesos completos donde se programan los parámetros a seguir por los equipos, las tomas de muestras necesarias para llevar a cabo un trabajo en específico o el monitoreo del proceso para mantener su correcto funcionamiento.

Es importante tener noción de lo mencionado anteriormente, antes de entrar al campo laboral en industrias que manejen este tipo de sistemas, y es por ello que es necesario impartir un conocimiento acerca del tema en las aulas de clases, para lograr que el estudiante, futuro ingeniero a manejar procesos automatizados, tenga las bases y conocimientos necesarios con los que pueda defenderse y ser operario de ellos.

Una forma experimental de lograrlo es mediante bancos de pruebas de laboratorio que simulen procesos con equipos industriales como bombas, compresores, turbinas, etc., donde el estudiante además de adquirir los conocimientos fundamentales de funcionamiento y características de los equipos antes mencionados, se relacione con sistemas automatizados.

1.2 Planteamiento Del Problema

La mayoría de los procesos industriales requieren de la conducción y manejo de fluido de un lugar a otro, lo cual se logra mediante sistemas que incluyen redes de tuberías, accesorios, instrumentos de medición y máquinas de bombeo, entre otros. A su vez, el estudio de estos sistemas, llamados sistemas de bombeo, en la Ingeniería Mecánica, es fundamental por el amplio campo de aplicación, y que los conocimientos que puedan adquirirse en esta rama de la ingeniería son valiosos para la preparación del futuro ingeniero.

La bomba centrífuga es uno de los medios mecánicos para lograr la conducción de fluido. Este tipo de bomba transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía requerida por el fluido para llegar al punto deseado. La fuerza centrífuga producida depende tanto de la velocidad en la punta de los álabes o periferia del impulsor como de la densidad del líquido. Este tipo de bombas constituyen no menos del 80% de la producción mundial de bombas, por poseer un amplio campo de aplicación. ^[1]

Por otra parte, el crecimiento y perfeccionamiento de los procesos industriales, van ligados con las mejoras de los equipos que lo conforman y con un mayor conocimiento del funcionamiento del proceso. También, la automatización de estos sistemas, ha sido, en las últimas décadas, objetivo fundamental en las grandes empresas, ya que permite monitorear y controlar las variables que intervienen en un proceso dado, permitiendo una mayor capacidad de análisis del funcionamiento del sistema.

En el Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Mecánica de la Universidad de Oriente del Núcleo de Anzoátegui, se encuentra un banco de pruebas marca ARMFIELD modelo FM 20 de una bomba centrífuga. La misma, era utilizada

con fines educativos para el análisis de las curvas características de una bomba centrífuga a distintas velocidades de operación.

En la actualidad, dicho banco de pruebas (FM 20), no puede ser utilizado debido a daños en el sistema de medición y toma de datos, así como también fugas de fluidos en diversos componentes del banco, como consecuencia de un mal manejo. Por tal razón, en el presente trabajo se pretende, automatizar el banco de pruebas de la bomba, aplicando la herramienta LabVIEW 8.20 para la creación del interfaz gráfico, además de reparar las fugas presentes tanto en las tuberías como en el tanque de almacenamiento, remodelar los sensores y componentes que lo requieran, para finalmente ponerlo en funcionamiento mediante la instalación de un nuevo sistema de adquisición de datos con el que se permita obtener las curvas de funcionamiento de la bomba centrífuga.

Con la realización de este proyecto se persigue, reacondicionar y poner en funcionamiento el banco de pruebas de bomba centrífuga como un sistema automatizado, semejante al utilizado actualmente en la industria, que permita al estudiante de Ingeniería Mecánica, conocer el funcionamiento y curvas características de la bomba, así como también, familiarizarlo con sistemas automáticos, con los cuales posiblemente se enfrente en su desempeño laboral, para así continuar con los fines educativos del equipo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

Automatizar el banco de pruebas ARMFIELD FM 20, de una bomba centrífuga para la obtención de las curvas de funcionamiento del equipo.

1.3.2 Objetivos Específicos:

1. Identificar las condiciones en las cuales se encuentra el banco de pruebas ARMFIELD FM 20 ubicado en el Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Mecánica de la Universidad de Oriente.
2. Implementar un nuevo sistema para la adquisición de datos del banco de pruebas, basándose en criterios, parámetros y características de los procesos y sistemas de medición.
3. Adaptar el nuevo sistema de adquisición de datos a los componentes sensor/condicionador de señales del banco de pruebas de la bomba centrífuga.
4. Crear, mediante la herramienta LabVIEW 8.20, el entorno gráfico que permita el monitoreo de las variables medidas en el banco de pruebas.
5. Obtener las curvas características de la bomba centrífuga, bajo distintas condiciones de operación.
6. Describir procedimientos con los cuales se evalúe y demuestre el comportamiento de la bomba centrífuga.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes De La Investigación

Entre los antecedentes relacionados con el trabajo de investigación, se destacan:

- González, Y. ^[2] En este trabajo se automatizó el sistema de adquisición de datos de un banco de pruebas de una bomba recíproca de tipo pistón, con el cual se obtienen las curvas de funcionamiento del equipo, se determinó un nuevo sistema de adquisición de datos, se construyó una fuente de voltaje para suplir de alimentación los sensores del banco y la entrada a la tarjeta de adquisición de datos y se creó la interfaz que permite una buena comunicación entre los sensores, los acondicionadores de señales, la fuente de voltaje y la tarjeta de adquisición de datos de la National Instruments.
- Crespo, M. ^[3] En esta tesis se demostró de modo experimental, los métodos de programación de tiempo real aplicados a una arquitectura basada en Procesadores de Señales Digitales (DSP) conectados en red y combinados con dispositivos de lógica programable FPGA como coprocesadores, que constituyen una estrategia válida y eficiente para implementar sistemas de adquisición y procesamiento masivo de datos con exigencias severas de performance, flexibilidad y respuesta en tiempo real.
- López, J. ^[4] La importancia de este trabajo es la aplicación del Software que controla la medida, registra, genera archivo de impresión, revisa y calibra los

- sensores que miden la intensidad de un campo magnético para diversos montajes experimentales, ya sean de carácter investigativo o didáctico, además posicionar un sensor de efecto Hall en el punto preciso para la medida.

2.2 Fundamentos Teóricos

2.2.1 Banco de Pruebas

Los ensayos de las bombas y la obtención de sus curvas características en los laboratorios de hidráulica se llevan a cabo en bancos de pruebas, los cuales brindan acceso directo al proceso y permiten reproducir de manera controlada las condiciones en las que estarán operando tanto las máquinas como las tuberías y accesorios en condiciones reales. ^[5]

Algunos elementos que contiene un banco de pruebas de bombeo son los siguientes:

- Grupo de accionamiento a velocidad variable. En los laboratorios de hidráulica se utiliza para ello el motor de corriente continua, motor de corriente alterna con transmisión hidráulica o mecánica.
- Medidor de par. Los dos procedimientos más utilizados para medir el par de reacción son: el motor de corriente continua basculante y el torsiómetro.
- Cuentarrevoluciones. Para medir el número de revoluciones (n).
- Manómetro a la salida y entrada de la bomba para medir la diferencia de presiones necesaria para el cálculo de la altura de carga (H).

- Medidor de caudal. Los procedimientos más utilizados son: tanques volumétricos (medición de caudal por volumen), tanques gravimétricos (medición de caudal por peso), venturi, toberas, rotámetros, placa orificio, etc.
- Termómetro. Para medir la temperatura del agua en los ensayos de cavitación.



Fig. 2.1. Banco de pruebas de bomba centrífuga FM 20 ubicado en el Laboratorio de Termodinámica de la Universidad de Oriente. [Fuente: catálogo de equipos Armfield]

2.2.2 Sistemas De Bombeo

La acción de bombeo es la adición de energías cinética y potencial a un líquido con el fin de moverlo de un punto a otro. Esta energía hará que el líquido efectúe trabajo, tal como circular por una tubería o subir a una mayor altura. ^[1]

Este proceso se lleva a cabo por medio de máquinas denominadas bombas, que según su principio de funcionamiento se dividen en:

Bombas de desplazamiento positivo: su principio se basa en guiar el fluido que se desplaza a lo largo de su trayectoria, y que experimenta, en su paso a través de la máquina, variaciones de presión, gracias a los desplazamientos de volumen en el órgano de retención. [5]

Bombas rotodinámicas: son máquinas que manejan fluidos, en las cuales el intercambio de energía (de la máquina al fluido) es debido a la variación del momento cinético del fluido al paso por los conductos de un órgano, que se mueve con movimiento de rotación dotado de álabes o paletas que se denomina rotor.

Una bomba sólo puede funcionar dentro de un sistema. Para suministrar un volumen dado de líquido en este sistema, la bomba debe entregar al líquido, una energía para satisfacer los siguientes componentes:

- Carga estática, que es la diferencia en elevación entre los niveles del líquido en los puntos de descarga y de succión de la bomba.
- Diferencia en presiones en las superficies de los líquidos en recipientes de succión y suministro.
- Carga de fricción, necesaria para contrarrestar las pérdidas por fricción ocasionadas por el flujo del líquido en la tubería, válvulas, accesorios y otros componentes como intercambiadores de calor. Estas pérdidas varían más o menos proporcionalmente al cuadro de flujo en el sistema.
- Pérdida en la entrada y la salida, cuya magnitud depende del diseño de la entrada al tubo.

2.2.3 Bombas Centrífugas

En una bomba centrífuga, el líquido es forzado por la presión atmosférica u otra hacia un grupo de paletas en rotación que viene a ser un impulsor que descarga el líquido a una presión más alta y a mayor velocidad en su periferia. Luego, la mayor parte de la energía de velocidad se convierte en energía de presión por medio de una voluta (bombas de voluta) o con un grupo de paletas de difusión estacionarias (bombas de difusor) que rodean la periferia del impulsor.^[7]

Los elementos de que consta una instalación de bomba centrífuga son:

a) Una tubería de aspiración, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.

b) El impulsor o rodete, formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas (según la misión a que vaya a ser destinada la bomba) y que giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba.

c) La voluta es un órgano fijo que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. Su misión es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

d) Una tubería de impulsión, instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba.^[8]

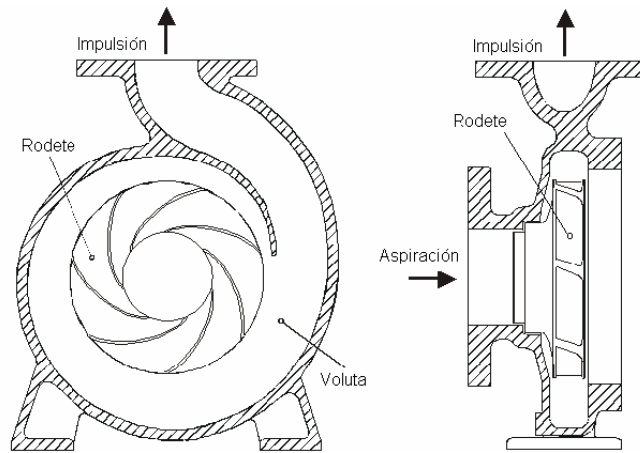


Fig. 2.2. Elementos constituyentes de una bomba centrífuga
[Fuente: Universidad de Cantabria, “Máquinas Hidráulicas”]

Las bombas centrífugas se dividen en diversas categorías, de las cuales en su mayoría dependen del impulsor. En primer lugar, los impulsores se clasifican de acuerdo a la dirección principal del flujo con respecto al eje de rotación, de allí que las bombas centrífugas pueden tener impulsores de flujo radial, axial y mixto.^[7]

Además se clasifican de acuerdo a la disposición del flujo en bombas centrífugas de succión sencilla con una sola entrada en un lado; de succión doble, en que el agua fluye en forma simétrica hacia el impulsor desde ambos lados. Si la bomba es del tipo en la cual la carga o elevación se desarrolla con un impulsor sencillo, la bomba se llama de una etapa; y de etapas múltiples cuando se emplean dos o más impulsores que funcionen en serie.

La finalidad básica de una bomba centrífuga, en cualquier sistema para manejo de fluidos, es agregarle energía al fluido y dado que la bomba es una máquina dinámica, depende por completo de los cambios en las relaciones de velocidad para

producir la energía. Dado que la prueba mensurable de la adición de energía es, en casi todos los casos, en la forma de presión estática, ella es parcialmente el resultado de las reducciones de velocidad y de las restricciones que ocurren en el difusor o en la carcasa y hasta ese grado representa una conversión de la energía de velocidad producida por el impulsor.

2.2.4 Terminología Básica En Bombas

Los términos básicos utilizados para definir y por lo tanto medir el funcionamiento de las bombas son:

1. Descarga o caudal
2. Cabeza
3. Potencia y Eficiencia

2.2.4.1 Descarga

También llamado caudal o capacidad de una bomba, es el volumen de líquido bombeado por unidad de tiempo. La medición del caudal de fluidos, constituye uno de los aspectos más importantes del control de procesos industriales. ^[9]

El valor de un caudal se determina midiendo generalmente la velocidad del fluido que pasa por una conducción de sección determinada. Mediante este procedimiento indirecto lo que se logra medir es el caudal volumétrico (Q_v) que en su forma más simple sería:

$$Q_v = V * A \quad (2.1)$$

Donde:

A: es la sección transversal del tubo (m²)

V: la velocidad lineal del fluido (m/s)

El método más común de medición de flujo en los procesos es a través de medidores de flujo diferenciales como lo son: la placa orificio, el tubo venturi, el tubo pitot, la tobera y el medidor de impacto (target). Estos miden el flujo de un fluido indirectamente, creando y midiendo una presión diferencial por medio de una obstrucción al flujo. El principio de operación se basa en medir la caída de presión que se produce a través de una restricción que se coloca en la línea de un fluido en movimiento, esta caída de presión es proporcional al flujo, y se expresa de la siguiente forma:

$$Q_v = \frac{C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot dp_o}}{\rho} \quad (2.2)$$

Donde:

Cd: es el coeficiente de descarga en el instrumento de medida

A: es la sección transversal de la tubería (m²)

dp_o: es el diferencial de presión medido por el instrumento (Pa)

2.2.4.2 Cabeza

El término cabeza se refiere a la elevación de una superficie libre del agua sobre o debajo de un dato de referencia. La energía proporcionada por una bomba a un sistema se expresa como la cabeza equivalente del líquido que está siendo bombeado y se conoce como la cabeza total de la bomba. La cabeza total es la diferencia entre la cabeza de energía total a la salida y la cabeza de energía total a la entrada.

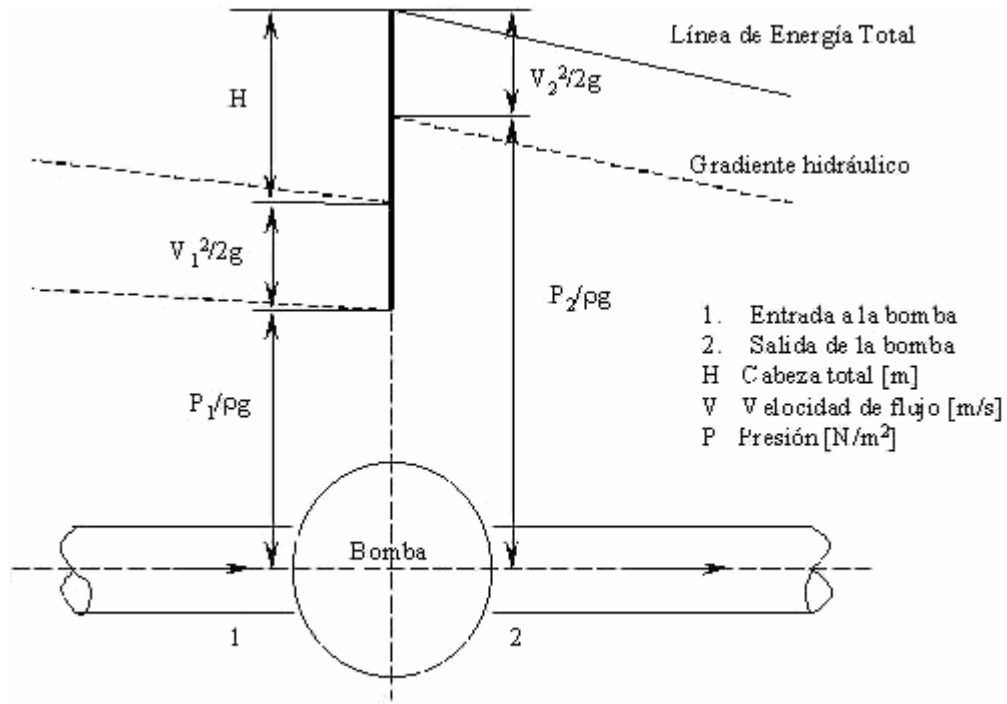


Fig. 2.3. Definición de cabeza a través de una bomba
 [Fuente: Armfield. “Manual de instrucción FM20”]

Por ejemplo, para la figura 2.3, donde la entrada y salida de la bomba se establecen en el mismo sistema de referencia, la cabeza total de la bomba viene dada por:

$$H = \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \quad (2.3)$$

De encontrarse la entrada a la bomba a un nivel distinto al de la salida de la bomba, la cabeza total se expresa como:

$$H = (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \quad (2.4)$$

Siendo $Z_2 - Z_1$ la diferencia de altura entre la entrada y salida de la bomba.

2.2.4.3 Potencia Y Eficiencia

La potencia P consumida por el fluido al producir la cabeza total dinámica de la bomba H a la descarga, es dada por la siguiente ecuación:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.5)$$

Donde:

ρ : es la densidad del fluido (Kg/m^3)

g : gravedad (m/s^2)

Q : Caudal (m^3/s)

Sin embargo, las pérdidas por fricción del fluido en la bomba influyen en la eficiencia hidráulica E_h que se define como:

$$E_h = \frac{\text{Potencia útil absorbida por el fluido}(P_u)}{\text{Potencia dada por el impulsor}(P_h)} * 100\% \quad (2.6)$$

Además las pérdidas mecánicas en los cojinetes, etc., requieren una eficiencia mecánica E_m definida como:

$$E_m = \frac{\text{Potencia dada por el impulsor}(P_h)}{\text{Potencia dada al impulsor}(P_m)} * 100\% \quad (2.7)$$

Existe otra eficiencia expresando las pérdidas electromecánicas en el motor definida por la siguiente ecuación:

$$E_e = \frac{\text{Potencia dada al impulsor (Ph)}}{\text{Potencia dada al motor (P}_h\text{)}} * 100\% \quad (2.8)$$

De allí que la eficiencia total se definiría entonces como:

$$E_T = \frac{\text{Potencia útil absorbida por el fluido(Pu)}}{\text{Potencia dada al motor (Pgr)}} * 100\% \quad (2.9)$$

$$E_T = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_{gr}} * 100\%$$

2.2.5 Curvas Características De Las Bombas Centrífugas

Una curva de bombeo o curva característica de una bomba, es una representación gráfica de una característica específica del rendimiento de una bomba. Interpretar estas gráficas es de utilidad, tanto para especificar las bombas para una aplicación, como para determinar si una bomba que ya ha sido instalada está rindiendo al nivel de su capacidad. En este tipo de mecanismos las características operativas más importantes para su selección y definición de comportamiento se pueden resumir en tres relaciones:^[8]

- Flujo volumétrico y cabeza (energía proporcionada al fluido)
- Flujo volumétrico y potencia
- Flujo volumétrico y eficiencia.

A continuación se muestran ejemplos de curvas características de bombas, las cuales señalan la cabeza, eficiencia y potencia, en función del caudal manejado por la bomba (fig. 2.4).

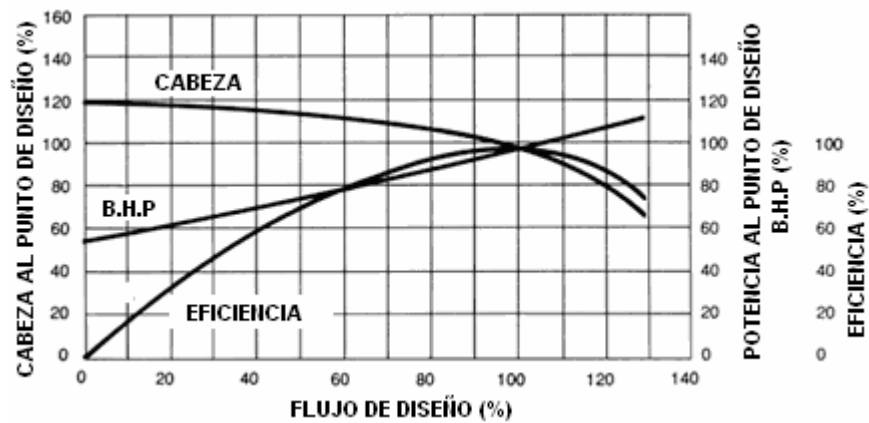


Fig.2.4. Curvas características de una bomba [Fuente:www.monografias.com]

El punto de operación de una bomba (ver figura 2.5) es aquel donde su curva característica se intercepta con la curva característica del sistema, y es de carácter fundamental a la hora de seleccionar una bomba para funcionar en un proceso dado. Esta curva del sistema es la que representa el comportamiento de todo el sistema en cual se encuentra la bomba instalada.

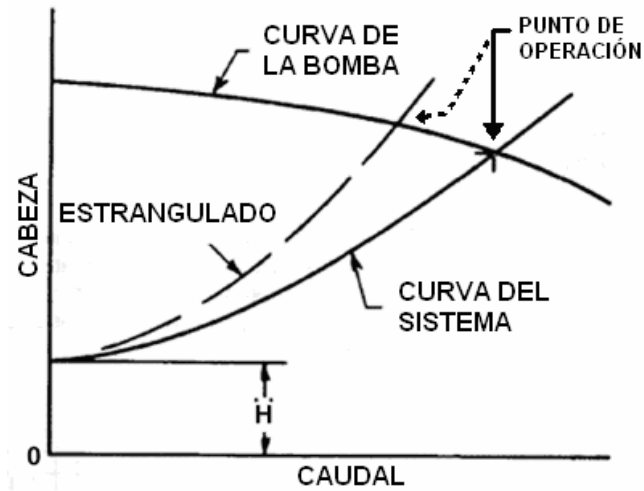


Fig. 2.4. Comportamiento del conjunto sistema-bomba, enfatizando en el punto de operación de la bomba [Fuente:www.monografias.com]

2.2.6 Rendimiento De Las Bombas

El rendimiento hidráulico de una bomba centrífuga incluye tres factores básicos:

- 1) la capacidad (expresada en unidad de volumen por unidad de tiempo, como gpm)
- 2) la carga total (expresada en unidades de longitud del líquido que se bombea),
- 3) la velocidad a la cual funciona la bomba (generalmente expresada en RPM).

El rendimiento o comportamiento de la bomba se presenta en forma de curvas (Fig. 2.5). La curva también indica el caballaje al freno requerido con diversos flujos y la eficiencia correspondiente de la bomba. La capacidad a la cual la bomba trabaja con más eficiencia se llama punto de máxima eficiencia.

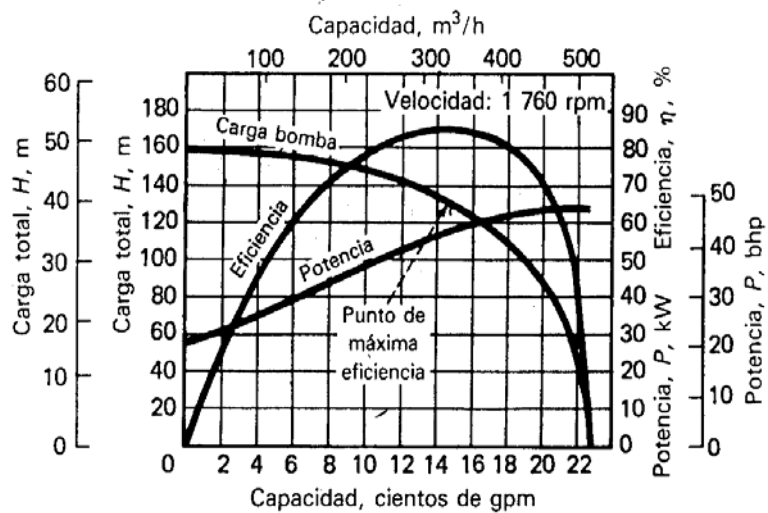


Fig. 2.5. Características de Rendimiento de una bomba centrífuga
[Fuente: McNaughton, K. Bombas – selección, uso y mantenimiento]

El trabajo útil que hace la bomba es el peso del líquido bombeado en un periodo, multiplicado por la carga producida por la bomba y se expresa en términos de caballaje, llamados caballos de agua (*WHP*). Sería más correcto llamar a *WHP* caballos de líquido, que se determinan con:

$$WHP = \frac{QH(sp.gr)}{3960} \quad (2.10)$$

donde:

WHP = caballos de agua,

Q = capacidad de la bomba, gpm

H = carga total, ft.

sp.gr = gravedad específica

La potencia requerida para la propulsión de la bomba son los caballos de agua divididos entre la eficiencia (η) de la bomba. Por lo tanto al dividir la ecuación anterior entre esta eficiencia se tiene:

$$BHP = \frac{QH(sp.gr)}{3960.\eta} \quad (2.11)$$

Las relaciones que permiten predecir el rendimiento de una bomba a una velocidad que no sea la de característica conocida de la bomba, se llaman leyes de similitud. Cuando se cambia la velocidad:

1. La capacidad Q en cualquier punto dado en la característica de la bomba varía directamente con la velocidad n .
2. La carga H varía en razón directa al cuadrado de la velocidad.
3. El caballaje al freno P varía en razón directa al cubo de la velocidad.

En otras palabras, si se asigna el subíndice 1 a las condiciones en las cuales se conocen las características y el subíndice 2 denota las condiciones a alguna otra velocidad, entonces:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} ; \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 ; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (2.12)$$

Estas relaciones se pueden utilizar sin peligro para cambios moderados en la velocidad. Las ecuaciones (3) quizá no sean igual de exactas para cambios grandes en la velocidad.

Hay leyes de similitud y semejanza similares para los cambios en el diámetro D del impulsor, dentro de límites razonables de reducción del impulsor. En otras palabras:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1} ; \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 ; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \quad (2.13)$$

Cabe destacar que generalmente ocurren ciertas desviaciones de estas leyes incluso con reducciones más o menos pequeñas de diámetro de impulsor.

2.2.7 Variables

Las cantidades o características que se miden (las cuales sirven de base de control) se denominan variables, generalmente reciben el nombre de variables de medición, variables de instrumentación o variables de procesos. Dichas variables pueden clasificarse, según el campo a la cual están dedicadas en: variables térmicas (como la temperatura, calor específico, valor calorífico, etc.), variables de radiación (nuclear y electromagnéticas), variables de fuerza, velocidad, cantidad, tiempo, geométricas, variables de propiedades físicas (como densidad y peso específico, viscosidad), variables de composición química y variables eléctricas. ^[10]

La medición de las cantidades involucradas permite controlar el proceso, como por ejemplo: agregando otro componente a determinada mezcla a realizar, reduciendo o incrementando la temperatura y/o presión, en fin, permite tomar decisiones acerca del paso siguiente para lograr un objetivo.

En el control de procesos, las variables son conocidas como variable controlada y variable manipulada. La variable controlada es la variable del proceso que es medida para mantenerse o controlarse en un valor deseado. La variable manipulada es la cantidad o condición variada por el controlador y que se utiliza para

mantener a la variable controlada en su punto de fijación (punto de control o régimen) corrigiendo o limitando las desviaciones de la variable medida al valor deseado.

2.2.8 Instrumentación Y Control

La instrumentación es el grupo de elementos que sirven para medir, controlar o registrar variables de un proceso con el fin de optimizar los recursos utilizados en éste. ^[9]

La instrumentación es lo que ha permitido el gran avance tecnológico de la ciencia actual en casos tales como viajes espaciales, la automatización de los procesos industriales y muchos otros de los aspectos de nuestro mundo moderno; ya que la automatización es solo posible a través de elementos que puedan sentir lo que sucede en el ambiente, para luego tomar una acción de control pre-programada que actúe sobre el sistema para obtener un resultado previsto.

2.2.8.1 Características De Los Instrumentos.

Los instrumentos de medición poseen ciertas características y lineamientos que deben seguirse y tomarse en cuenta para la obtención de una medida correcta. Entre las características más importantes se definen las siguientes:

2.2.8.1.1 Campo de medida: espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento; viene expresado estableciendo los dos valores extremos. ^[11]

2.2.8.1.2 Alcance: es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.

2.2.8.1.3 Error: es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado error estático. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato. Siempre que las condiciones sean dinámicas, existirá en mayor o menor grado el llamado error dinámico (diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el indicado por el instrumento): su valor depende del tipo de fluido del proceso, de su velocidad, del elemento primario, de los medios de protección, etc. El error medio del instrumento es la medida aritmética de los errores en cada punto de medida determinados para todos los valores crecientes y decrecientes de la variable medida.

2.2.8.1.4 Incertidumbre de la medida: los errores que existen necesariamente al realizar la medida de una magnitud, hacen que se tenga una incertidumbre sobre el verdadero valor de la medida. La incertidumbre es la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud de la medida. En el cálculo de la incertidumbre intervienen la distribución estadística de los resultados de series de mediciones, las características de los equipos, etc.

2.2.8.1.5 Exactitud: es la cualidad del instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.

2.2.8.1.6 Precisión: se denomina precisión a la capacidad que posee un instrumento para dar el mismo resultado en medidas diferentes realizadas en las mismas condiciones. Esta cualidad debe evaluarse a corto plazo. No debe confundirse con exactitud ni con reproducibilidad.

2.2.8.1.7 Zona muerta: es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento de alcance de la medida.

2.2.8.1.8 Sensibilidad: es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene expresada en tanto por ciento de alcance de la medida.

2.2.8.1.9 Repetibilidad: es la capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma o del índice o de la señal de salida, del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo.

2.2.8.1.10 Histéresis: es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o la pluma del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente.

2.2.8.1.11 Trazabilidad: propiedad del resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, tal que puede relacionarse con patrones nacionales o internacionales, mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones, con todas las incertidumbres determinadas.

2.2.8.1.12 Ruido: cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseada que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.

2.2.8.1.13 Linealidad: es la aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada.

2.2.8.2 Instrumentación Para El Control

Los elementos típicos de un sistema de control son los sensores, transmisores, controladores (analógicos y digitales), y válvula de control. Los dispositivos que se encuentran en el equipo de proceso (en el campo) son los sensores, transmisores y válvula de control. Por lo regular, el controlador esta ubicado en un panel o en una computadora en el cuarto de control, el cual está ubicado distante de los equipos de procesos. ^[12]

2.2.8.2.1 Sensores

se han desarrollado infinidad de instrumentos para “sensar” muchas propiedades. El sensado de la variable se realiza al inicio del lazo de control y a este dispositivo se le denomina sensor. Las variables a sensar más importantes son flujo de fluidos, temperatura, presión y nivel. También existen dispositivos para medir otras propiedades, tales como: pH, densidad, viscosidad, absorción infrarroja y ultravioleta e índice refractivo.

2.2.8.2.2. Transmisores

El transmisor es la interfase entre el proceso y el sistema de control. El trabajo del transmisor es convertir la señal del sensor (milivoltios, movimiento mecánico, presión diferencial, etc.) en una señal de control (por ejemplo, 4 a 20 mA).

La respuesta dinámica de la mayoría de los transmisores es por lo regular mucho mas rápida que la del proceso y de las válvulas de control. Por lo tanto, se puede considerar al transmisor como una “ganancia” (un cambio escalón en la entrada del transmisor produce un cambio similar en la salida). Es decir, se puede

considerar al transmisor como una “transductor” que convierte la variable de proceso en una señal equivalente de control.

2.2.8.2.3. Controladores Analógicos Y Digitales

El controlador es la parte del lazo de control del que más se ocupa un ingeniero de control. El trabajo del controlador es comparar la señal del proceso del transmisor con la señal del setpoint, para mandar una señal apropiada al elemento final de control.

Los controladores analógicos usan señales electrónicas o neumáticas continuas. El controlador ve las señales del transmisor continuamente, por lo tanto, las válvulas de control actúan continuamente.

Los controladores de las computadoras digitales funcionan de forma discontinua a través de un número de vueltas secuencial del lazo de control. Cada vuelta individual esta asociada con una toma de la muestra (sampling period). Deben enviarse las señales analógicas de los transmisores a través del conversor analógico digital (A/D) de tal manera se puede introducir la información en un formato que la computadora puede reconocer. Después de que la computadora realiza sus cálculos (el algoritmo del mando), manda una señal a través de un conversor digital analógico (D/A) y mantener (hold) la señal que envía como señal continua a la válvula de control.

2.2.8.2.4. Válvulas De Control

La interfase con el proceso en el otro extremo del lazo de control se realiza con el elemento final de control, el cual esta representado en la mayoría de las plantas de

procesos por una válvula automática de control que estrangula el flujo de la variable manipulada.

Las válvulas de control se diseñan para que tomen una acción al momento de existir una falla, de tal manera que al fallar por ejemplo, el fluido eléctrico, queden o completamente cerrada o completamente abiertas según sea la condición segura del proceso. La acción correcta depende del efecto de la variable manipulada en el proceso.

2.2.9 Sistema De Control Automático

Un sistema de control de proceso tiene como objetivo utilizar la variable manipulada para mantener a la variable controlada en el punto de control a pesar de las perturbaciones. La automatización de este tipo de sistemas no es más que contar con instrumentos que controlen las variables sin necesidad de que intervenga el operador. Las razones de la automatización de las plantas de procesos son proporcionar un entorno seguro y a la vez mantener la calidad deseada del producto y alta eficiencia de la planta con reducción de la demanda de trabajo humano.

2.2.10 Señales

La cuantificación de las cantidades (variables) se realiza a través de dispositivos que emiten señales dependientes por lo general del cambio en la cantidad involucrada, definiéndose entonces la señal como un estímulo externo o interno a un sistema que condiciona su comportamiento.

Las señales que se usan para la comunicación entre los instrumentos de un sistema de control son principalmente de tres tipos: neumática, eléctrica y digital o discreta.

Señal neumática o presión de aire: normalmente abarca entre 3 y 15 Psig, con menor frecuencia se usan señales de 6 a 30 Psig o de 3 a 27 psig; su representación usual en los diagramas de instrumentos y tubería es -//--//-.

Señal eléctrica o electrónica: normalmente toma valores de entre 4 y 20 mA, con menor frecuencia de uso están de 10 a 50 mA, de 1 a 5 V o de 0 a 10 V; la representación usual de esta señal es -----.

Señal digital o discreta: el uso de computadoras grandes, minicomputadoras o microprocesadores está forzando el uso cada vez mayor de este tipo de señal.

Las señales se clasifican en: tiempo continuo y tiempo discreto. La primera está definida para todo tiempo t , mientras que la segunda se define sólo para instantes discretos de tiempo. De la misma forma, los sistemas se clasifican en analógicos y digitales. Para realizar la conexión entre instrumentos que manejen señales diferentes, una de ella debe ser convertida en otra, empleando convertidores bien sea analógico-digital (A/D) o digital-analógico (D/A).^[13]

La conversión de señales analógicas en señales digitales se realiza en tres etapas: el muestreo, la cuantificación y la codificación. El muestreo es un proceso en el que se transforma una señal de entrada continua en el tiempo y de banda limitada, en una señal discreta en el tiempo y continua en el dominio de las amplitudes, es decir, una serie temporal. El muestreo es un proceso lineal, no exclusivo de la conversión A/D sino presente también, por ejemplo, en sistemas multiplexado por división del tiempo y en la comunicación por impulsos modulados en amplitud.

Para la mayoría de las mediciones, el cambio en la variable que se mide se transforma en el cambio de alguna otra variable (señal de medición), la cual a su vez opera el dispositivo e inicia la acción de control o puede convertirse en una señal de

medición. Así por ejemplo, la medición de flujo utilizando una placa orificio o un tubo Venturi (elemento primario) desarrolla una presión diferencial (señal de medición), la cual puede operar directamente un indicador, registrador o puede convertirse en una segunda señal de medición (neumática o eléctrica) que operará al dispositivo. La señal (analógica) eléctrica o neumática en los dispositivos modernos se convierte en una señal digital que a su vez puede enviarse a una computadora u otro dispositivo de control. La señal analógica se remite a un transductor, que es un dispositivo que tiene la misión de recibir energía de una naturaleza eléctrica, mecánica, acústica, etc., y suministrar otra energía de diferente naturaleza, pero de características dependientes de la que recibió, como ejemplo: un convertidor analógico - digital (CAD).^[10]

2.2.11 Sensores/Acondicionadores de Señales

Los sensores, son elementos de un sistema que lo conectan con su entorno físico. La función de los sensores es obtener señales eléctricas en respuesta a magnitudes de entrada no eléctricas. Según la forma de su señal de salida los sensores pueden ser analógicos o digitales. El acondicionamiento de la señal de salida de los sensores digitales es mucho más simple que la de los analógicos, pero son pocos los dispositivos capaces de dar una salida digital en respuesta a una magnitud física de entrada. Los más comunes son los codificadores de posición, que son sensores de desplazamiento lineal o angular que consisten en una regla o disco codificado con zonas dotadas de una propiedad (conducción eléctrica, transparencia óptica, magnetización) y un sistema de lectura sensible a dicha propiedad.^[14]

Para aprovechar el margen dinámico de salida del convertidor analógico-digital (CAD), el margen de amplitudes de la señal debe coincidir con el de entrada del convertidor. Para ello hay que amplificar la salida del sensor, pero evitando la saturación del amplificador. Al mismo tiempo, hay que hacer compatible la salida del

sensor con la entrada del CAD. Esta última suele ser unipolar y con impedancia de 1 a 10 k Ω , mientras que la salida del sensor puede ser diferencial o de alta impedancia.

Los circuitos de acondicionamiento de la señal de entrada se encargan de la amplificación, filtrado y adaptación de la señal del sensor al CAD u otro tipo de etapa posterior. Deben estar protegidos frente a sobretensiones, en particular si están separados de los sensores. Pueden realizar también funciones de procesamiento como son la linealización de sensores, la diferenciación e integración de señales, la detección de fallos, la comparación con límites y otras más complejas. Además si los sensores necesitan una señal de alimentación externa, los circuitos de acondicionamiento de señal deben proporcionársela.

2.2.12. Sistema de adquisición de datos (SAD)

Para llevar a cabo un control eficaz sobre un determinado proceso, se hace necesario captar una serie de datos para, posteriormente, analizarlos, tratarlos, almacenarlos y llevar a cabo una presentación clara y eficaz de la evolución de dicho proceso. Generalmente, los datos o variables que se han de captar tienen un carácter analógico, mientras que su tratamiento, almacenamiento y análisis son mucho más eficaces cuando se hace digitalmente. Esto implica una serie de *módulos electrónicos* que permitan llevar a cabo una transformación de los datos desde el campo analógico al campo digital, sin que por ello se deban perder aspectos fundamentales para el proceso que se desea controlar. ^[15]

Al conjunto de los diferentes módulos electrónicos que permiten llevar a cabo la transformación anterior se le denomina Sistema de Adquisición de Datos (SAD), siendo su estructura general la mostrada en la figura 2.7.

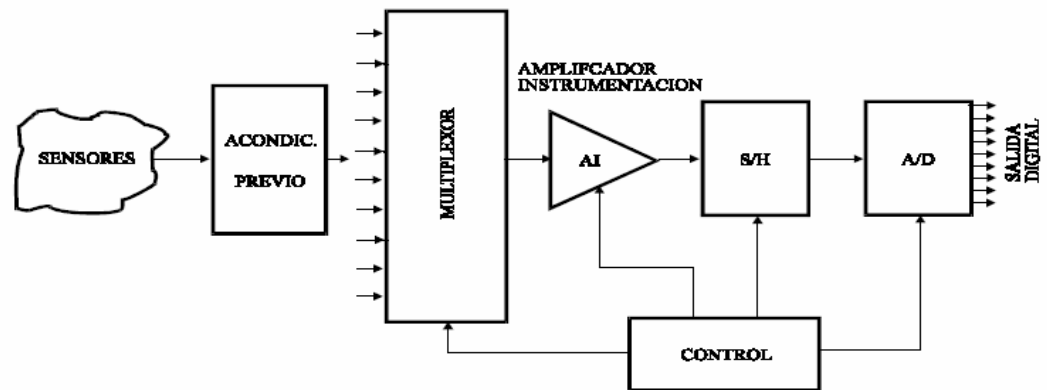


Fig. 2.7 Diagrama de bloques de un SAD genérico

[Fuente: Pallas, A. “Adquisición y distribución de señales”]

Sensores o transductores: Son los encargados de convertir la variable física a medir (temperatura, humedad, presión, etc.) en señal eléctrica. Esta señal eléctrica suele ser de muy bajo nivel, por lo que generalmente se requiere un *acondicionamiento previo*, consiguiendo así niveles de tensión/corriente adecuados para el resto de los módulos del SAD.

Amplificador de instrumentación: La función de este bloque es amplificar la señal de entrada del SAD para que su margen dinámico se aproxime lo máximo posible al margen dinámico del conversor A/D (ADC) consiguiéndose de esta forma máxima resolución. En SAD con varios canales de entrada, cada canal tendrá un rango de entrada distinto, con lo que será necesario que este amplificador sea de ganancia programable.

S & H (*Sample & Hold*, Muestreo y Retención): Este circuito es el encargado de tomar la muestra del canal seleccionado (*sample*) y mantenerla (*hold*) durante el tiempo que dura la conversión. Este circuito será necesario, siempre que la señal de entrada sufra variaciones apreciables durante el tiempo que dura la conversión. Si el ADC posee su propio circuito S & H, no será necesario añadirlo a su entrada.

ADC (Conversor A/D): Se encarga de realizar la conversión analógico/digital propiamente dicha, proporcionando un código digital de salida que representa el valor de la muestra adquirida en cada momento. Es uno de los módulos fundamentales en cualquier SAD y sus características pueden condicionar al resto de los módulos/circuitos del sistema.

2.2.12.1 Parámetros Característicos

Los parámetros que caracterizan a un SAD son básicamente tres: número de canales, exactitud de la conversión y velocidad de muestreo (número de muestras por unidad de tiempo, throughput rate).

- Número de canales: depende del número de señales a adquirir.
- Exactitud de la conversión: viene impuesta por los circuitos utilizados, es decir, multiplexores, amplificadores, S/H y ADC, esencialmente. Así, a cada uno de estos circuitos o módulos se le pedirán unos valores mínimos.
- Multiplexor: Baja resistencia de conducción (RON) y constante en el margen de variación de las señales de entrada. Tiempos de establecimiento pequeños.
- Amplificador: Mínimas tensiones y corrientes de offset, así como sus derivas. Tiempo de establecimiento pequeño, aún con altas ganancias. Amplio margen para programar la ganancia.
- S/H: Pequeña tensión offset y deriva de ésta. Máxima velocidad de caída en modo Hold, siempre y cuando la tensión a la salida del S/H esté constante el tiempo necesario para que el ADC la digitalice. Tiempos de apertura, de adquisición y de asentamiento mínimos.
- ADC: Alta resolución. Mínimo tiempo de conversión. Error de linealidad y de ganancia pequeños.

- Velocidad de muestreo (throughput rate): este parámetro especifica la velocidad a la que el SAD puede adquirir y almacenar muestras de las entradas. Las muestras pertenecerán a un único canal o a varios, según la configuración, por lo que es fundamental revisar cuidadosamente los datos suministrados por el fabricante. En general se debe identificar el throughput rate con el número de muestras por unidad de tiempo que pueden obtenerse de un canal. Los cuatro factores principales a tener en cuenta son:

- * Tiempo de establecimiento del MUX
- * Tiempo de establecimiento del amplificador
- * Tiempo de adquisición del S/H
- * Tiempo de conversión del ADC

Hasta que la muestra adquirida llega al conversor, pasa a través de un MUX, de un AI de ganancia programable y finalmente por un S/H. Cada elemento de esta cadena requiere un corto período de tiempo de establecimiento para conseguir su mejor precisión. Por tanto, cuando se calcula la máxima velocidad de muestreo del sistema, se debe incluir el efecto de todos estos elementos, y no sólo el tiempo de conversión del ADC.

2.2.12.2 Configuraciones

Atendiendo al número de canales de entrada, los SAD pueden clasificarse en monocanales y multicanales.

a) SAD monocanales: La configuración más general responde al diagrama de bloques de la figura 2.8.

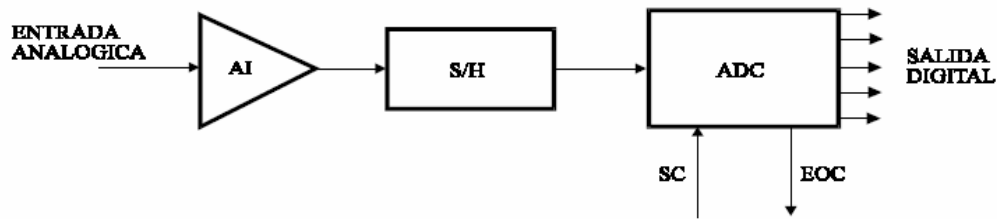


Fig. 2.8. Diagrama de bloques de un SAD monocanal.

[Fuente: Pallas, A. “Adquisición y distribución de señales”]

La señal procedente de la fuente de información (cuya obtención se realizará por medio de sensores apropiados con sus correspondientes acondicionadores de señal) es aplicada a la entrada del circuito amplificador de instrumentación, el cual adaptará el nivel analógico de la entrada al margen dinámico del ADC.

Como puede observarse en la figura 2.8, el SAD monocanal sólo admite la adquisición de una señal de entrada, lo que permite optimizar su configuración para un tipo concreto de entrada analógica.

b) SAD Multicanal: Cuando se plantea la necesidad de realizar la conversión A/D de diversas señales (canales), los SAD pueden tener diferentes configuraciones. La configuración a utilizar vendrá, en muchos casos, impuesta por:

- Características de las señales analógicas de entrada (frecuencia, periodicidad, etc.).
- Información que se desee obtener de las señales.
- Velocidad de conversión.
- Costo, etc.

En un SAD multicanal, pueden existir distintas configuraciones en función de cómo se realice la distribución de los módulos en el sistema. Esta distribución dependerá de las necesidades de cada aplicación en particular.

2.2.12.3 Clasificación De Los SAD Y Su Conexión A Los Equipos De Proceso

En muchos casos tiende a identificarse un SAD con las ya clásicas Tarjetas de Adquisición de Datos (TAD), al ser ésta la opción más común por su simplicidad y bajo costo. Sin embargo, el campo de la *instrumentación* aporta una serie de *interfaces* estándar con sus correspondientes entornos de programación y protocolos. Dichos *interfaces* permiten una comunicación cómoda y elegante entre el equipo de control o procesador principal y el instrumento de medida correspondiente, que suministra o recibe la información necesaria. De este modo, pueden establecerse dos clases genéricas de SAD:

- SAD basados en Tarjetas de Adquisición de Datos (TAD). Bus interno: Es el caso más simple y usual en los SAD, y se basa en la utilización de tarjetas conectadas al ordenador personal o estación de trabajo, mediante un slot de expansión o utilizando un conector que conduce a un rack de expansión
- SAD basados en *interfaces* estándar para instrumentación. Bus externo. Estos sistemas, a los que normalmente se les denomina *sistemas de instrumentación*, pueden definirse como un conjunto de instrumentos conectados a través de un BUS que ejecutan un trabajo determinado de forma automática bajo el control de un equipo controlador, que en la mayoría de los casos es un ordenador (PC, MAC, Estación de trabajo), siendo el PC el más utilizado.

En algunas ocasiones y de forma muy esporádica, suelen utilizarse *circuits integrados para adquisición de datos*. Estos chips encuentran su principal campo de utilización en diseños que se orientan hacia una aplicación específica y suelen incorporar la mayor parte de los subsistemas necesarios para realizar la adquisición de las señales analógicas: amplificador de instrumentación, S/H, ADC, temporizadores, etc.

2.2.13 Software LabVIEW

La herramienta LabVIEW constituye un revolucionario sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos. Este software, fue creado en el año 1986 por Truchard y Kodosky, se le dio el nombre de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, o Comúnmente LabVIEW. ^[16]

Las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW se resumen en las siguientes:

- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

LabVIEW es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el *lenguaje C* o *BASIC*. Sin embargo, LabVIEW se diferencia de dichos programas en un importante aspecto: los citados lenguajes de programación se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que LabVIEW emplea la programación gráfica o *lenguaje G* para crear programas basados en diagramas de bloques.

Para el empleo de LabVIEW no se requiere gran experiencia en programación, ya que se emplean iconos, términos e ideas familiares a científicos e ingenieros, y se apoya sobre símbolos gráficos en lugar de lenguaje escrito para construir las aplicaciones. Por ello resulta mucho más intuitivo que el resto de lenguajes de programación convencionales.

LabVIEW posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis, presentación y guardado de datos. LabVIEW también proporciona potentes herramientas que facilitan la depuración de los programas.

Dado que manejan sólo señales eléctricas sin convertirlas en otras físicas, los acondicionadores de señal constituyen lo que se denomina una interfaz. Otras interfaces del sistema son las necesarias para evitar la información a través de los canales o líneas de comunicación. Su función y estructura dependen tanto del medio de comunicación como del código empleado para el mensaje.

2.2.13.1 Tipos De Estructuras En Labview

Existen dos tipos de programación en LabVIEW que son la programación estructurada y la programación modular. Cada una difiere en la forma como se diseña y construyen los algoritmos.

2.2.13.1.1 Programación Estructurada

Se basa en el uso de cuatro conjuntos de estructuras operacionales: secuencial, condicional, iterativa y fórmula NODE.

- Estructura secuencial: se compone de una serie de acciones elementales que se ejecutan en el orden que se han descrito. Se ilustra como diapositivas o negativos de una película, ejecutándose los diagramas de bloques de forma secuencial y está formada por una serie de marcos o cuadros que se ejecutan según el orden de aparición. Se representa por el ícono que se muestra en figura 2.9.

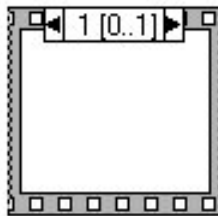


Fig.2.9. Estructura secuencial

[Fuente: Adquisición y procesamiento de datos con LabVIEW]

- Estructura condicional: se emplea cuando dos o más acciones alternativas dependen de una condición. El término de entrada que va a determinar qué condición se cumple estará unido al selector indicado con un signo de interrogación. Lo más característico de esta estructura es que esta formada por

múltiples sub-diagramas, de los que sólo es visible uno a la vez, identificándose por un valor en su parte superior. Los sub-diagramas se ejecutan según qué valor tome el identificador dentro de los “n” posibles. (ver figura 2.10)

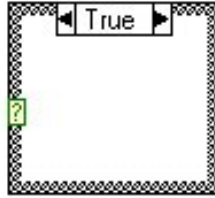


Fig.2.10. Estructura condicional.

[Fuente: Adquisición y procesamiento de datos con LabVIEW]

- Estructura iterativa: la estructura iterativa o repetitiva es otro tipo de programación que puede aparecer, la cual se compone de acciones que implican una repetición sistemática de un proceso. Existen dos tipos de estructuras iterativas en LabVIEW diferentes entre sí, la estructura WHILE LOOP y la estructura FOR LOOP; en una estructura WHILE LOOP la acción se repite mientras que la condición de entrada a la estructura sea cierta. Si es falsa nunca se ejecutara. En cambio, para una estructura FOR LOOP, la acción se repite tantas veces como indique una variable que actúa de contador. Los íconos que representan cada una de las estructuras descritas son los mostrados en las figuras 2.11 y 2.12.



Fig. 2.11 Estructura WHILE LOOP

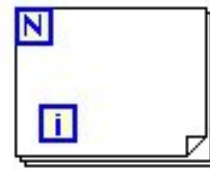


Fig. 2.12 Estructura FOR LOOP

[Fuente: Adquisición y procesamiento de datos con LabVIEW]

- Estructura formula NODE: esta estructura posee características similares a las estructuras vistas anteriormente, pero que, en lugar de contener sub-diagramas, posee una o más fórmulas separadas por punto y coma. Se utilizara sobre todo cuando se quiera ejecutar formulas matemáticas que serían complicadas realizar mediante herramientas matemáticas incluidas en LabVIEW. (ver figura 2.13).

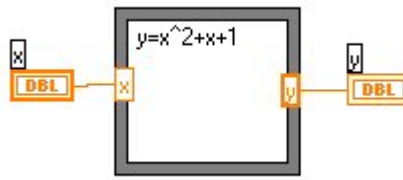


Fig.2.13. Estructura formula NODE.

[Fuente: Adquisición y procesamiento de datos con LabVIEW]

2.2.13.1.2 Programación Modula

Se basa en dividir el programa en partes que tengan una personalidad propia, es decir, en dividir el programa en LabVIEW en varios sub-programas que ahorren tiempo y esfuerzo a la hora de realizar y ejecutar el programa. Los subprogramas tienen las mismas propiedades que un programa y se utilizan mediante la creación de iconos y conectores que facilitan la lectura y la interpretación del instrumento virtual global.

2.2.13.2 Tipos De Datos En Labview

Al elegir los controladores e indicadores en LabVIEW se les asigna automáticamente una clase de datos. Se presentan dos tipos de datos, los no estructurados o escalares y los estructurados o matrices. Cada dato en el panel de control tiene su dibujo en el diagrama de bloques.

- Datos tipo escalares: estos tipos, denominados estándar, no necesitan definirse en el programa, ya que se asume que son conocidos, e incluyen los valores lógicos, los números enteros, los números reales y los conjuntos de caracteres.
- Datos tipo estructurados: un dato estructurado se define como el conjunto de variables reunidas bajo un único nombre en común. Estas estructuras de datos se construyen a partir de los tipos de datos elementales ya vistos en el apartado anterior. Los datos estructurados en LabVIEW son los siguientes: matrices, clusters, cadenas de caracteres y archivos.
 - ❖ *Matrices*: una matriz es un “Array” o arreglo de datos, pudiendo tener una o mas dimensiones. Además existen una serie de funciones con las que se pueden manipular estas matrices.
 - ❖ *Clusters*: es una colección ordenada de uno o mas elementos. A diferencia de las matrices, un cluster puede contener cualquier combinación de tipo de datos. Para acceder al cluster es necesario aplicar una serie de funciones específicas de estos que descomponen o unen los datos.
 - ❖ *Cadenas de caracteres*: este tipo son controles e indicadores de cadena de caracteres ASCII. Se puede acceder a ellos mediante la paleta de controles e indicadores, y como los anteriores, poseen diversas funciones para cambiarlos.
 - ❖ *Archivos*: los archivos permiten el almacenamiento y la recuperación de información desde un disco. En la paleta de funciones de LabVIEW existen una gran variedad de funciones para tratar las diferentes operaciones con ficheros, los cuales son: almacenamiento de datos en un archivo nuevo, almacenamiento en un archivo ya existente, recuperación de datos desde un archivo y almacenamiento de resultados.

CAPÍTULO III:

EVALUACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

3.1 Generalidades

En este capítulo se describe el funcionamiento y cada uno de los componentes de la unidad de demostración ARMFIELD FM20 de bomba centrífuga y se evalúan sus condiciones actuales.

3.2 Descripción Del Banco De Pruebas Armfield Fm20

La unidad de demostración FM20 de bomba centrífuga es un modelo a escala de un sistema con bomba centrífuga, creado con fines educativos para incrementar los conocimientos en el funcionamiento y operación de este tipo de máquinas. ^[17]

A continuación se muestra un esquema enumerado (Fig. 3.1) que servirá de referencia para describir los componentes por los cuales está constituido el banco de pruebas, así como también, sus sensores y el sistema de adquisición de datos, para lograr una mejor comprensión de la unidad.

3.2.1 Descripción De Los Componentes De La Unidad:

La unidad de demostración Armfield FM20 consta de una bomba centrífuga (6) impulsada por un motor eléctrico (19), montada sobre un soporte de acero inoxidable (2) junto con un reservorio acrílico (11) y un sistema de tuberías fabricadas en PVC para la circulación continua del fluido. Agua limpia es usada como fluido de trabajo y

una válvula de drenaje (10) en la base del reservorio permite drenar el agua después de usada.

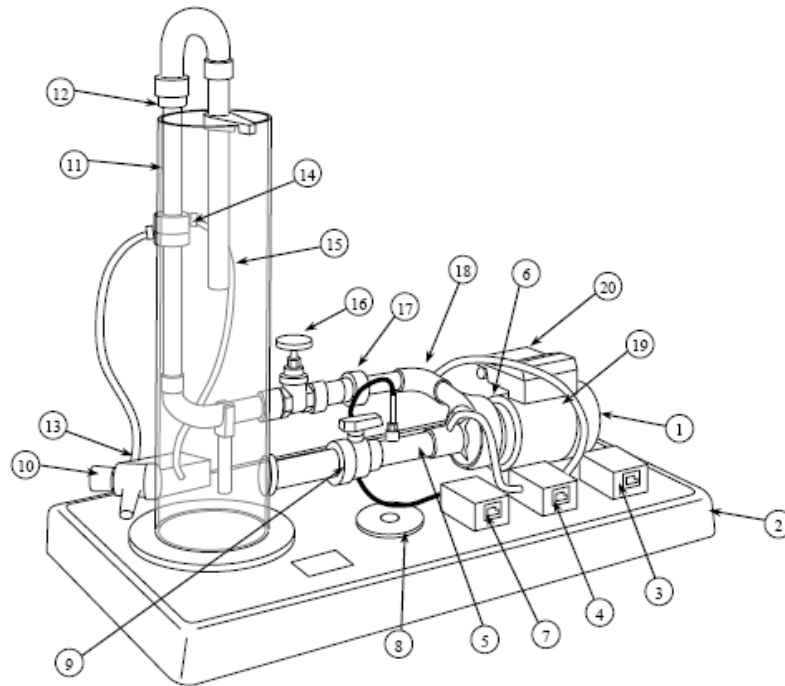


Fig. 3.1. Unidad de demostración FM20 de bomba centrífuga
[Fuente: Catálogo Armfield, Banco de prueba FM20]

El flujo de agua a través de la bomba centrífuga es regulado por una válvula de control de flujo (16) instalada en la tubería de descarga de la bomba. El ajuste de esta válvula permite variar la relación cabeza-flujo producida por la bomba. Una válvula (9) en la tubería de entrada de la bomba, permite regular el paso del fluido.

Sensores apropiados son incorporados en la unidad para facilitar el análisis del funcionamiento de la bomba centrífuga. Estos a su vez se enlazan a acondicionadores de señales que envían, a través de un dispositivo de interfaz IFD (fig. 3.2) las señales digitalizadas de las mediciones tomadas en el banco a una tarjeta de adquisición de datos, conectada a un computador para ser observadas. Además posee puntos de toma

requeridos por los sensores de presión y otros puntos de toma (5, 15 y 18) incluidos en el sistema de tuberías para permitir la apropiada calibración de los instrumentos a ser conectados.



Fig. 3.2 Consola de interfase IFD [Fuente: catalogo de equipos Armfield]

3.2.2. Descripción De Los Sensores/Acondicionadores De Señal

Los siguientes sensores son usados para monitorear el desempeño de la bomba centrífuga:

3.2.2.1 Sensor De Presión Diferencial Spw1

Está compuesto de un dispositivo piezoresistivo sensitivo de presión, con un apropiado acondicionamiento de señal, todo contenido en una carcasa protectora (13) y es utilizado para medir la presión desarrollada cerca de la placa orificio (14), instalada en la tubería de descarga de la bomba. El flujo volumétrico de agua por la bomba, puede ser calculado usando este medidor.

El sensor es conectado a un punto de toma apropiado en la tubería, usando un tubo flexible. Además puntos de tomas (15) son provistos para la conexión de apropiados instrumentos para facilitar la calibración del sensor de presión diferencial.

3.2.2.2 Sensor De Presión Diferencial SPW3

Está compuesto de un dispositivo piezoresistivo sensitivo de presión, con un apropiado acondicionamiento de señal, todo contenido en una carcasa protectora (4) y es utilizado para medir la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la bomba centrífuga. La cabeza desarrollada por la bomba puede ser calculada usando este medidor.

El sensor es conectado a un punto de toma apropiado en la tubería, usando un tubo flexible. Además, puntos de toma (5 y 18) son provistos para la conexión de apropiados instrumentos para facilitar la calibración del sensor de presión diferencial.

3.2.2.3 Sensor De Velocidad Rotacional SSO1

Está compuesto por un interruptor infrarrojo reflexivo (1) con acondicionamiento de señal apropiado, en una carcasa protectora (3) y es utilizado para medir la velocidad de rotación del motor impulsor de la bomba.

El interruptor es montado sobre un soporte adyacente al final del eje del motor, al cual se le incorpora una tira reflexiva para facilitar la medición de la velocidad rotacional. Un tacómetro óptico de no contacto puede ser usado como instrumento apropiado para calibrar el sensor de velocidad rotacional.

3.2.2.4 Sensor De Temperatura STS1

Está compuesto de un dispositivo semiconductor sensible a la temperatura (17) con acondicionamiento de señal apropiado, en una carcasa protectora (7) y es usada para medir la temperatura del agua al entrar a la bomba centrífuga.

El sensor es insertado a través de las paredes de la tubería usando glándulas impermeables. El sensor puede ser removido de la glándula para un propósito de calibración usando un equipamiento adecuado.

3.2.2.5 Generador De Potencia Eléctrica SWA1

Además de los sensores descritos, los cuales están permanentemente conectados a la unidad FM20. El cable de alimentación eléctrica de la bomba se conecta a éste equipo y éste a su vez a una fuente de poder que transforma el voltaje 120 que viene de la toma eléctrica pública en voltaje 240 que requiere el equipo para funcionar.

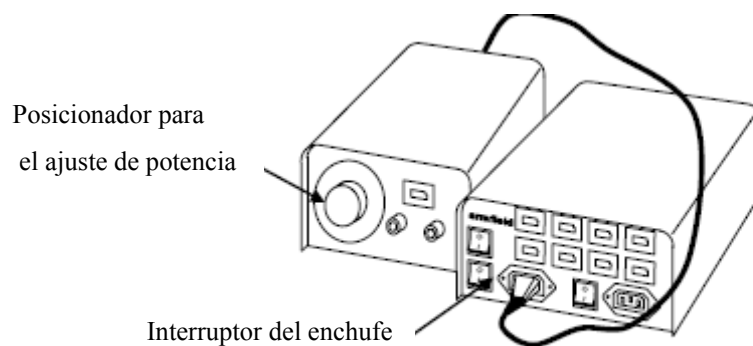


Fig. 3.3. Generador de potencia eléctrica y fuente de poder
[Armfield “Manual de instrucción FM20]

El SWA1 posee un posicionador de potencia que va de 0 a 100 indicando porcentajes de potencia de suministro eléctrico que se le aplican al equipo, a través de ello se puede obtener la velocidad de funcionamiento que se requiere para operar en un momento dado el motor de la bomba.

3.2.3. Descripción Del Sistema De Adquisición De Datos

Los sensores y demás equipos que componen el banco de pruebas de bomba centrífuga, están diseñados para funcionar con un sistema de adquisición de datos proporcionado por la misma marca Armfield, el cual es exclusivo y propio del banco de pruebas, es decir, la marca no tiene disponibilidad de sólo el sistema de adquisición de datos sino que al dañarse el mismo debe ser reemplazado la unidad de demostración completa.

La tarjeta de adquisición de datos es de conexión PCI, que mediante un computador generaba gráficas que mostraban el comportamiento de la bomba centrífuga, utilizándose el software windows Armfield (en MS2) proporcionado por los fabricantes del banco. Actualmente dicho software se considera obsoleto, ya que las curvas de funcionamiento generadas sólo pueden ser obtenidas mediante archivos en un tiempo finito y no era posible observar los cambios de las variables sensadas en tiempo continuo al momento de la práctica.

3.2.4 Características de los Componentes de la Unidad de Demostración

- **Banco de pruebas:**

Marca: ARMFIELD

Modelo: FM20

- **Bomba centrífuga:**

Marca: STUART PUMPS

Flujo máximo: 1.6 L/s (a 50Hz)

Presión máxima: 5bar

Cabeza máxima: 10m

• **Motor:**

Marca: STUART TURNER LTD

Potencia: 0.5HP (a 50Hz)

Voltaje: 230v

Intensidad: 1.5 A

R.P.M: 2800

• **Válvula de entrada a la bomba:**

Marca: Tecno Plastic

Material: PVC

Diámetro: $\frac{3}{4}$ "

Tipo: válvula de bola

• **Válvula de salida de la bomba:**

Diámetro: 1"

Tipo: válvula de compuerta

• **Sensor/acondicionador de velocidad rotacional SSO1:**

Rango: 0 a 60Hz

• **Sensor/acondicionador de presión diferencial SPW3**

Rango: 0 ± 207 Kpa

• **Sensor/acondicionador de presión diferencial SPW1:**

Rango: 0 ± 34.5 Kpa

• **Sensor/acondicionador de Temperatura STS1:**

Rango: -40°C a 110°C

3.3 Condiciones Actuales Del Banco De Pruebas

El banco de pruebas FM20 está diseñado para funcionar con un sistema de adquisición de datos de la marca Armfield, el cual se encuentra deteriorado, lo que impide su uso para la realización de las prácticas de laboratorio.

La tarjeta de adquisición de datos que conecta los sensores del banco de pruebas con la computadora se encuentra dañada en la mayoría de sus componentes, y la fuente de alimentación de los sensores no está en condiciones para su uso por deterioro en la circuitería, razones por las cuales se ve la necesidad de implementar otro sistema de adquisición de datos.

En el Laboratorio de Termodinámica se encuentra un sistema de adquisición de datos de la *National Instruments*, el cual fué diseñado y actualmente es utilizado para bancos de pruebas de bomba recíproca y turbina pelton, ambos de la misma marca Armfield. Este sistema consta de una tarjeta de adquisición de datos de la *National Instruments* (modelo NI-6009 USB), montada en un módulo el cual contiene una fuente de alimentación eléctrica de +12 voltios y -12 voltios con un común de 0 voltios, además de 4 conectores RJ-11 (tipo hembra) que conectan, mediante cable telefónico (conectores RJ-11 tipo macho), los acondicionadores de señal del banco de pruebas con la tarjeta, la cual a su vez se conecta al computador a través de un puerto USB.

Todos los demás componentes de la unidad fueron revisados y probados para certificar su buen funcionamiento y asegurar que no influyeran en la inoperatividad del equipo. Se llega a la conclusión de que es necesario adaptar los sensores/acondicionadores del banco de pruebas a la tarjeta de adquisición de datos de la *National Instruments* antes descrita para lograr obtener las señales de las mediciones realizadas en la unidad y así cumplir con los objetivos de la misma.

CAPÍTULO IV:

ADAPTACIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

4.1. Generalidades

Un sistema de adquisición de datos consiste en un conjunto de elementos acoplados entre sí para poder tomar un grupo de variables físicas de un proceso, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en un computador. Un sistema típico de adquisición de datos utiliza sensores, transductores, amplificadores y convertidores analógico-digital (A/D), para procesar información acerca de un sistema físico de forma digitalizada.

Para lograr la automatización del banco de pruebas es necesario adaptar los elementos ya existentes en el mismo a la tarjeta de adquisición de datos de la National Instruments existente en el laboratorio y que ha sido descrita anteriormente. Además de crear, con un software compatible al nuevo hardware, el entorno gráfico que represente y muestre las condiciones de funcionamiento del equipo durante la realización de las prácticas de laboratorio.

4.2 Adaptación De Los Sensores Y Acondicionadores De Señal

Para lograr conectar los sensores y acondicionadores de señales a la nueva tarjeta de adquisición de datos, es necesario sustituir los conectores originales de los acondicionadores por conectores que sean compatibles con los de la tarjeta. Para ello se realizó un estudio del voltaje de alimentación y las señales de entrada y salida en

cada uno de los acondicionadores, siguiendo la normalización de las líneas de transmisión de señales establecida en la tarjeta ya existente y la cual es guía para los demás equipos del laboratorio que trabajen con ella, ya que es necesario definir el mismo esquema para garantizar una correcta lectura de las variables medidas.

El esquema eléctrico de la unidad de adquisición de señales se rige mediante conectores de cuatro (4) hilos, los cuales se distinguen por colores y donde cada color representa lo siguiente:

- Rojo: alimentación al acondicionador de +12V
- Amarillo: alimentación al acondicionador de -12V
- Negro: común o tierra (GND)
- Verde: señal o salida.

Siguiendo el esquema mencionado se cambiaron los conectores originales de los acondicionadores por conectores tipo RJ-11 (hembra), fijando mediante soldadura de estaño cada uno de los hilos en su lugar correspondiente en la tarjeta del acondicionador. Los conectores fueron fijados a las bases de los ya existentes usando herramientas de ajuste y pegamento plástico, cuidando que quedaran bien adaptados y fijados al cajetín del acondicionador para así evitar inconvenientes a la hora de conectar y desconectar los mismos al módulo de adquisición de datos.

Del mismo modo se construyeron 4 cables que son los que interconectan cada uno de los acondicionadores a la tarjeta. Cada cable de dos metros (2m) aproximadamente cuenta con 2 conectores R-J 11 (macho) en cada extremo.

Por otra parte, luego de modificar las conexiones de los amplificadores es necesario hacer un estudio de los voltajes de salida del sensor, del amplificador y las

variables medidas en cada sensor para poder calibrar y evaluar el buen funcionamiento de los sensores. Con un osciloscopio (Instek OS-653, 50Hz) se registraron los rangos de voltaje arrojados por cada uno de ellos. Además se utilizaron instrumentos de medición como manómetros de mercurio, termómetro y estroboscopio para hacer las mediciones de presión, temperatura y velocidad respectivamente.

Para la determinación del rango de voltaje de cada sensor y amplificador se conectó el amplificador, a través del cable telefónico, a una fuente de voltaje (marca HP) que suministra a los sensores de +12 y -12 voltios, con una de las puntas del osciloscopio, se conecta a tierra en la fuente de voltaje y se adapta a la señal de salida del amplificador, con la otra punta del osciloscopio se hace contacto en la señal de salida del sensor pudiéndose observar simultáneamente en el osciloscopio el voltaje de salida del sensor y el voltaje de salida del acondicionador al poner en funcionamiento el banco de prueba en sus condiciones máximas y mínimas de capacidad.

4.2.1. Sensor De Presión Diferencial SPW1

Este sensor mide la presión del fluido en forma diferencial cuando pasa por una placa orificio, envía la señal al acondicionador y éste a su vez a la tarjeta de adquisición de datos, para luego ser mostrada en unidades de Kpa en el computador.

Para hallar los valores de voltaje arrojados por el SPW1 al estar la bomba en funcionamiento, se utilizó el estroboscopio y se realizó en procedimiento descrito anteriormente. Simultáneamente a esto, se instaló un manómetro diferencial de mercurio (rango: 0-36cmHg) en puntos de toma adyacentes a los de la conexión del sensor los cuales posee el banco de prueba para la incorporación de equipos de ser necesario con el fin de realizar pruebas y calibrar el sensor como es el caso. Con el

equipo encendido se midieron los valores de voltaje del sensor, voltaje del acondicionador y la presión, obteniéndose lo siguiente (tabla 4.1):

Tabla 4.1. Muestras de voltajes del sensor de presión SPW1

Salida del sensor (volt)	Salida del acondicionador (volt)	Presión (Kpa)
1.5	1.8	7.45
2	2.4	11.18
3.7	4.8	22.01
4.5	6	29.74

Con estos valores y a través del método gráfico se determinó que el sensor tiene una tendencia lineal tal como se muestra en la figura 4.1, donde se grafican los valores de voltaje obtenidos en función a las presiones registradas en el banco de pruebas para dichos voltajes, y se obtiene que el valor de R^2 tiende a 1 (específicamente $R^2 = 0.9933$), lo que comprueba la linealidad del equipo.

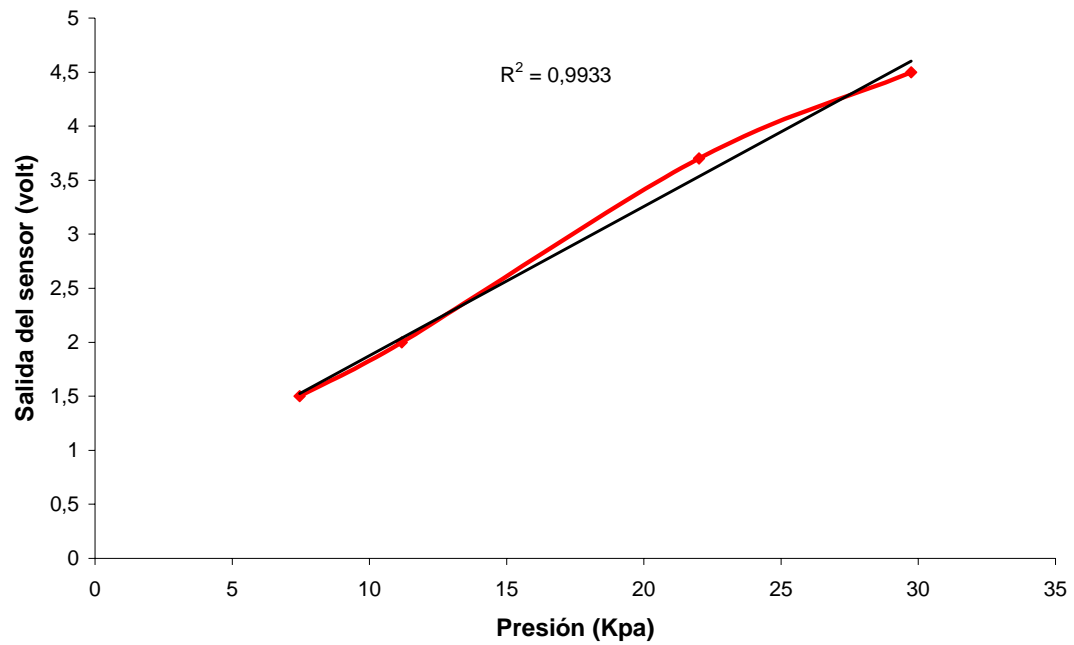


Fig. 4.1. Gráfica de los voltajes de salida del sensor en función de las presiones registradas.

Al graficar la salida del sensor con respecto a la salida del acondicionador (fig. 4.2) se observa que la relación de conversión de voltajes entre ambos es también de forma lineal, corroborado por el valor de R^2 .

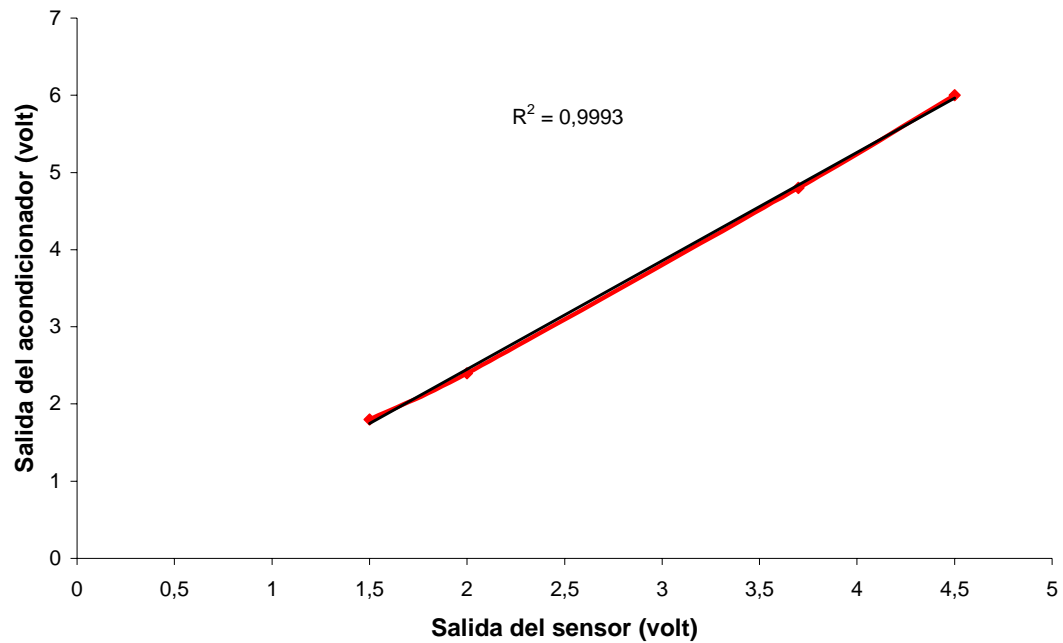


Fig. 4.2. Relación de conversión de voltajes del acondicionador de presión SPW1

De igual forma, el voltaje de salida del acondicionador y las presiones medidas por el manómetro para dichos voltajes mantienen una relación lineal ($R^2=0,9979$), lo cual se muestra en la figura 4.3, y donde se obtiene la ecuación que rige este comportamiento. El voltaje amplificado o acondicionado es transferido a la tarjeta de adquisición de datos quien lo transforma en Kpa mediante la programación en el software de la ecuación obtenida.

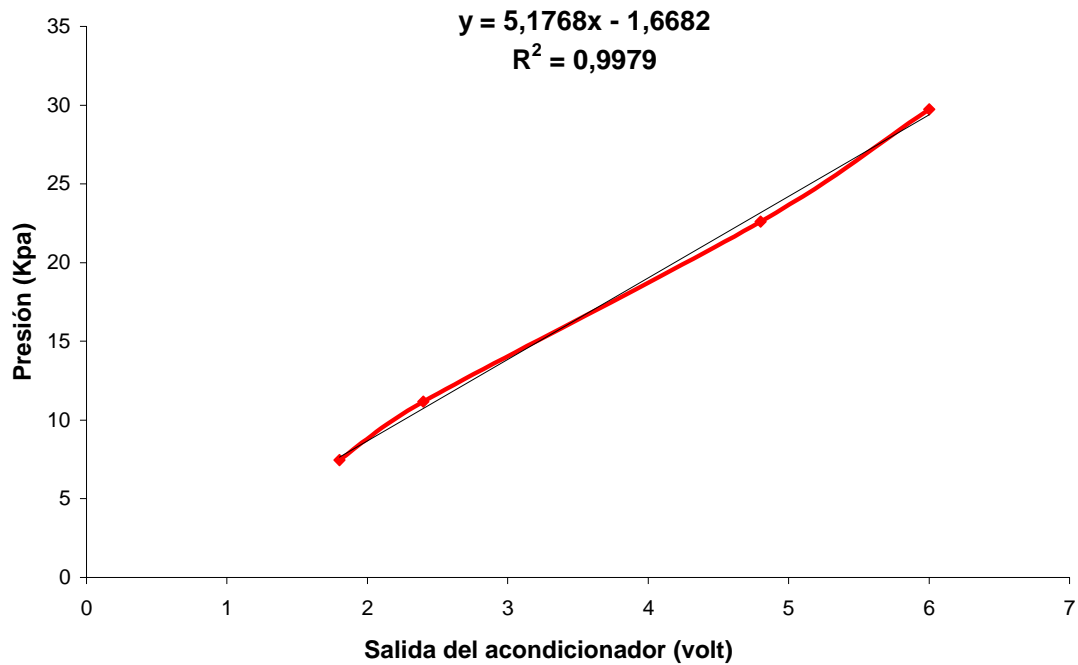


Fig. 4.3. Muestra de la variación de presión en función a los voltajes de salida del amplificador SPW1

4.2.2. Sensor De Presión Diferencial SPW3

El SPW3 es el encargado de medir la diferencia de presión que existe entre la succión y la descarga de la bomba, convertirla en voltaje para enviarla como señal eléctrica al acondicionador de señales y de allí ser enviada a la tarjeta de adquisición de datos para ser mostrada en el computador en unidades de Kpa.

Al igual que en el sensor SPW1 fue necesario la instalación del osciloscopio para medir los voltajes de entrada y salida del acondicionador, y del manómetro de mercurio para medir las presiones a dichos voltajes, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Muestras de voltajes del sensor de presión SPW3

Salida del sensor (volt)	Salida del acondicionador (volt)	Presión (Kpa)
0.25	0.4	16.46
0.45	0.6	23.38
0.75	1	40.85
1.25	1.55	63.18

Se determinó que el sensor era de tipo lineal ($R^2=0.9956$) mediante la figura 4.4, donde se observa la relación entre los voltajes de salida del sensor y las presiones obtenidas para dichos voltajes.

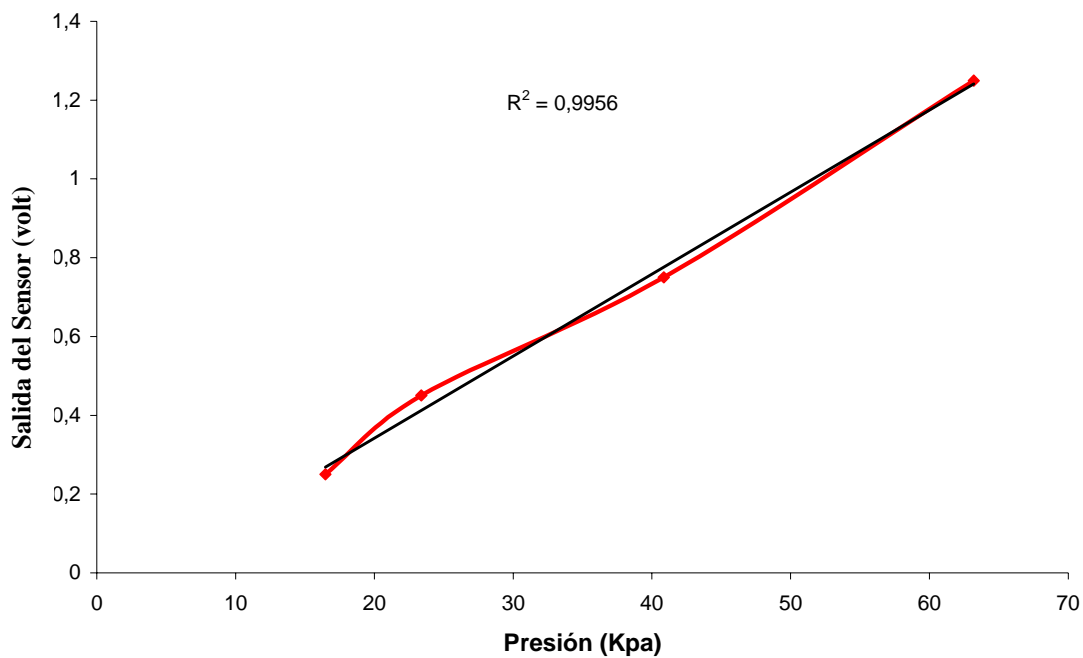


Fig. 4.4. Comportamiento del voltajes de salida del sensor en función de las presiones registradas en el banco de pruebas.

Al relacionar los voltajes de salida del sensor con los voltajes de salida del acondicionador se observa la linealidad que existe entre ambos (ver Fig. 4.5)

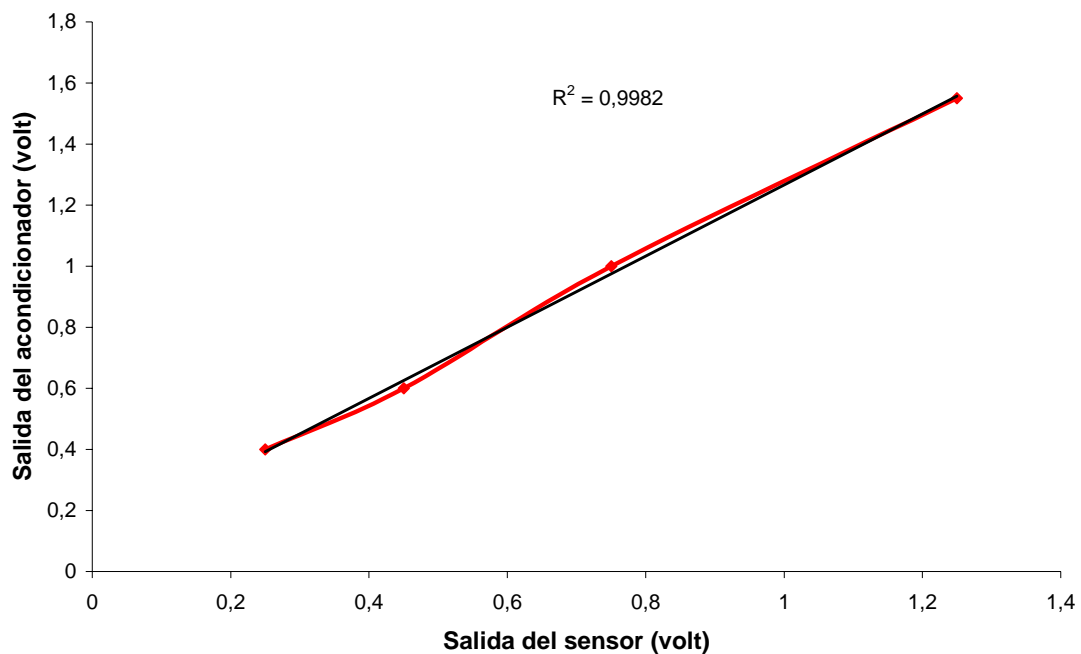


Fig. 4.5. Relación de conversión de voltajes del acondicionador de presión SPW3

La tarjeta de adquisición de datos recibe la señal saliente del acondicionador para ser transmitida al computador y mostrada en el software de la forma deseada. Para la programación del software se obtuvo la ecuación que determina los cambios de presiones a la entrada y salida de la bomba, producidos con las variaciones de voltajes del sistema (fig. 4.6)

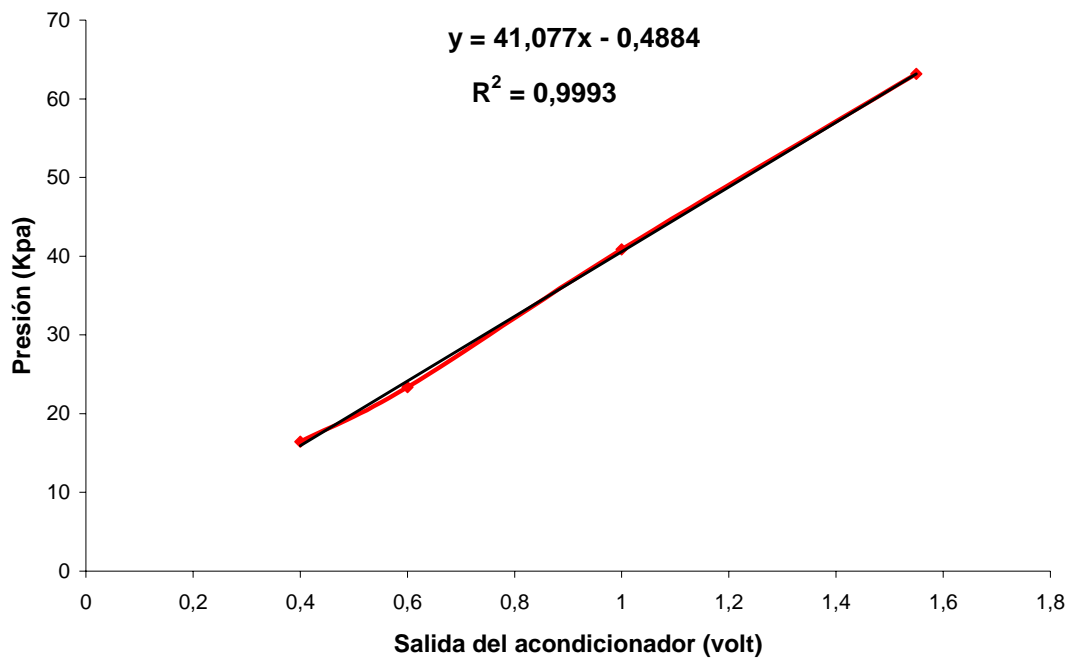


Fig. 4.6. Muestra de la variación de presión en función a los voltajes de salida del amplificador SPW3

4.2.3. Sensor De Velocidad Rotacional SSO1

La velocidad de rotación del motor de la bomba centrífuga se mide a través de un sensor óptico que expresa dicha velocidad en forma de tren de pulsos cuya frecuencia representa las revoluciones por segundos, a su vez, envía la señal al acondicionador y éste a la tarjeta de adquisición de datos, para luego ser mostrada en unidades de Hertz en el computador.

La relación de conversión del sistema de adquisición de datos para la velocidad, al igual que en los sensores antes descritos, presenta un comportamiento lineal entre el voltaje medido a la salida del acondicionador y las velocidades estudiadas, ésto se determinó midiendo los voltajes con un osciloscopio y utilizando además un estroboscopio que permite medir las revoluciones por minutos del motor

de la bomba centrífuga para determinados aumentos en el porcentaje de potencia eléctrica transmitida, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 4.3. Muestras de voltajes y velocidad del sensor de velocidad SSO1

Salida del acondicionador (volt)	Velocidad (RPM)	Velocidad (Hz)
2.2	1539	25.65
3.2	1978	32.97
3.4	2466	41.10
4.0	2845	47.42

En la figura 4.7 se muestra la ecuación que determina la salida del acondicionador de velocidad (en voltios) cuando se producen variaciones en la velocidad de la bomba al aumentar la potencia eléctrica de entrada a la misma, al igual que el comportamiento lineal del sistema determinado por $R^2=0.9949$.

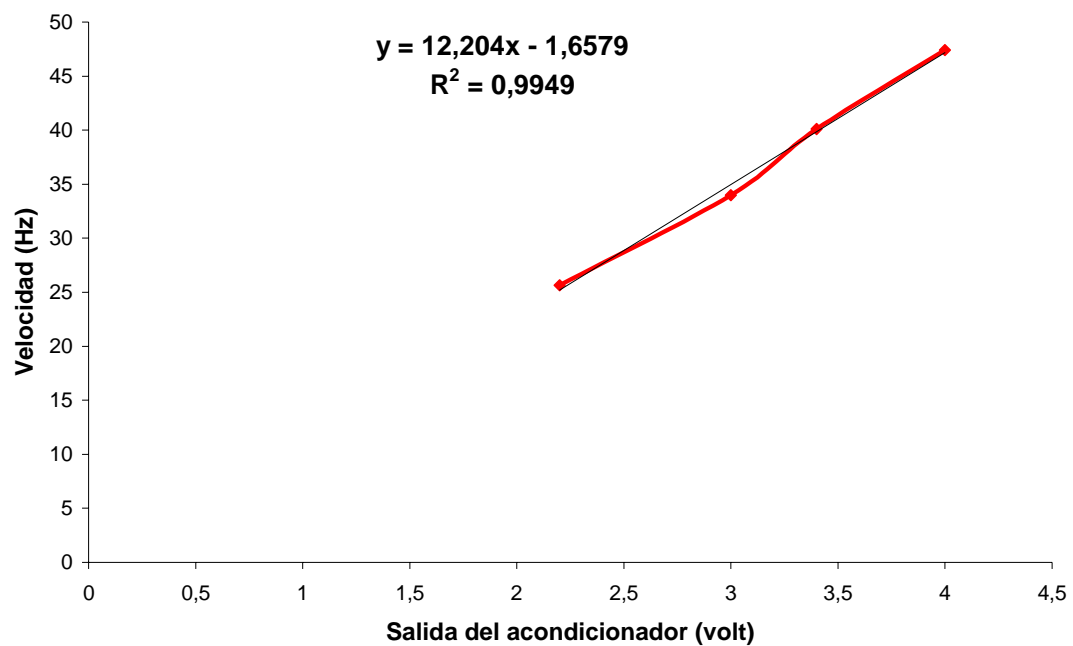


Fig. 4.7. Gráfica del amplificador SSO1 cuando la velocidad varía en función del voltaje

4.2.4. Sensor De Temperatura STS1

La variable temperatura en el banco de pruebas es medida a través de un sensor sensitivo a la temperatura, el cual envía la señal al acondicionador y éste a su vez a la tarjeta de adquisición de datos, que la muestra en el computador a través del software en unidades de grados centígrados (°C).

Con un termómetro de mercurio se tomaron los valores de temperatura que registra el fluido cuando la bomba está en funcionamiento, al mismo tiempo que se obtuvieron los voltajes arrojados por el osciloscopio a dichas temperaturas, mostrándose en la tabla 4.4 los valores obtenidos.

Tabla 4.4. Muestras de voltajes del sensor de temperatura STS1

Salida del sensor (volt)	Salida del acondicionador (volt)	Temperatura (°C)
0.25	0.4	16.46
0.45	0.6	23.38
0.75	1	40.85
1.25	1.55	63.18

A continuación en la figura 4.8 se demuestra la linealidad del sensor al graficar los valores de voltaje de salida del sensor en función a las temperaturas registradas en el banco de pruebas para dichos voltajes.

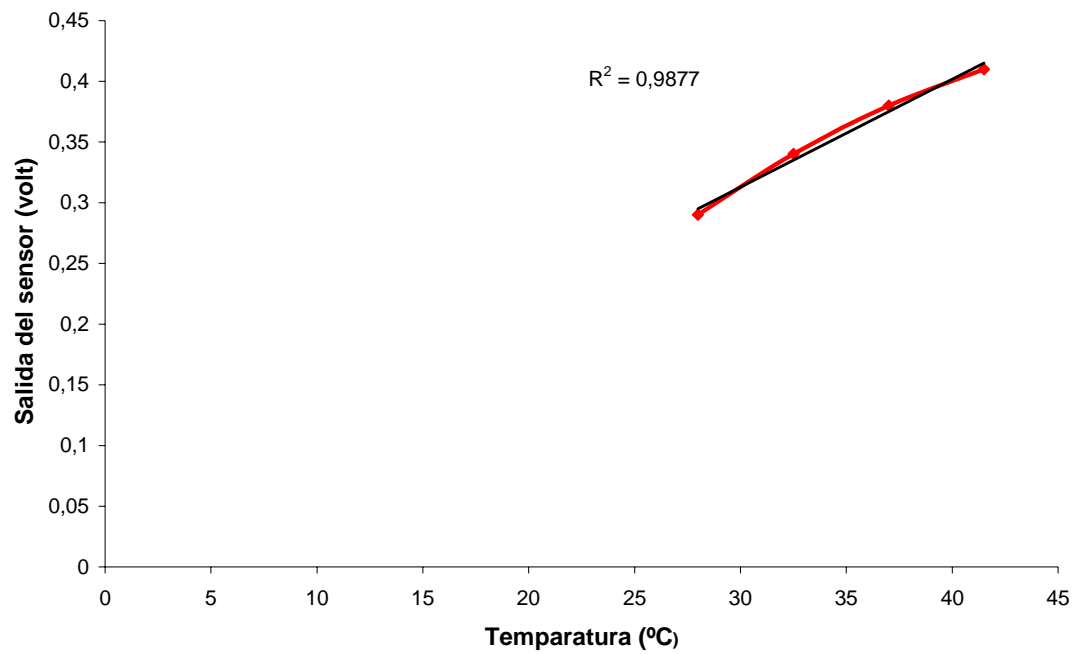


Fig. 4.8. Gráfico de los voltajes de salida del sensor en función de la temperatura

Del mismo modo, la amplificación de los voltajes se realiza de forma lineal, según lo que expresa la figura 4.9, donde se muestra la relación de conversión entre la salida del sensor y la salida del amplificador.

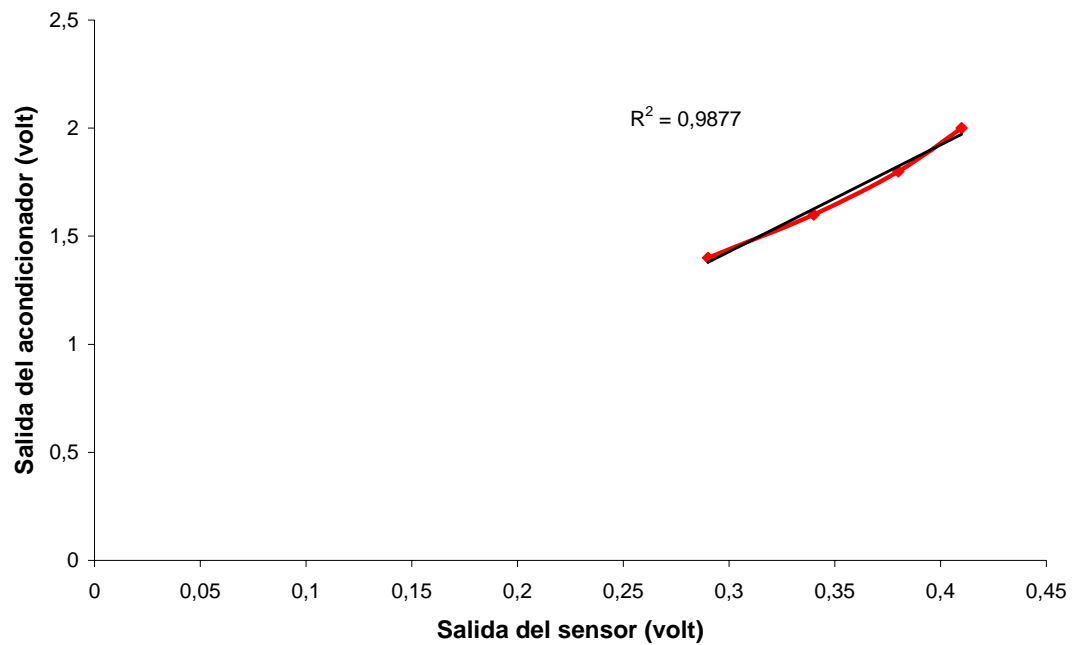


Fig. 4.9. Relación de conversión de voltajes del acondicionador de temperatura STS1.

De igual forma se comprueba la relación lineal entre el voltaje de salida del acondicionador y el incremento de temperatura cuando se encuentra el equipo en funcionamiento (fig. 4.10) y la ecuación que va a determinar la conversión del voltaje que entra a la tarjeta de adquisición de datos y que va a ser transformado a unidades de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para ser mostrada en el software.

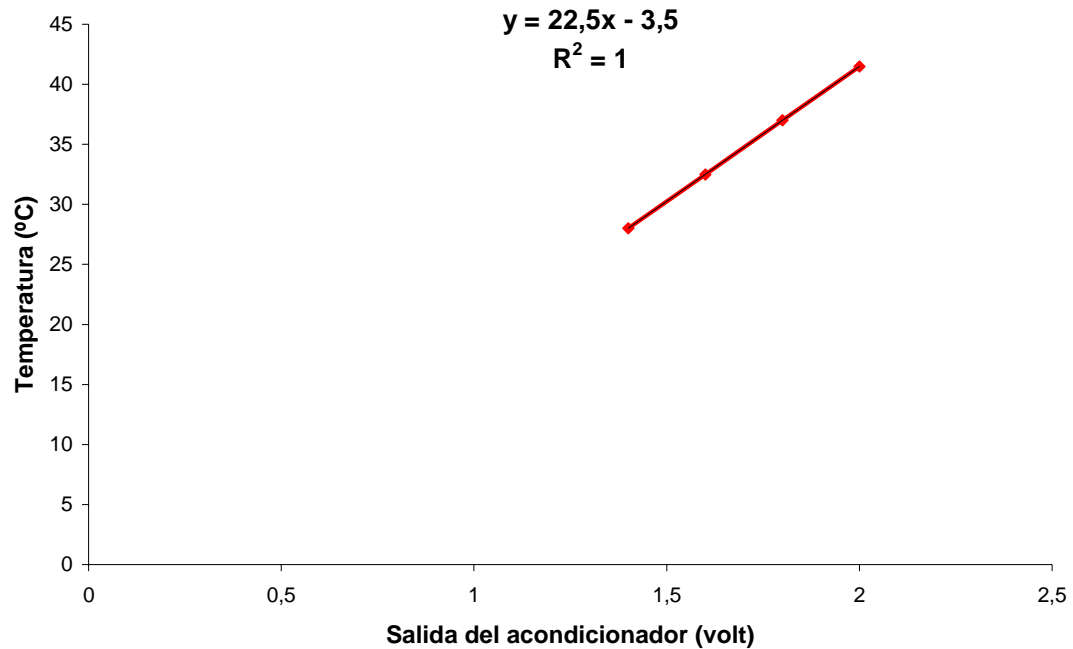


Fig. 4.10. Muestra de la variación de temperatura en función a los voltajes de salida del amplificador STS1

4.3. Descripción Del Sistema De Adquisición De Datos Seleccionado

Como se mencionó anteriormente en el laboratorio de termodinámica de la Universidad de Oriente del núcleo de Anzoátegui, se encuentra un sistema de adquisición de datos el cual es utilizado para bancos de pruebas de la misma marca Armfield presentes en dicho laboratorio, cuyo sistema consta de los siguientes componentes:

4.3.1 Unidad de Voltaje

Esta unidad es la encargada de alimentar de +12 y -12 voltios a los acondicionadores de señales, los cuales luego distribuyen estos voltajes a los sensores y a la tarjeta de adquisición de datos para lograr la toma de medidas.

La unidad consta de un transformador de voltaje de 120 a 24 voltios, que se alimenta a través de la red de 120 V a.c y reduce este voltaje a 30V a.c., el cual se utiliza como dos (2) fuentes separadas de 15V desfasadas 180° gracias al uso de la toma central del transformador. Además, las señales son rectificadas a través de un puente de diodos obteniéndose dos señales de +15 y -15 Vd.c., las cuales son filtradas por condensadores de 1000 μ F para eliminar el rizo de la señal. Al obtener una señal estable, esta se introduce en reguladores de voltaje con filtros de entrada y salida (10 μ F y 0.1 μ F respectivamente) que logran la regulación ± 12 V estable a la salida de la fuente. ^[2]

4.3.2 Tarjeta De Adquisición De Datos

La tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 de la Nacional Instruments, es una tarjeta muy versátil y sencilla capaz de convertir las señales de forma analógica a digital para ser procesadas por un computador a través de puerto USB, con la incorporación de un driver adecuado que permita el uso correcto de la tarjeta.

Las características operacionales de la tarjeta son las que definen las capacidades de la misma y se describen a continuación. ^[18]

- Entradas analógicas (AI): 8 entradas con referencia simple, o 4 entradas con acoples diferenciales. Rango de voltajes configurables por programación: ± 20 V, ± 10 V, ± 5 V, ± 4 V, ± 2.5 V, ± 1.25 V, ± 1 V. máxima rata de muestreo de 48kS/s (48000muestras por segundo). Convertidor AD (analógico-digital) de 14bits.

- Salidas analógicas (AO): 2 salidas. Rango de voltajes de 0 a 5V (fijo). Rata de salidas de 150Hz. Convertidor DA (digital-analógico) de 12bits.
- Entradas digitales (DI) y salidas digitales (DO): son 12 canales, los cuales pueden ser usados indistintamente como DI o DO (individualmente configurables). Estos 12 canales están organizados en puertos, el puerto 0 tiene líneas de 0 hasta 7, y el puerto 1, líneas de 0 hasta 3. Una entrada baja esta comprendida entre -0.3V y +0.8V. Una entrada alta esta comprendida entre 2V y 5.8V.
- Contador: 32bits. Contando con flanco de bajada.
- Fuentes de voltajes (disponible en los terminales): 2.5V y 5.0V
- Alimentación: a través de cable USB
- Configuración y prueba: puede ser configurada y probada usando MAX 4.0 (Measurement and Automation Explorer 4.0) el cual es instalado con el NI-DAQ 8.0
- Software de aplicación: LabVIEW, C, o Visual Studio.
- Sistemas operativos: Windows, Mac, Linux.

4.3.3 Módulo De Adquisición De Datos

Se llama módulo de adquisición de datos a una caja plástica porta circuitos que contiene la unidad de voltaje y la tarjeta de adquisición descritos anteriormente. Además, cuenta con cuatro (4) conectores RJ-11 (hembra) que permiten conectar los cables provenientes de los acondicionadores de señales para la adquisición de datos del banco de prueba, una fusiblera como sistema de protección para prevenir daños provocados por fallas eléctricas, un switch de apagado y encendido, un cable para toma de corriente eléctrica y los cables de conexión correspondientes.



Fig. 4.11. Módulo de adquisición de datos [fuente: Ing. Yordy González]

4.4 Unidad De Procesamiento

La unidad de procesamiento con la que se cuenta en el laboratorio posee las siguientes características:

- Computador LENOVO M52 INTEL PENTIUM IV, disco duro 80GB, 1024MB, WINDOWS XP
- Monitor IBM LENOVO 17"
- Impresora HP D4160
- UPS con regulador APC BR1500

El computador cuenta con la instalación del software LabVIEW 8.20 con el cual se diseñará los diagramas necesarios del equipo para dominio del usuario, además de la programación de las variables y resultados que se desean obtener durante el funcionamiento del banco de pruebas.

4.5 Diseño Del Entorno Gráfico Mediante El Software Labview 8.20

Para lograr la automatización del sistema, visualizar el funcionamiento del banco de pruebas de bomba centrífuga y el valor de las variables sensadas en él, es necesario implementar mediante el software un entorno gráfico que describa el equipo, que registre los cambios en las variables del proceso y muestre de forma gráfica las características inherentes de la bomba centrífuga.

Los programas desarrollados mediante LabVIEW 8.20 se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente que aceptan parámetros procedentes de otros VIs. ^[16]

Todos los instrumentos virtuales poseen un panel frontal y un diagrama de bloques. Cuentan además con paletas que contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs.

A continuación se muestra una definición de los elementos básicos para programar en LabVIEW y se explica de forma detallada lo desarrollado en el software para fines del proyecto.

4.5.1 Panel Frontal

Se trata de la interfaz gráfica del VI con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un panel frontal está formado por una serie de botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc. Cada uno de ellos definido como un control o un indicador. Los primeros, sirven para introducir parámetros al VI, mientras que los

indicadores se emplean para mostrar los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación.^[16]

El panel frontal (figura 4.12), es el primer paso para empezar a programar en LabVIEW. En la paleta de control se escogió una tabla de control para lograr mostrar varias páginas en un mismo panel. Cada página corresponde a un representación esquemática del proceso y las variables que en el actúan, son cuatro (4) páginas en total, la primera pertenece al diagrama del banco de prueba, la segunda muestra las variables del proceso, la tercera, las gráficas de las variables medidas en función del tiempo y la última (cuarta página) corresponde a las curvas características del sistema.

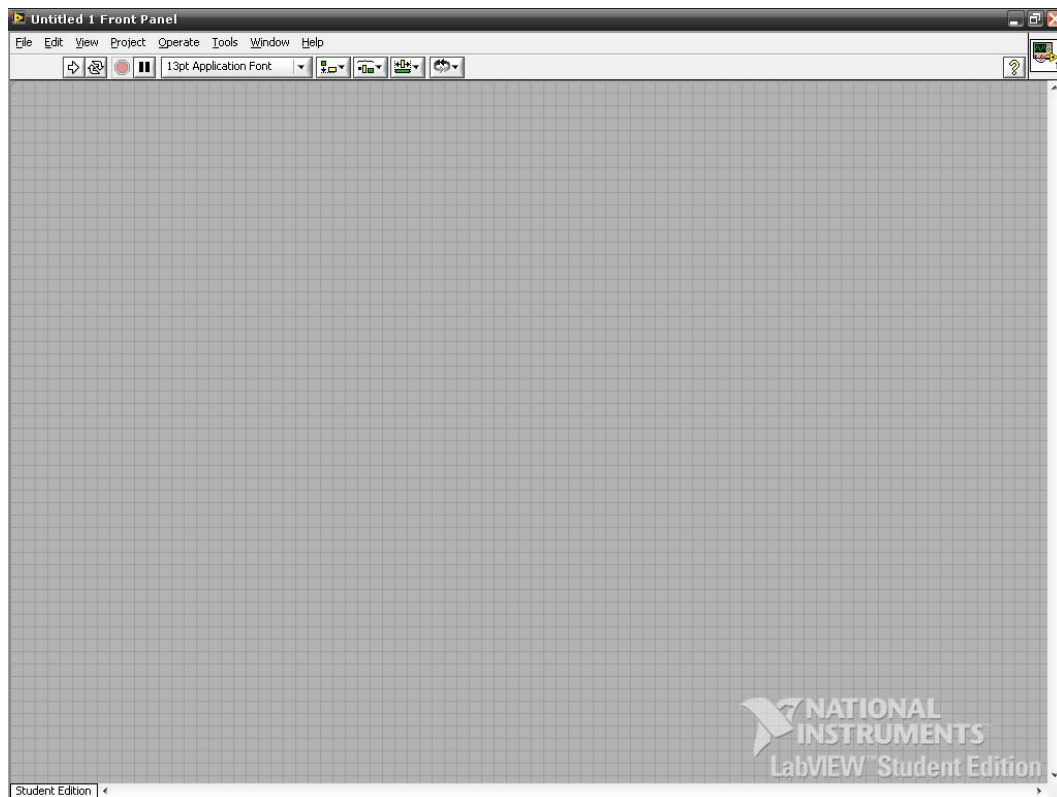


Fig.4.12. Panel Frontal [fuente: propia]

En la misma paleta de control se abre el icono de decoraciones donde se encuentran las formas geométricas para realizar el diseño del banco de pruebas, con ellas se construyeron las tuberías, válvulas, accesorios y la bomba centrífuga, en la primera pagina de la tabla de control. En el icono numérico se escoge el tanque de almacenamiento de líquido y los indicadores numéricos que mostraran las variables durante el funcionamiento del equipo y así obtener el diagrama del equipo como se muestra en la figura 4.13

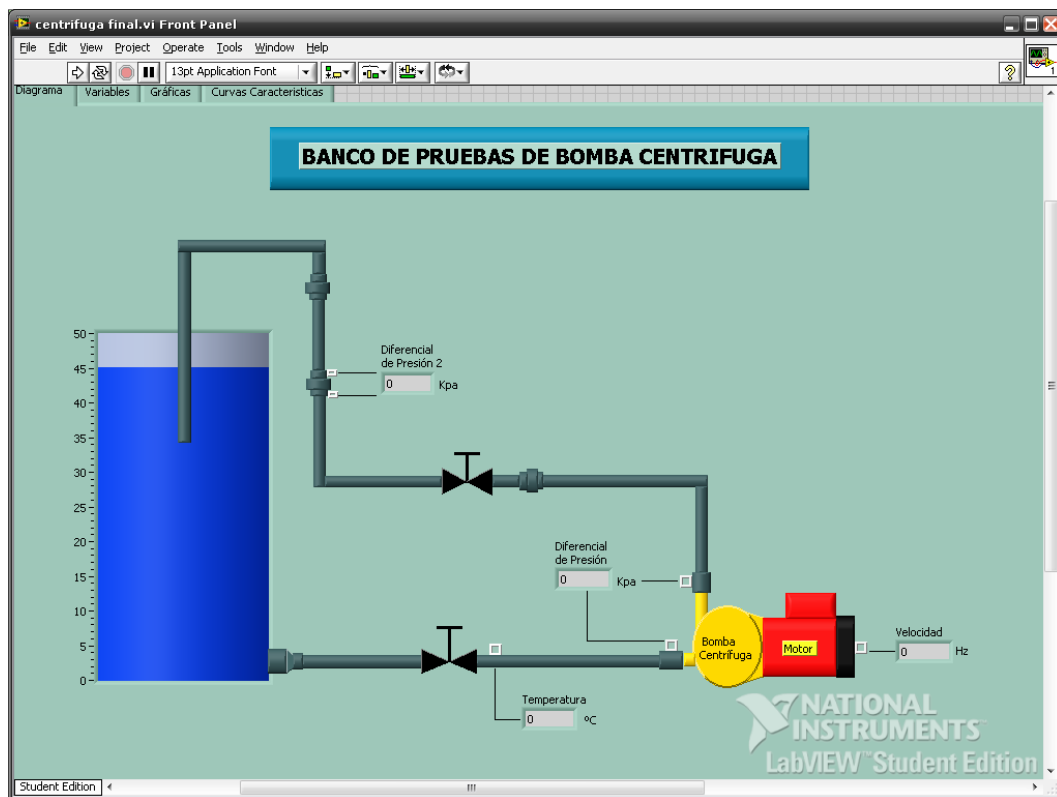


Fig. 4.13. Diagrama del proceso del banco de pruebas FM20 [fuente propia]

Seguidamente y de un modo similar al anterior se diseñó la página de variables del proceso (fig. 4.14), usando el ícono de decoraciones para crear las formas de paneles e indicadores para mostrar las variables. Además se creó con el ícono *Array* una matriz que registra una cantidad de datos de las variables a estudiar

en determinados tiempos de muestreo seleccionados por un controlador numérico y una cantidad de muestras a tomar regulada por un posicionador horizontal, ambos elementos encontrados en el ícono de *Numéricos*. Además se implemento mediante LED rectangulares un sistema de alarmas que indique los rangos de temperatura baja, normal y alta del proceso durante su operación.

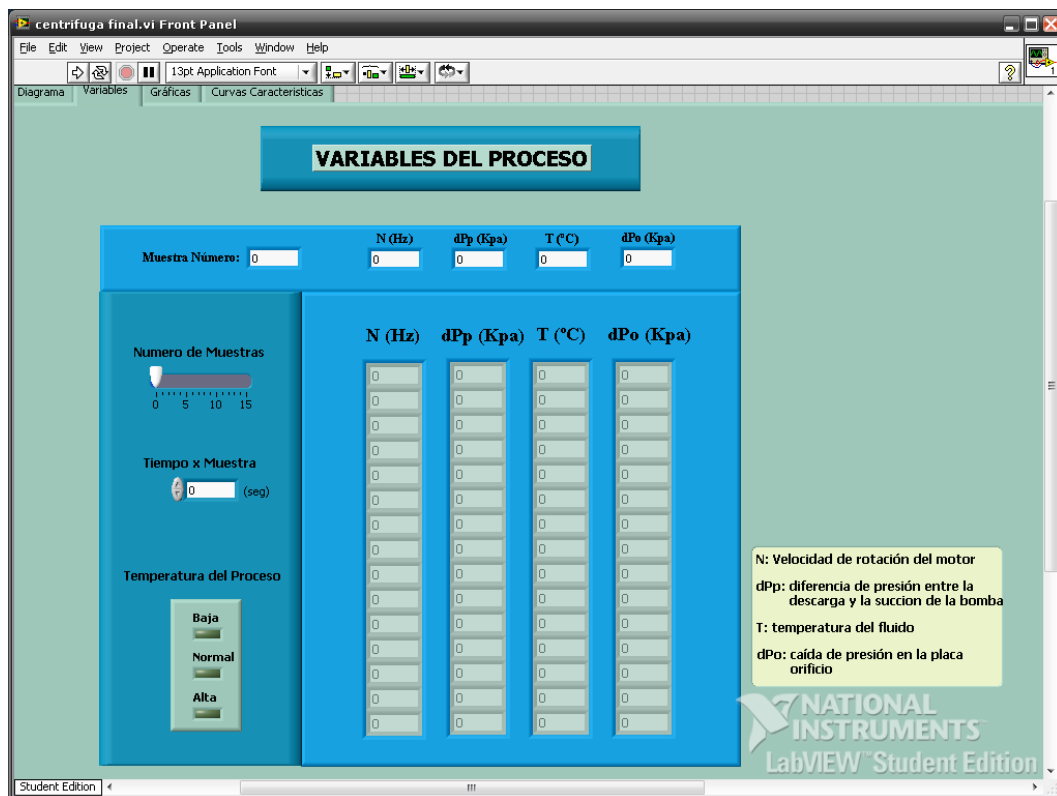


Fig. 4.14. Variables del proceso [fuente: propia]

La tercera página corresponde a las gráficas de las variables (velocidad, temperatura, presión diferencial en la placa orificio y la diferencia de presión a la entrada y salida de la bomba) en función del tiempo de muestreo (fig. 4.15), creadas con el ícono *Gráficas* encontrado en la paleta de control. Del mismo modo se diseñó la página de curvas características (fig. 4.16) escogiendo el tipo de gráfica necesario para cada caso.

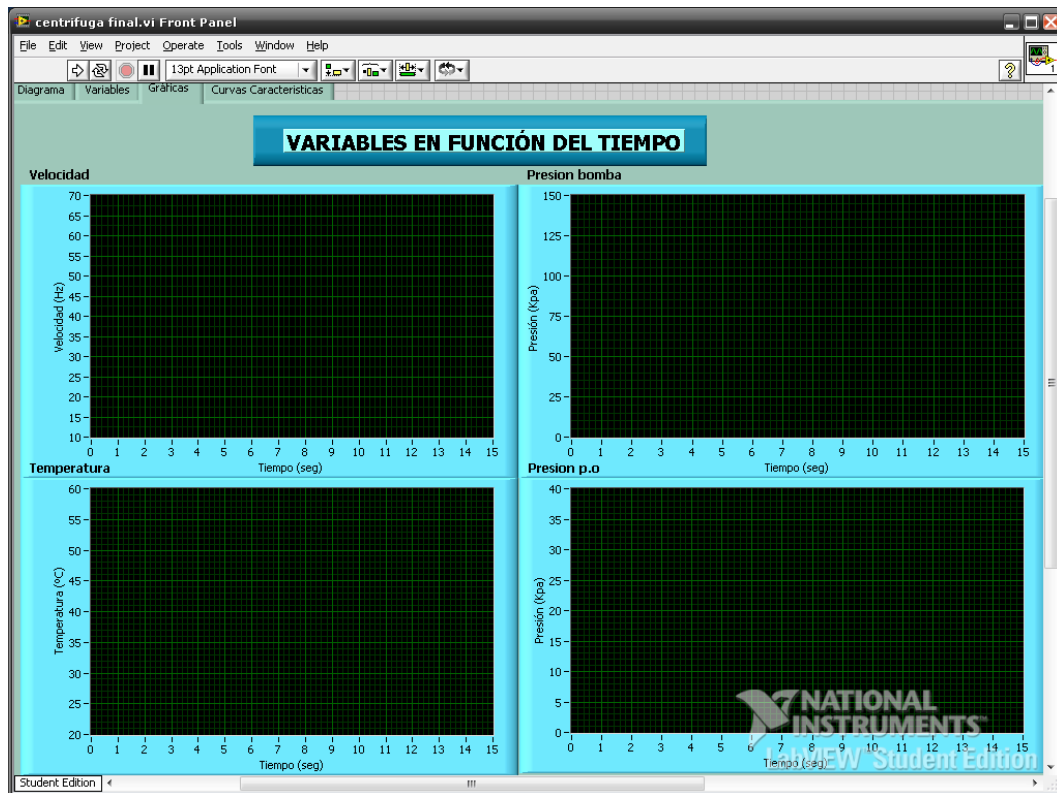


Fig. 4.15. Gráficas de las variables medidas en el banco de pruebas en función del tiempo [fuente: propia]

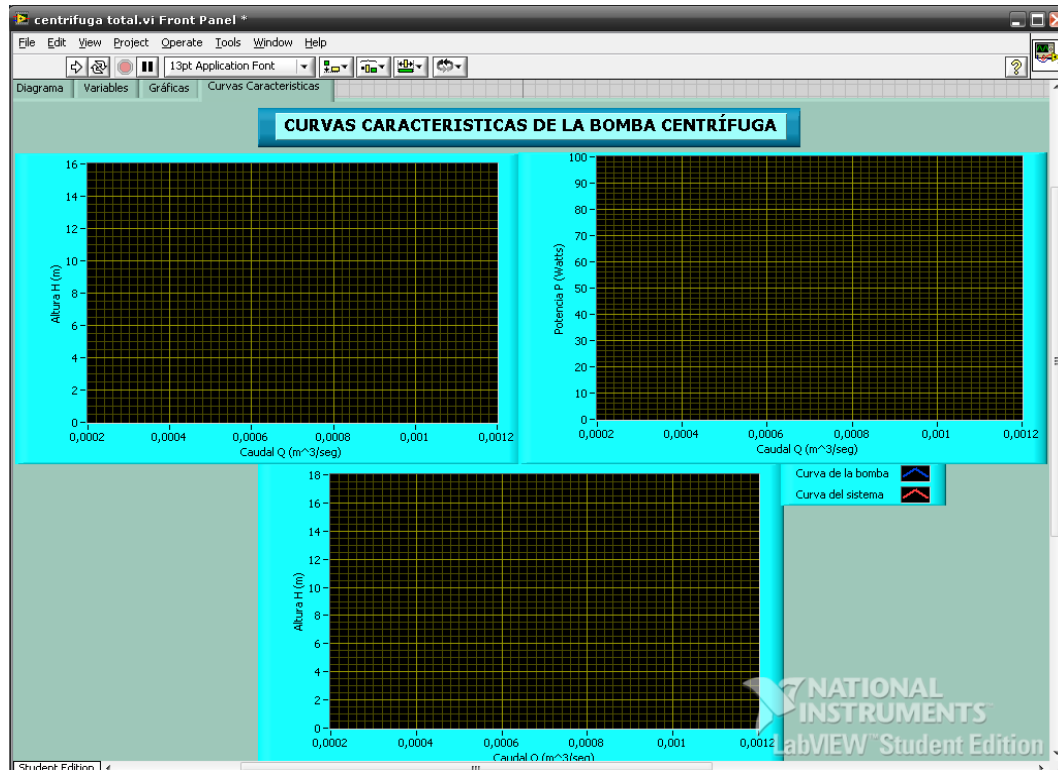


Fig. 4.16. Curvas características de la bomba centrífuga [fuente: propia]

Al colocar en el panel frontal todos los objetos necesarios para crear el entorno gráfico se procede a programar en otra ventana que posee el programa llamada diagrama de bloque.

4.5.2 Diagrama de Bloques

El diagrama de bloques (figura 4.17) constituye el código fuente del instrumento virtual. En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesado de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal. ^[16]

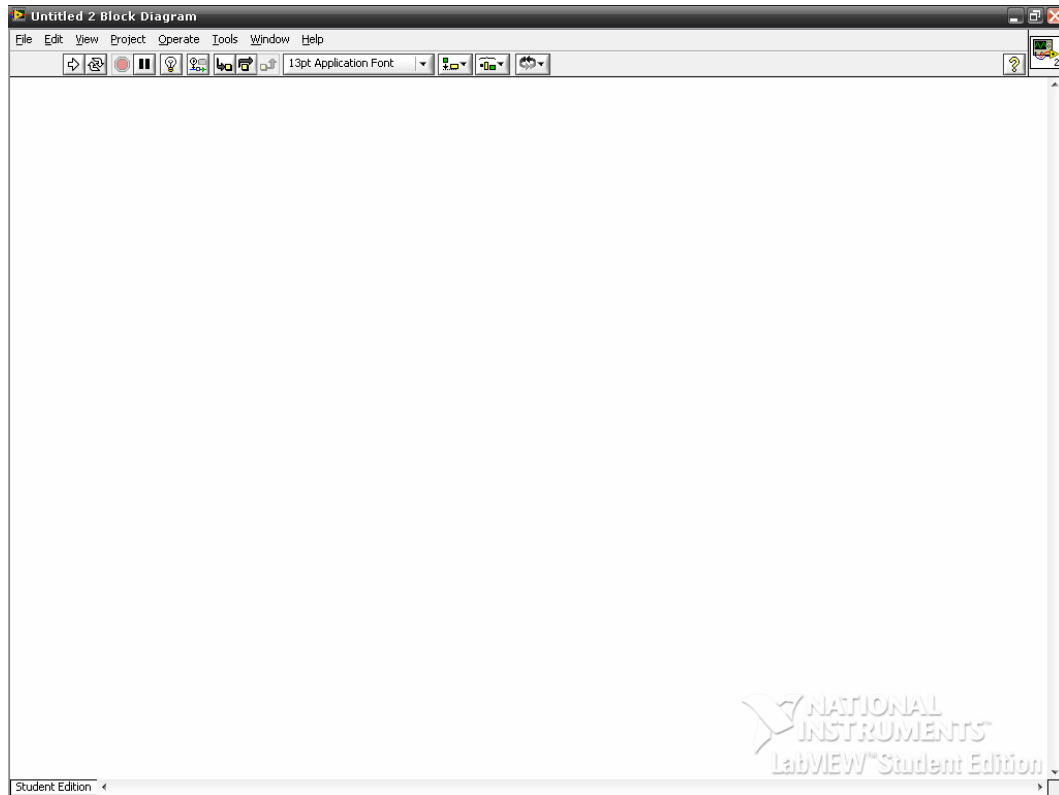


Fig. 4.17. Diagrama de bloques [Fuente: propia]

Cabe destacar, que los controladores e indicadores que se colocaron previamente en el panel frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los terminales. Estos se unen entre sí para permitir el flujo de datos y mostrar lo deseado.

El diagrama de bloques desarrollado para este proyecto se muestra en la figura 4.18. A continuación se explica de forma detallada, la programación del diagrama para el banco de pruebas.

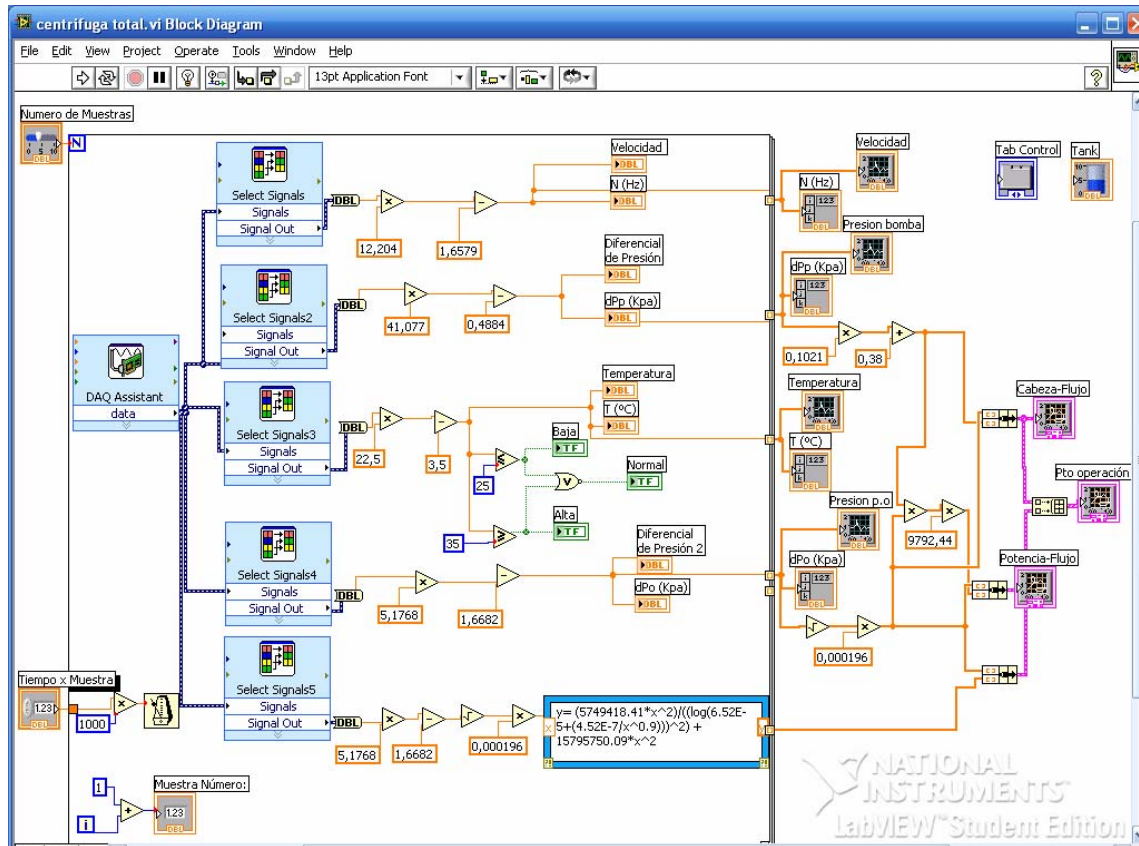


Fig. 4.18. Diagrama de bloque del banco de pruebas FM20 [Fuente: propia]

Al entrar al diagrama de bloques, encontramos los objetos programables colocados en el panel frontal, con ellos se procede a iniciar la programación del proceso. Para iniciar, se debe establecer las señales que entran a la tarjeta de adquisición de datos, identificar el canal de entrada de cada una de ellas, y el tipo de señal que entra, que en el caso del proyecto es en forma de voltaje. Esto se logra a través del bloque DAQ Assistant donde se establece lo siguiente:

Tabla 4.4. Datos necesarios para la programación del bloque DAQ Assistant

Variable del proceso	Canal	Rango de entrada a la TAD (volt)
Velocidad	ai0	2,2 – 4
Diferencial de presión a través de la bomba	ai1	0,4 – 1
Temperatura	ai2	1,4 – 1,8
Diferencial de presión en la placa orificio	ai3	1,8 – 4,8

Seguidamente, se implementaron selectores de señales para dividir las variables y poder programarlas de forma independiente, es decir, cada selector posee una señal de solo un canal de los programados en el bloque anterior, además se integraron a la salida de los selectores, convertidores DBL para transformar la señal escalar en vectorial para facilidades de programación. Ahora la señal que se transmite en forma de voltaje desde la tarjeta de adquisición de datos debe ser llevada a las unidades correspondientes de cada variable, es decir, a Hz en el caso de la velocidad, a Kpa para las presiones y °C para la temperatura. Esto se logra aplicando las ecuaciones matemáticas que rigen las relaciones entre variable y acondicionador obtenidas en el capítulo anterior. De manera más explícita y recordando las ecuaciones se realiza el siguiente esquema que indica la ecuación que corresponde a la señal proveniente de cada selector:

- Selector de señal (ai0): $Y = 12,204X - 1,6579$
- Selector de señal 2 (ai1): $Y = 41,077X - 0,4884$
- Selector de señal 3 (ai2): $Y = 22,5X - 3,5$
- Selector de señal 4 (ai3): $Y = 5,1768X - 1,6682$

Culminando la programación de conversión de las señales, se emplea al final de cada ecuación el indicador numérico correspondiente a cada variable, el cual ya fué establecido en el panel frontal y automáticamente registrado en el diagrama de bloques, de manera tal que puedan observarse los valores de las variables durante el funcionamiento del equipo.

En el caso particular de la temperatura (selector de señal 3) se creó un sistema de alarma con leds rectangulares programados de la siguiente manera:

- Para $T < 25^{\circ}\text{C}$: temperatura baja
- Para $25 < T < 35$: temperatura normal
- Para $T > 35$: temperatura alta.

Todo lo antes descrito, se encierra en una estructura FOR LOOP, ya que es una estructura iterativa donde se colocó un contador que permite seleccionar el tiempo entre muestras y el conteo progresivo de cada muestra.

Adicional a ésto, se conectaron a las líneas de señales antes descritas y fuera de la estructura FOR LOOP, las graficas seleccionadas en el panel frontal que representan el comportamiento de cada variable en función del tiempo. Para ello debe llenarse primero la matriz diseñada en el panel frontal, la cual va a registrar progresivamente los valores de las variables en número y tiempo establecidos por el usuario. El primer elemento de la matriz ocupa el puesto cero (0), el siguiente ocupa el puesto uno (1) y así sucesivamente hasta completar los 15 cuadros que tiene la matriz para cada variable o el numero de muestras que haya seleccionado el usuario. El programa almacena el numero de datos seleccionado que llega de la tarjeta de adquisición y al completarlos se muestran en la matriz y crea una curva continua. Cabe destacar que al estar dentro de la estructura FOR LOOP el proceso se va a repetir tantas veces como se indique en el número de puntos de muestras.

Seguidamente se incorporó a la línea de diferencia de presión a través de la bomba (selector de señal 2) la ecuación (4.1) en su forma simplificada correspondiente a la cabeza de la bomba

$$H = (Z_2 - Z_1) + \frac{dpp}{\rho \cdot g} \quad (4.1)$$

Donde:

$Z_2 - Z_1$: altura geodésica (constante) = 0.38m

ρ : densidad del fluido = 998.21 Kg/m³

g : gravedad = 9.81 m/s²

dpp : diferencial de presión a la entrada y salida de la bomba

Es importante señalar que la densidad del fluido varía en función de la temperatura, considerando que la duración de una prueba con el banco FM20 es por lo general algo rápida, y de esta forma no hay cambios considerables de temperatura en el fluido, la variación de la densidad es despreciable y por ende se considera constante.

Quedando de forma simplificada para ser introducida en el programa como:

$$H = 0.38 + 0.1021dpp \quad (4.2)$$

La línea del selector de señal 4 (presión en la placa orificio) se unió a la ecuación (4.2) correspondiente al caudal que circula por el sistema, de la siguiente forma:

$$Q = \frac{C_d \cdot \pi \cdot d^2 \sqrt{(2 \cdot \rho \cdot dpo)}}{4 \cdot \rho} \quad (4.3)$$

Donde:

C_d : coeficiente de descarga = 0.610

d : diámetro de la placa orificio = 0.017m

ρ : densidad del fluido = 998.21 Kg/m³

dpo : presión diferencial en la placa orificio

El coeficiente de descarga fue proporcionado por los fabricantes del banco de pruebas (Armfield).

De manera simplificada para introducirla en el programa de obtuvo que:

$$Q = 1.9598 * 10^{-4} * \sqrt{dpo} \quad (4.4)$$

Para luego llevar ambas líneas a un ícono gráfico el cual mostrará en el panel frontal la curva perteneciente al comportamiento del sistema.

De igual modo se programa la potencia de la bomba mediante la ecuación 4.5, donde las variables caudal y altura son tomadas de las líneas ya programadas. Esta nueva línea de potencia y la línea de caudal son llevadas a un Cluster que une las señales y las envía al ícono gráfico para ser mostradas en el panel frontal.

$$P = \rho.g.Q.H \quad (4.5)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido = 998.21 Kg/m³

g : gravedad = 9.81 m/s²

Q : Caudal

H : altura de la bomba

Cabe destacar que Q y H son variables programadas en el sistema.

Existe un selector de señal 5 que al igual que en el selector 4 recibe la señal ai3, se programa con la ecuación $Y=5.1234X-1.6178$ y la ecuación 4.3 en su forma simple, que corresponde a la conversión de voltaje a Kpa de la diferencia de presión proveniente de la placa orificio y la ecuación de caudal respectivamente, y está dentro de la estructura FOR LOOP. El motivo de repetir un selector con esta señal es el de programar una línea que corresponda a la altura de bombeo del sistema con el fin de mostrar en una misma gráfica la curva de la bomba y la curva del sistema para hallar el punto de operación de la bomba.

Aplicando la ecuación de Bernoulli al sistema, se logra obtener la siguiente ecuación que representa la altura del sistema en función del caudal (ver apéndice A para la deducción de la ecuación 4.6):

$$H_s = \frac{2LQ^2}{\pi \cdot g \cdot D^5 \left(\log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{\left(\frac{4Q}{\pi \cdot D \cdot v} \right)^{0.9}} \right] \right)^2} + \sum K \frac{8Q^2}{\pi \cdot g \cdot D^4} \quad (4.6)$$

Cuya ecuación es llevada a su mínima expresión e introducida en el programa de la siguiente manera:

$$H_s = \frac{5749418.41Q^2}{(\log[1.76E-5 + \frac{4.52E-7}{Q^{0.9}}])^2} + 15795750.09Q^2 \quad (4.7)$$

Es importante señalar que la curva del sistema que se obtiene mediante esta ecuación corresponde a una apertura de válvula totalmente abierta, ya que los coeficientes K de todos los accesorios del sistema, incluyendo la válvula de descarga que se manipula en el banco durante la realización de una prueba son considerados constantes.

La ecuación 4.7 se incorpora a la línea del selector de señal 5 mediante una estructura NODE donde Hs se denota con la letra “y” y Q con la letra “x”, todo esto dentro de la misma estructura FOR LOOP. Esta línea junto con la línea de caudal programada por el selector 4 son llevadas a un cluster donde se unen formando la curva altura-flujo del sistema y envían a un *build array* que tiene una de sus entradas unida al cluster que contiene las señales de la curva altura-flujo de la bomba. De este elemento ARRAY sale una sola señal que va a un ícono gráfico donde se muestran ambas curvas y se observa el punto de operación de la bomba.

Finalmente se obtiene el diagrama de bloques con la programación necesaria para poner en funcionamiento el software y obtener los datos, graficas y demás parámetros establecidos en el panel frontal.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1 Generalidades

La finalidad de este proyecto además de reacondicionar y automatizar el banco de pruebas, es el poder contar en el laboratorio de termodinámica de la Universidad de Oriente con un equipo didáctico que permita enseñar al estudiante, específicamente de Ingeniería Mecánica, el funcionamiento y características de operación de una bomba centrífuga y de un sistema automatizado, el cual se asemeje a los que posiblemente se encontrará en el campo laboral. Es por ello que en este capítulo se persigue validar de forma experimental los resultados arrojados por el software, proponer una práctica de laboratorio que le permita al estudiante reforzar sus conocimientos en esta área de la ingeniería y proporcionar un instructivo con los requerimientos mínimos de seguridad que se deben llevar a cabo para operar el equipo.

5.2 Datos Obtenidos Del Banco De Pruebas

Para validar y probar la correcta automatización del sistema se procedió a realizar una prueba para obtener los valores de las variables (Velocidad, presión diferencial a la entrada y salida de la bomba, presión diferencial en la placa orificio y temperatura) arrojadas por el banco de prueba fijando los siguientes parámetros:

- Número de muestras: 15
- Tiempo por muestra: 5 s.
- Potencia suministrada: 80%

Además se manipuló la válvula de descarga de la bomba para obtención de la data. La primera toma corresponde a la válvula totalmente cerrada, luego se hicieron aperturas sucesivas hasta llegar a la última muestra que corresponde a la válvula totalmente abierta. Cada apertura se realizó en un tiempo de 5 segundos, que es el que se establece en el tiempo por muestra, y el cual se consideró suficiente para lograr la estabilización del sistema y poder obtener una correcta data. Esta estabilidad se comprobó con la realización de pruebas previas a ésta donde se varió el tiempo por muestra a rangos de hasta 15 segundos, obteniéndose siempre comportamientos similares a los mostrados a continuación.

Siguiendo lo antes mencionado se obtuvieron los siguientes datos (ver fig. 5.1):

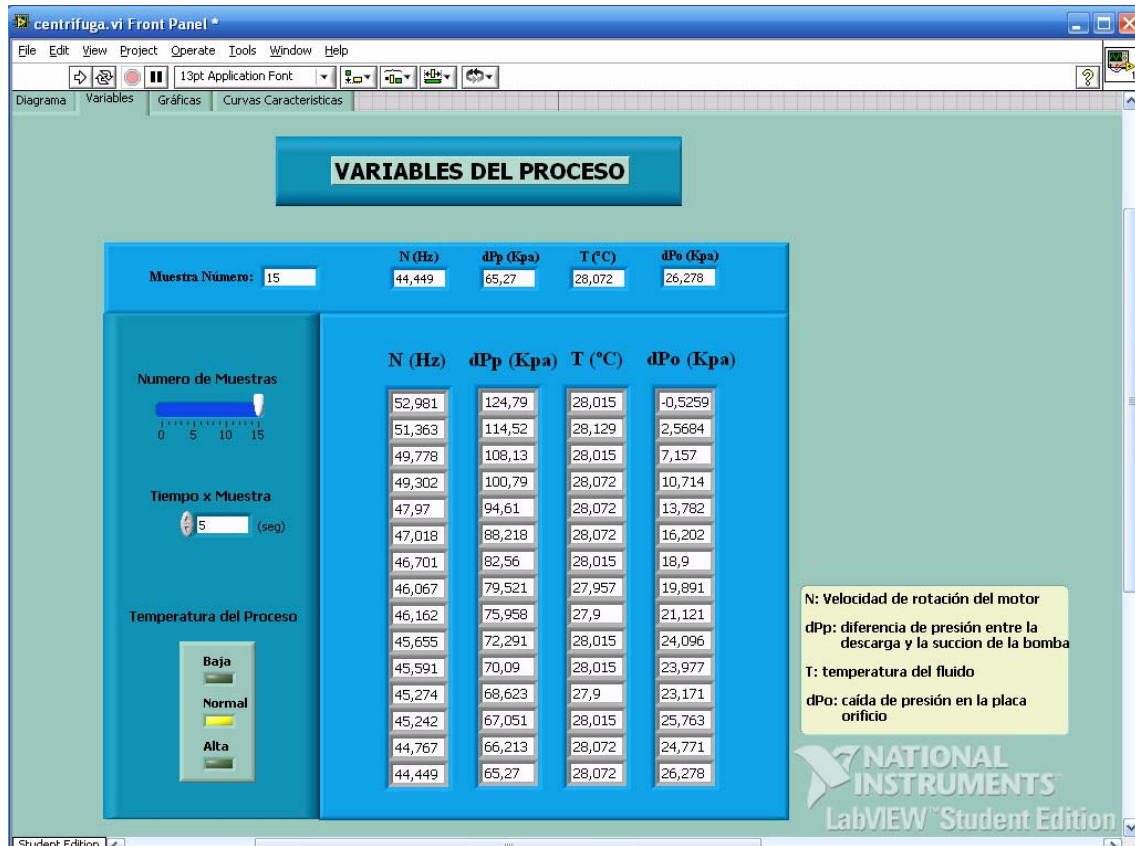


Fig. 5.1. Datos obtenidos en el banco de pruebas.

Una vez obtenidas las muestras, el sistema procede a tomar los datos y calcular el caudal (m^3/s), la altura de la bomba (m), la potencia (Watts) y la curva del sistema para continuar a graficar las curvas altura-caudal, potencia-caudal y el punto de operación de la bomba.

5.3 Curvas Características Del Banco De Pruebas Fm20

Como se dijo anteriormente, con los datos obtenidos y la correcta programación en LabVIEW 8.20 se obtuvieron las curvas características del sistema y se graficaron cada una de las variables en función del tiempo para visualizar su comportamiento.

5.3.1 Variables Del Proceso En Función Del Tiempo

5.3.1.1 Velocidad En Función Del Número De Muestra Correspondiente

En la fig. 5.2 se muestra la curva que resulta de evaluar la velocidad rotacional del motor de la bomba en función del número de muestra correspondiente a cada apertura de válvula y en el intervalo de tiempo señalado para cada toma de muestra, estableciendo una potencia eléctrica de suministro del 80% (fijada en el SWA1), donde se observa un descenso en la velocidad en los primeros puntos de toma y luego un comportamiento constante en la mayor parte de la curva, esto se debe a la variación de fluido que se logra al manipular la válvula de descarga. Al cerrar la válvula de descarga deja de entrar fluido a la bomba, quedando el que estaba en circulación acumulado en el impulsor. En este punto, la bomba no realiza ningún trabajo ya que no tiene que succionar fluido para desplazarlo a ninguna parte, por lo que el motor de la bomba tiende a acelerarse ya que se mantiene la misma potencia eléctrica, pero el equipo no necesita vencer la fuerza con que entra el fluido y que requiere para ser impulsado. Del mismo modo, al abrir el paso de descarga el fluido vuelve a entrar a la bomba para ser impulsado, lo que le obliga a realizar un trabajo para tal fin y lo que hace que reduzca la velocidad, ya que al aumentar la cantidad de fluido la fuerza que debe vencer es mayor con la misma potencia que al inicio de la prueba.

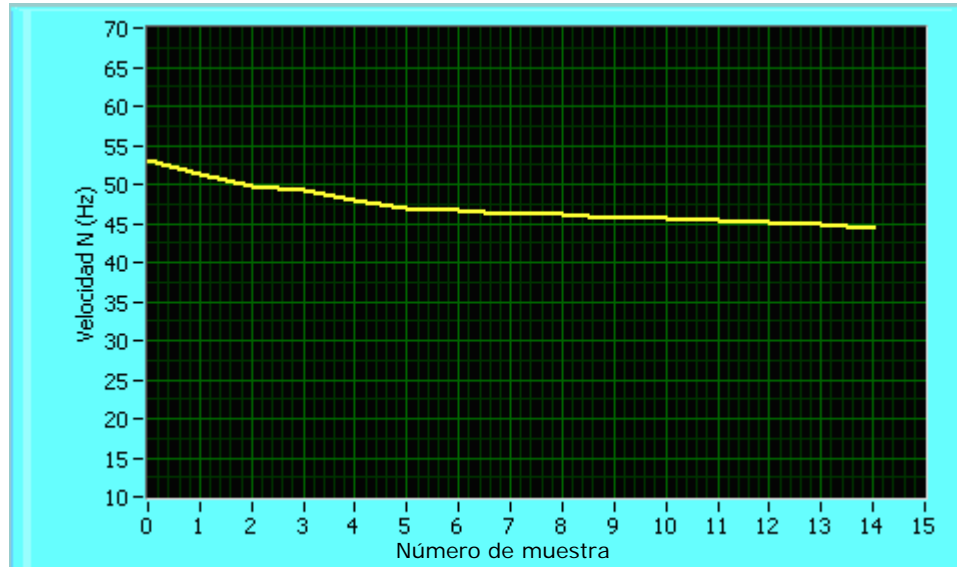


Fig. 5.2. Curva de velocidad rotacional del motor en función al número de muestra

5.3.1.2 Diferencia De Presión A La Entrada Y Salida De La Bomba En Función Del Número De Muestra

En la figura 5.3. Se muestra la presión diferencial medida en la bomba con respecto al número de la muestra correspondiente a la apertura de válvula y el intervalo de tiempo establecido. En esta gráfica se muestra el descenso del cambio de presión que ocurre a medida que se apertura la válvula de salida de la bomba. Al obstruir el paso de fluido a la descarga de la bomba, el líquido en circulación queda atrapado girando entre los álabes del impulsor, la fuerza centrífuga originada por la bomba le imprime presión e impulsa el fluido hacia las paredes de la carcasa y hacia la salida de la bomba generando una mayor presión en este punto, lo que origina la gran diferencia de presión que se observa. Al abrir la válvula gradualmente, el fluido acumulado se va liberando, reduciendo la presión a la descarga por lo que disminuye la diferencia de presión entre la entrada y salida de la bomba.

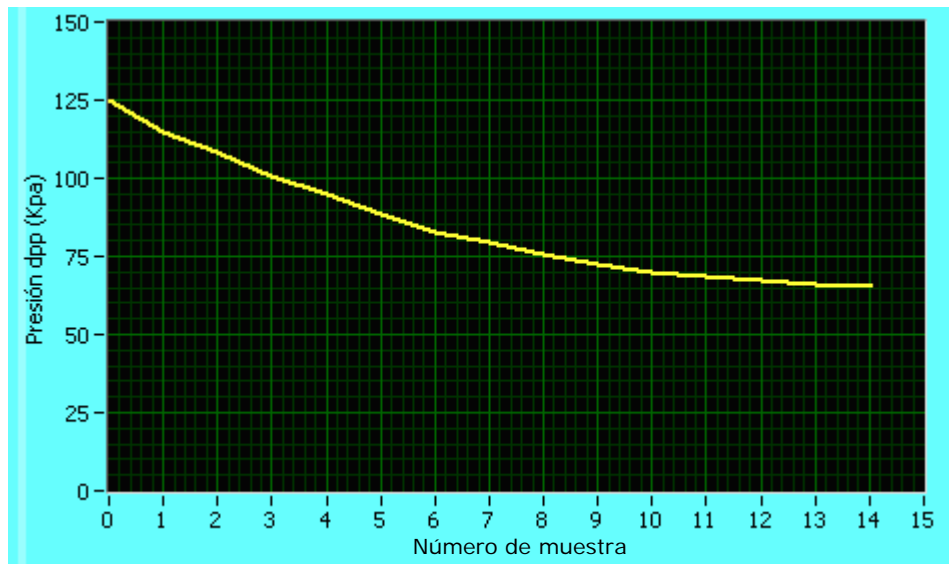


Fig. 5.3. Diferencia de presión a la entrada y salida de la bomba en función del número de la muestra.

5.3.1.3 Temperatura En Función Del Número De Muestra

La temperatura es una variable que tiende a permanecer constante durante la realización de una toma de muestras, ya que el tiempo de estudio no es muy amplio como para percibir un incremento de dicha variable. Aún así, al realizar el estudio estrangulando la válvula de descarga se realiza una disminución de fluido, por ende, una baja en el rendimiento de la bomba, lo que se traduce en un aumento en la temperatura del líquido por refrigeración insuficiente.

Sin embargo, durante la realización de este trabajo se notó que al mantener en operación la bomba por tiempo prolongado se registran aumentos de temperatura debido a varios factores, el fluido al realizar su recorrido por todo el sistema va elevando su temperatura, sobre todo al entrar a la bomba, el mismo fluido que viene con cierto aumento de temperatura entra al tanque de almacenamiento, transfiriendo su calor al resto del líquido almacenado en el tanque y es recirculado de nuevo a la

bomba. Este proceso repetitivo hace que se eleve cada vez más la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento, lo que ocasiona que el fluido succionado por la bomba entre a temperaturas mayores que al inicio del proceso. Otro factor es que el recorrido del líquido desde la salida del tanque de almacenamiento hasta la entrada al mismo, luego de hacer el recorrido, no es lo suficiente como para lograr su enfriamiento por transferencia de calor en su trayecto por las tuberías del sistema, antes de llegar al tanque de almacenamiento. En la figura 5.4 se muestra el comportamiento constante de la temperatura en el tiempo de duración de la toma de datos.

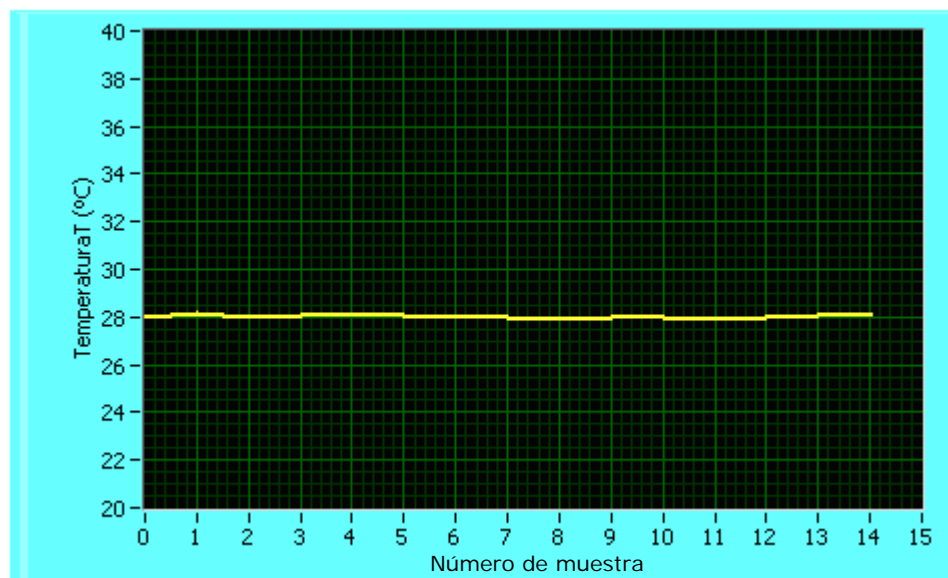


Fig. 5.4. Gráfica de temperatura en función del número de muestra.

5.3.1.4 Presión Diferencial En La Placa Orificio En Función Del Número De La Muestra.

La placa orificio es un instrumento de medida de presión diferencial que crea una obstrucción en el paso del fluido con el fin de medir la caída de presión producida y se encuentra ubicada en el banco de pruebas luego de la válvula de descarga.

Cuando se obstruye totalmente el paso del fluido por la válvula ($Q=0$), la presión que se origina en la placa orificio es una presión de vacío dando un valor de presión negativo o en su defecto cero (0) como se muestra en la figura 5.5 al inicio de la toma de muestras, ya que la presión originada antes y después del instrumento es la misma, luego, al incrementar levemente la apertura de la válvula, la cantidad de fluido que pasa por el instrumento de medida también aumenta levemente produciéndose ya una presión mayor aguas arriba de la placa orificio y cierta presión en el lado aguas abajo menor que la anterior, ésta diferencia de presión se va incrementando a medida que sigue aumentando la apertura de la válvula, ya que en el lado de alta de la placa orificio aumenta significativamente la presión, mientras que el lado de baja la presión registra leves incrementos debido a la obstrucción que realiza el instrumento.

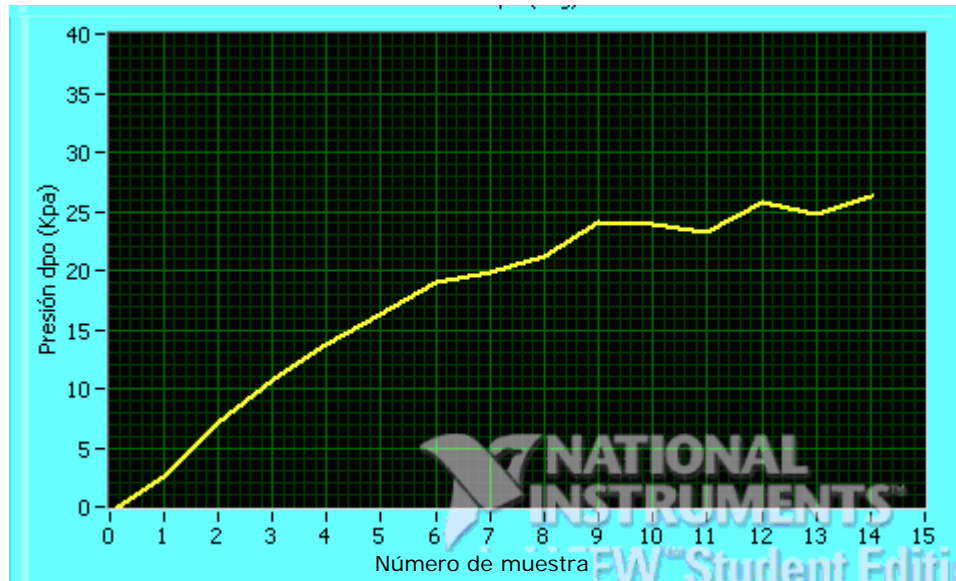


Fig. 5.5. Curva de presión diferencial en la placa orificio en función del número de muestra

5.3.2 Curva Altura-Caudal De La Bomba Centrífuga

Como se explicó anteriormente para la gráfica de diferencial de presión a la entrada y salida de la bomba, esta variable aumenta al obstruirse el paso de fluido en la válvula de descarga. La altura de la bomba, definida anteriormente en la ecuación 4.1, viene dada por:

$$H = (Z_2 - Z_1) + \frac{dpp}{\rho \cdot g}$$

De allí se nota que la altura de la bomba es directamente proporcional a la diferencia de presión a través de la bomba, por lo tanto al estrangular la válvula de salida haciendo el caudal cero (0) la altura de bombeo es mayor, al ir incrementando el paso de fluido, la diferencia de presión decrece presentándose una disminución en altura, ya que la fuerza necesaria para elevar el fluido disminuye debido a que el

aumento del mismo crea mayor resistencia y una contra fuerza mayor y más difícil de vencer.

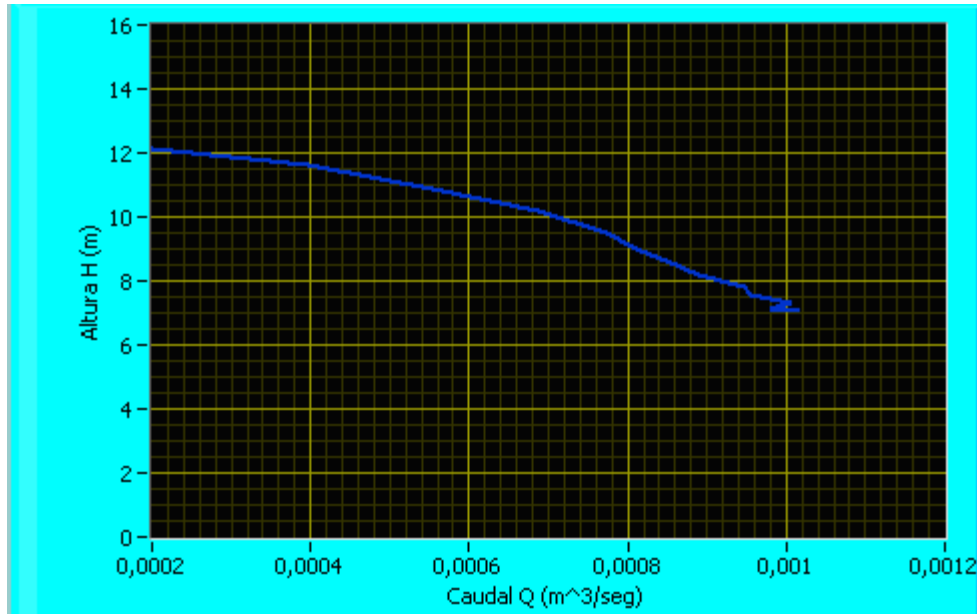


Fig. 5.6 Curva Altura-Caudal de la bomba centrífuga.

5.3.3 Curva Potencia-Caudal De La Bomba Centrífuga

La potencia que adquiere el fluido al pasar por la bomba es función de la altura bombeada y el caudal manejado. Viene dada por la siguiente ecuación definida en el capítulo anterior (Ec 4.5):

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H$$

Cuando el caudal tiende a ser mínimo ($Q \approx 0$), el trabajo realizado por la bomba también es mínimo, por lo que el suministro de potencia al fluido tiende a ser cero. Por el contrario, al incrementar gradualmente el caudal, el trabajo que requiere realizar el equipo para bombear el fluido a una determinada altura es mayor, por lo que la potencia que se le otorga al fluido para que logre su recorrido aumenta.

En la figura 5.7 se puede notar que en los primeros aumentos de flujo, la potencia se incrementa de forma significativa, debido a que la cantidad de fuerza que ejerce el fluido y que es necesaria vencer para lograr la altura deseada es mínima, sin embargo al final de la curva se presenta una potencia casi constante donde el caudal tiende a ser máximo y la altura de bombeo mínima, ya que en estos puntos la bomba opera con la máxima capacidad de carga, por lo que el trabajo realizado tiende a ser mayor y le imprime al fluido la potencia máxima que es capaz de entregar.

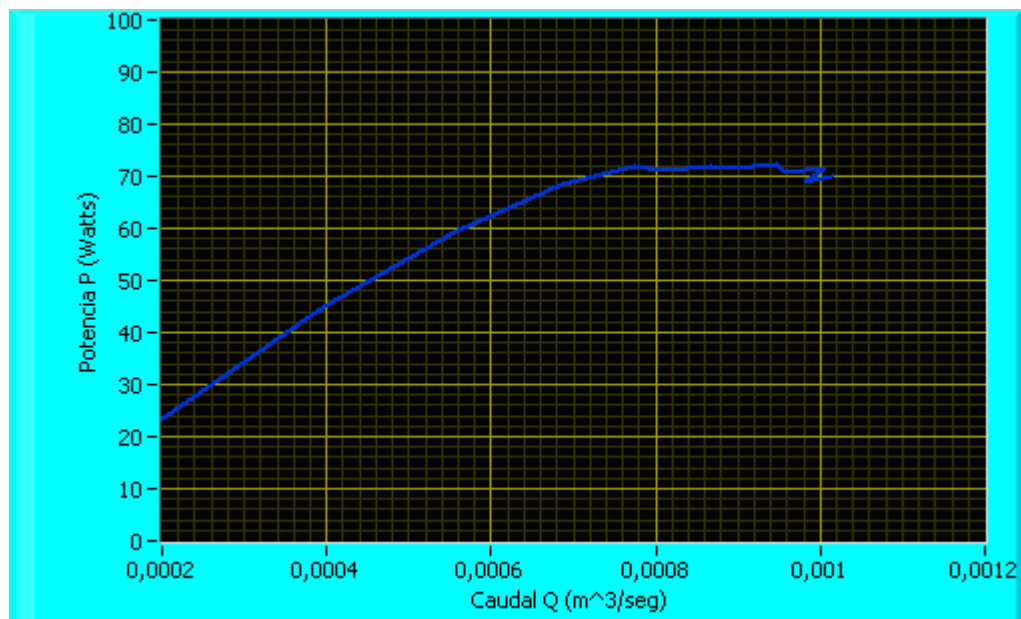


Fig 5.7 Comportamiento de la potencia en función del caudal

5.3.4 Punto De Operación De La Bomba:

El punto de operación de la bomba viene dado por el punto en el cual se intersectan la curva altura-caudal de la bomba con la curva altura-caudal del sistema. Esta última, también llamada curva de carga del sistema, contiene la carga estática producida por la diferencia de altura geodésica entre los puntos de inicio y final del sistema y las diferencias de presión manométricas en esos mismo puntos; y las pérdidas por fricción que incluyen las pérdidas en la tubería, accesorios y los cambios de velocidad en el sistema.

En la curva del sistema generada en este proyecto las cargas estáticas se hacen cero, lo que se traduce en que la altura de carga total de sistema es igual a las pérdidas por fricción. Ambas curvas (bomba y sistema) pueden ser modificadas por estrangulamiento en la válvula de descarga y la curva de la bomba además modificada por un cambio en la velocidad, lo que implicaría una variación en la capacidad de operación de la bomba.

En la figura 5.8, se muestra el punto de operación de la bomba ($Q=0.00076\text{m}^3/\text{s}$; $H=9.5\text{m}$) trabajando a un 80% del suministro de potencia eléctrica, se nota que la elevación de carga del sistema cuando el caudal corresponde a una apertura de válvula totalmente abierta, es de aproximadamente 17m y la altura de bombeo generada es de 12m lo que indica que el sistema es capaz de soportar altura de bombeo mayores que pudieran generarse con un equipo de mayor potencia o la inclusión de una bomba en serie.

Es importante señalar que para la obtención de la curva del sistema se consideró el coeficiente de pérdida de la válvula constante, ya que su variación al manipular la

válvula no influye de manera significativa en la totalización de las sumas de pérdidas por accesorios del sistema.

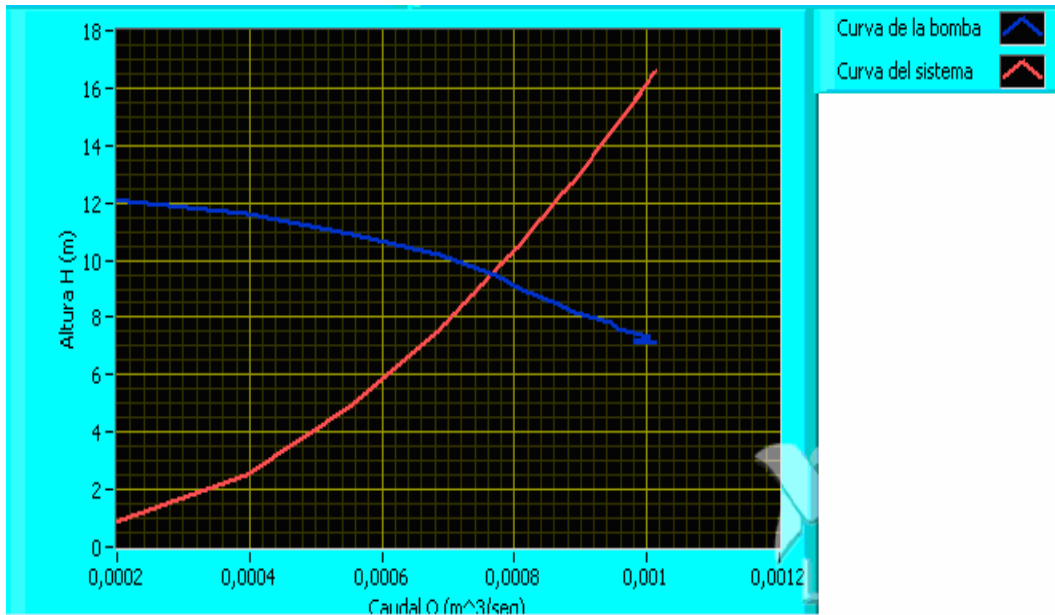


Fig 5.8 Punto de operación de la bomba centrífuga

5.4 Procedimientos Para Evaluar Y Demostrar El Comportamiento De La Bomba Centrífuga

A continuación, se propone una práctica de laboratorio donde se explican los procedimientos necesarios para evaluar y demostrar el comportamiento de la bomba centrífuga.

5.4.1 Práctica De Laboratorio

5.4.1.1 Objetivos

5.4.1.1.2 Objetivo General:

Conocer el funcionamiento y características inherentes de una bomba centrífuga.

5.4.1.1.3 Objetivos Específicos:

- Asegurar que el usuario comprenda las unidades medidas y las variables necesarias a calcularse para el funcionamiento de la bomba centrífuga.
- Obtener las curvas cabeza-flujo para la bomba centrífuga en distintos rangos de velocidad.
- Predecir las curvas cabeza-flujo de la bomba con el uso de las leyes de semejanza a partir de una velocidad conocida.
- Obtener el punto de operación de la bomba a una velocidad determinada.
- Discutir los resultados obtenidos y comparar las curvas realizadas con las arrojadas por el software.

5.4.1.2 Procedimiento Experimental:

Siguiendo las indicaciones y sugerencias de seguridad descritas en el manual de operación del banco de pruebas, realizar los siguientes pasos:

1. Abrir completamente la válvula de entrada y válvula de salida de la bomba. Encender la bomba y dejar fluir el agua por unos minutos para que se establezca el sistema.
2. Decida porcentajes de potencia a los cuales va a operar la bomba para la toma de muestras.

3. Cierre completamente la válvula de descarga hasta que el flujo sea cero (0), e inmediatamente presione la tecla RUN en el programa para iniciar la toma de muestras. **IMPORTANTE:** la bomba no debe permanecer mucho tiempo en este estado de válvula de descarga completamente cerrada, ya que además de generarse posibles errores en las muestras, podrían ocasionarse daños al equipo. Realice la operación en un tiempo relativamente rápido.
4. Haga leves incrementos de flujo abriendo la válvula de descarga 1/3 de vuelta hasta lograr 15 puntos de muestra. El primer punto corresponderá a flujo cero (válvula completamente cerrada) y el último a un flujo máximo (válvula totalmente abierta).
5. Imprimir las pantallas del software y colocarlas en un documento de Word para ser archivadas.
6. Repetir los pasos 2, 3, 4 y 5 para 2 porcentajes más de potencia diferentes.
7. Repetir los pasos 3, 4 y 5 fijando una velocidad máxima de 55Hz.
8. Parar la corrida del software y apagar el equipo.

5.4.1.3 Cálculos A Realizar:

- Graficar las curvas cabeza-flujo de la bomba a los 3 porcentajes de potencia eléctrica establecidos.
- Graficar las curvas cabeza-flujo de la bomba a una velocidad de 40Hz a partir de la velocidad de 55Hz
- Obtener el punto de operación de la bomba a una velocidad de 40 Hz

5.5 Manual De Operación Del Banco De Pruebas

Para realizar las pruebas de laboratorio y cualquier otra toma de datos o puesta en funcionamiento del banco de pruebas FM20 de bomba centrífuga es necesario

cumplir una serie de pasos que garanticen el buen funcionamiento del equipo y evite cualquier inconveniente de operación o daño en el mismo.

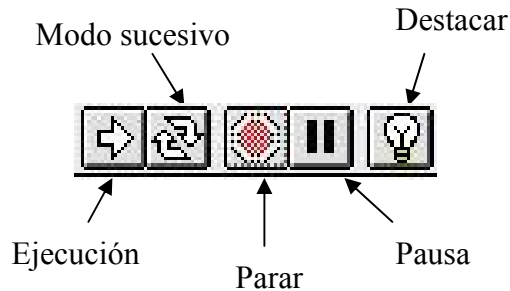
5.5.1 Pasos A Seguir Antes De Poner En Funcionamiento El Equipo:

1. Verificar que el banco de pruebas se encuentre apagado y no existan fugas de fluido en el sistema de tuberías, tanque y válvulas.
2. Asegurar que la válvula de descarga de la bomba esté completamente abierta.
3. Verificar la conexión eléctrica del banco de pruebas y la alimentación del módulo de adquisición de datos.
4. Comprobar la correcta conexión de los sensores al módulo de adquisición de datos de la siguiente manera:
 - Canal 0: Sensor de velocidad rotacional SSO1
 - Canal 1: sensor de presión diferencial SPW3
 - Canal 2: sensor de temperatura STS1
 - Canal 3: sensor de presión diferencial SPW1
5. Tener en cuenta que:
 - No deben excederse las especificaciones de condiciones de operación máxima del equipo (temperatura, velocidad, presión, etc.)
 - Al transportar el equipo se debe tener el mayor cuidado posible para evitar daños en él.

5.5.2 Pasos Para Usar El Banco De Pruebas Y El Sistema De Adquisición De Datos:

1. Encender el computador y ejecutar el sistema de adquisición de datos con el software LabVIEW 8.20.

2. Encender el panel de adquisición de datos y conectar el cable USB al computador.
3. Encender el banco de pruebas Armfield FM20 de bomba centrífuga.
4. Una vez que esté el programa en ejecución, pulse el botón EJECUCIÓN para activar el sistema de adquisición de datos.



5. En el programa, seleccionar las ventanas activando las pestañas superiores disponibles para tal fin. Así se puede mover entre ventanas simplemente activando la pestaña correspondiente.
6. Seleccionando la ventana DIAGRAMA se puede observar el proceso y las variables medidas representadas en forma física en un diagrama del banco de pruebas, aquí se puede verificar los valores iniciales de las variables y su ajuste previo de ser necesario. Luego de realizar este paso pulsar PARAR.
7. Al seleccionar la ventana VARIABLES se ajusta la cantidad de muestras que se desean tomar (entre 0 y 15 puntos) y el tiempo entre muestras deseado, para luego comenzar la toma de datos al presionar la tecla EJECUCIÓN si se requiere una sola toma de muestras (se detiene automáticamente) o el botón MODO SUCESIVO para correr el programa tantas veces como se desee hasta que el mismo operario presione la tecla PARAR.
8. Al realizar el paso anterior, en la misma ventana aparecen los valores de las variables tomadas del sistema durante la ejecución del programa. Si los datos obtenidos no son satisfactorios se puede repetir el paso anterior realizando los ajustes necesarios al equipo.

9. Las muestras tomadas anteriormente son la base para la construcción de las gráficas. En la ventana GRÁFICAS se observa el comportamiento de las variables del sistema en función del tiempo.
10. Seleccionar la ventana CURVAS CARACTERÍSTICAS para observar las curvas altura-caudal, potencia-caudal y el punto de operación de la bomba.
11. Para finalizar la ejecución del programa pulse el botón PARAR en el panel de ejecución.
12. Como el sistema no cuenta con una impresora para obtener los resultados de manera directa, para guardar los resultados es necesario imprimir la pantalla y copiarla en un documento de Word.
13. Al terminar de realizar las pruebas, se deberá apagar el banco de pruebas.
14. Cerrar el programa de adquisición de datos y guardar la información.
15. Para finalizar, dejar todos los componentes de la práctica en estado óptimo para su posterior uso.

CONCLUSIONES

- La evaluación del banco de pruebas de bomba centrífuga permitió diagnosticar las condiciones en que se encontraba el equipo para así poder tomar las medidas y acciones necesarias para la automatización del equipo.
- El estudio de sistemas similares y software de programación permitió establecer un nuevo sistema de adquisición de datos que cumpliera con los fines establecidos de funcionamiento y las características del banco de pruebas.
- La adaptación de conectores y cableado telefónico en los acondicionadores de señal permitió la interconexión idónea entre éstos y el módulo de adquisición de datos.
- La tarjeta de adquisición de datos (NI 6009) implementada en éste trabajo, permitió la conversión adecuada de voltaje a la salida de los sensores en señal binaria, para luego ser procesada por el computador.
- El uso del software LabVIEW 8.20 permitió crear el enlace entre el sistema y el usuario estableciendo en ventanas los distintos parámetros a estudiar como variables, gráficas y curvas características de la bomba, logrando así la automatización del sistema.
- Se obtuvieron de manera satisfactoria las curvas características de la bomba centrífuga, representadas por la altura de bombeo en función del caudal, la potencia en función del caudal y la curva que muestra en punto de operación de la bomba

- Se describieron los procedimientos y pasos a seguir para el correcto manejo y uso del banco de pruebas bajo parámetros confiables de funcionamiento y de seguridad que resguarden tanto el equipo como al operario

RECOMENDACIONES

- Adquirir un equipo medidor de potencia eléctrica para contar con este parámetro como variable del sistema y así incrementar los conocimientos acerca del funcionamiento de la bomba, como por ejemplo, su eficiencia.
- Desarrollar nuevas prácticas de laboratorio, variando parámetros distintos a los manipulados para este proyecto. Un estudio importante sería el efecto que se produce en la bomba centrífuga y en todo el resto del sistema al estrangular el paso del fluido a la entrada de la bomba.
- Implementar un sistema de control que permita controlar el flujo de descarga de la bomba al variar las revoluciones del motor. Esto incrementaría la utilidad del banco de pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

1. McNaughton, K. “*Bombas – Selección, Uso y Mantenimiento*”. Editorial McGraw-Hill. Mexico (2005)
2. González, Y. “*Automatización del sistema de adquisición de datos de una bomba reciprocante tipo pistón*”. Barcelona (Venezuela), Tesis de especialización en la Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería, Departamento de Eléctrica (2007).
3. Crespo, M., “*Sistema de adquisición y tratamiento de datos del RICH-1 del Experimento COMPASS*” Argentina, Tesis doctoral en la Universidad Nacional de San Luís, (2004).
4. López, J., Reyes, J., Tobón, E., Otálora, J., y Velásquez, J., “*Aplicación de LabVIEW como instrumento virtual en mediciones de campo magnético (Gaussímetro)*” Revista Colombiana de Física, Vol. 37, No. 1, (2005).
5. Mataix, C. “*Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*”. Segunda edición. Editorial Alfaomega. México (1982)
6. Ledesma, M. “*Diseño de un sistema experto para selección y especificación de bombas centrifugas según el estándar API 610 con aplicaciones practicas para la industria petrolera*”. Barcelona (Venezuela), Trabajo Especial de Grado, U.D.O., Escuela de Ingeniería, Departamento de Mecánica. (1998).
7. Avallone, E., Baumeister, “*Manual del Ingeniero Mecánico*”. Novena Edición, Tomo 2. Editorial McGraw-Hill. Mexico (1999)

8. Fernandez, P. "***Bombas centrifugas y volumetricas***". Universidad de Cantabria, Departamento de Electrica y Energética.
9. Amendola, L. "***Instrumentación industrial***". Barcelona (Venezuela), U.D.O., Escuela de Ingeniería, Departamento de Eléctrica. (1999).
10. Bustillos, O. "***Instrumentación Industrial***". Barcelona (Venezuela), U.D.O., Escuela de Ingeniería, Departamento de Eléctrica. (2001).
11. Creus, A., "***Instrumentación Industrial***", Editorial Alfa Omega, S. A. México. (1989).
12. Smith C., Corripio., "***Control Automático de Procesos***", Editorial Adisson Wesley, (1996).
13. Doebelin, E., "***Ingeniería de Medición e Instrumentación Industrial***". Editorial Diana. México. (1980).
14. Pallas, A. "***Adquisición y distribución de señales***". Editorial Marcombo Boixareu, España (1993).
15. Pallas, A., "***Trasductores y Acondicionadores de Señal***", Editorial Marcombo Boixareu, España, (1987)
16. National Instruments "***LabVIEW™ Development Guidelines***", Part Number 321393D-01. Abril (2003).
17. Armfield, "***Manual de Instrucción FM20 (unidad de demostración de bomba centrífuga)***". Enero (2005).

18. Guzmán, J. ***“Desarrollo de un sistema de adquisición de datos para un banco de pruebas de una turbina hidráulica”***. Barcelona (Venezuela), Tesis de especialización en la Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería, Departamento de Eléctrica (2007).

APENDICE A
CALCULOS

DETERMINACION DE LA ALTURA DEL SISTEMA

El banco de pruebas de bomba centrífuga se describe como un sistema de bombeo compuesto por un tanque de almacenamiento de líquido, una reducción a la salida del tanque y entrada a la tubería de succión de la bomba, una válvula de bola, una bomba centrífuga, una válvula de compuerta unida a una expansión a la entrada de la misma y una reducción a su salida, una placa orificio y cuatro (4) codos de 90° a lo largo de la tubería de descarga. Los tramos de tuberías y accesorios están hechos de material PVC. A continuación se realiza un estudio de dicho sistema para determinar su máxima altura de carga permitida, las pérdidas primarias y secundarias ocurridas en él.

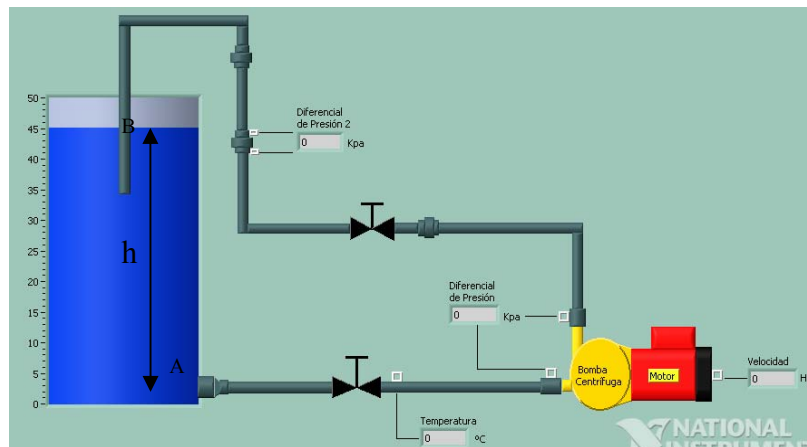


Fig. 4.9. Diagrama del sistema

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos A y B:

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2 \cdot g} + H_S = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2 \cdot g} + H_P$$

Donde:

Z_A : altura del punto A (referencia = 0m)

Z_B : altura del punto B medida desde el punto de referencia (m)

P_A : presión en el punto A (Pa)

P_B : presión en el punto B (Pa)

V_A : velocidad en el punto A (m/s)

V_B : velocidad en el punto B (m/s)

H_S : altura del sistema (m)

H_P : sumatoria de pérdidas por fricción (m)

γ : peso específico del fluido ($\text{kg/m}^2\text{s}^2$)

g : gravedad (m/s^2)

Despejando H_S

$$H_S = (Z_B - Z_A) + \left(\frac{P_B - P_A}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_B^2 - V_A^2}{2 \cdot g} \right) + H_P$$

Donde:

$$(Z_B - Z_A) = h$$

$$P_B = 0 \text{ man}$$

$$\frac{P_A}{\gamma} = \frac{\gamma \cdot h}{\gamma} = h$$

Quedando que:

$$H_S = h - h + H_P$$

$$H_S = H_P$$

Perdidas por fricción:

$$H_P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + \sum K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

f: factor de fricción

L: longitud de la tubería (m)

D: diámetro de la tubería (m)

V: velocidad del fluido (m/s)

g: gravedad (m/s²)

K: coeficiente de pérdida de los accesorios

Coeficiente de pérdidas por accesorios (ver apéndice B)

Contracción

$$K = \frac{0.8 \left(\operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \right) (1 - \beta^2)}{\beta^4}$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$\beta = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \left(\frac{1}{1.5} \right)^2 = 0.44$$

$$K = \frac{0.8 \left(\operatorname{sen} \frac{30}{2} \right) (1 - 0.44^2)}{0.44^4} = 4.43$$

Expansión

$$K = \frac{2.6 \left(\operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \right) (1 - \beta^2)^2}{\beta^4}$$

$$K = \frac{2.6 \left(\operatorname{sen} \frac{30}{2} \right) (1 - 0.44^2)^2}{0.44^4} = 11.67$$

Válvula de bola

$$K = 3f_{\tau}$$

$$f_{\tau} = 0.023$$

$$K = 3 * 0.023 = 0.069$$

Válvula de compuerta

$$K = 8f_{\tau}$$

$$f_{\tau} = 0.023$$

$$K = 8 * 0.023 = 0.184$$

Codo 90°

$$K = 30f_{\tau}$$

$$f_{\tau} = 0.023$$

$$K = 30 * 0.023 = 0.69$$

Placa orificio

$$K = \frac{1}{C_v^2} - 1$$

$$C_v = 0.9$$

$$K = \frac{1}{0.9^2} - 1 = 0.23$$

Totalizando los valores de coeficiente de perdidas (K) tenemos que:

$$\Sigma K = (2 * 4.43) + 11.67 + 0.069 + 0.184 + (4 * 0.69) + 0.23 = 23.77$$

Por otra parte la velocidad del fluido (V) se determina por:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Donde:

Q: caudal (m³/s)

A: área de la sección transversal de la tubería (m²)

el número de Reynold (Re) viene dado por:

$$\text{Re} = \frac{V.D}{\nu}$$

Desarrollando la ecuación para la altura del sistema en función del caudal mediante la sustitución de la ecuación de velocidad, se obtiene:

$$H_s = f * \frac{8LQ^2}{\pi.g.D^5} + \sum K \frac{8Q^2}{\pi.g.D^4}$$

El factor de fricción se haya mediante la ecuación de Swamee-Jain

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right] \right)^2}$$

Donde ε del PVC tiene un valor de 0.0015mm

$$H_s = \frac{0.25}{\left(\log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{\left(\frac{4Q}{\nu\pi D} \right)^{0.9}} \right] \right)^2} * \frac{8LQ^2}{\pi.g.D^5} + \sum K \frac{8Q^2}{\pi.g.D^4}$$

$$H_s = \frac{2 * 0.865 * Q^2}{\left(\log \left[\frac{6E-5}{3.7} + \frac{5.74}{12686736Q^{0.9}} \right] \right)^2 * \pi * 9.81 * 0.025^5} + \frac{23.77 * 8 * Q^2}{\pi * 9.81 * 0.025^4}$$

La ecuación que rige la altura del sistema queda entonces expresada en función del caudal de la siguiente manera:

$$H_s = \frac{5749418.41Q^2}{\left(\log \left[1.62E-5 + \frac{4.52E^{-7}}{Q^{0.9}} \right] \right)^2} + 15795750.09Q^2$$

APENDICE B
TABLAS

A-24. TABLA DEL FACTOR "K" (página 1 de 4)
Coefficientes de resistencia (K) válidos para válvulas y accesorios
 ("K" está basado en el uso de las tuberías cuyos números de cédula se dan en la página 2-10)

FACTORES DE FRICCIÓN PARA TUBERÍAS COMERCIALES, NUEVAS, DE ACERO, CON FLUJO EN LA ZONA DE TOTAL TURBULENCIA

Diámetro mm	15	20	25	32	40	50	65, 80	100	125	150	200,250	300,400	450-600
Nominal pulg	½	¾	1	1¼	1½	2	2½, 3	4	5	6	8, 10	12-16	18-24
Factor de fricción (f _t)	.027	.025	.023	.022	.021	.019	.018	.017	.016	.015	.014	.013	.012

FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR "K" PARA VÁLVULAS Y ACCESORIOS CON SECCIONES DE PASO REDUCIDO

Fórmula 1

$$K_2 = \frac{0.8 \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right) (1 - \beta^2)}{\beta^4} = \frac{K_1}{\beta^4}$$

Fórmula 2

$$K_2 = \frac{0.5 (1 - \beta^2) \sqrt{\text{sen} \frac{\theta}{2}}}{\beta^4} = \frac{K_1}{\beta^4}$$

Fórmula 3

$$K_2 = \frac{2.6 \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right) (1 - \beta^2)^2}{\beta^4} = \frac{K_1}{\beta^4}$$

Fórmula 4

$$K_2 = \frac{(1 - \beta^2)^2}{\beta^4} = \frac{K_1}{\beta^4}$$

Fórmula 5

$$K_2 = \frac{K_1}{\beta^4} + \text{Fórmula 1} + \text{Fórmula 3}$$

$$K_2 = \frac{K_1 + \text{sen} \frac{\theta}{2} [0.8 (1 - \beta^2) + 2.6 (1 - \beta^2)^2]}{\beta^4}$$

Fórmula 6

$$K_2 = \frac{K_1}{\beta^4} + \text{Fórmula 2} + \text{Fórmula 4}$$

$$K_2 = \frac{K_1 + 0.5 \sqrt{\text{sen} \frac{\theta}{2}} (1 - \beta^2) + (1 - \beta^2)^2}{\beta^4}$$

Fórmula 7

$$K_2 = \frac{K_1}{\beta^4} + \beta (\text{Fórmula 2} + \text{Fórmula 4}), \text{ cuando } \theta = 180^\circ$$

$$K_1 = \frac{K_1 + \beta [0.5 (1 - \beta^2) + (1 - \beta^2)^2]}{\beta^4}$$

$$\beta = \frac{d_1}{d_2}$$

$$\beta^2 = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \frac{a_1}{a_2}$$

El subíndice 1 define dimensiones y coeficientes para el diámetro menor.
 El subíndice 2 se refiere al diámetro mayor.

*Úse el valor de K proporcionado por el proveedor, cuando se disponga de dicho valor

ESTRECHAMIENTO BRUSCO Y GRADUAL



Si: $\theta < 45^\circ$ $K_2 = \text{Fórmula 1}$
 $45^\circ < \theta \approx 180^\circ$ $K_2 = \text{Fórmula 2}$

ENSANCHAMIENTO BRUSCO Y GRADUAL

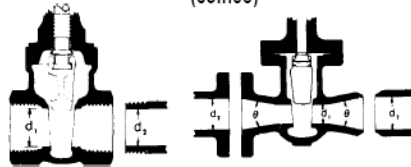


Si: $\theta < 45^\circ$ $K_2 = \text{Fórmula 3}$
 $45^\circ < \theta < 180^\circ$ $K_2 = \text{Fórmula 4}$

A-24 TABLA DEL FACTOR "K" (página 2 de 4)
 Coeficientes de resistencia (K) válidos para válvulas y accesorios

VÁLVULAS DE COMPUERTA

De cuña, de doble obturador o tipo macho (cónico)



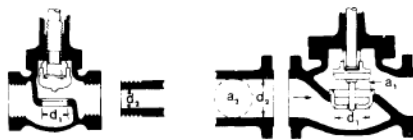
Si: $\beta = 1, \theta = 0 \dots \dots \dots K_1 = 8 f_T$
 $\beta < 1$ y $\theta < 45^\circ \dots \dots \dots K_2 = \text{Fórmula 5}$
 $\beta < 1$ y $45^\circ < \theta < 180^\circ \dots \dots K_3 = \text{Fórmula 6}$

VÁLVULAS DE RETENCIÓN DE DISCO OSCILANTE

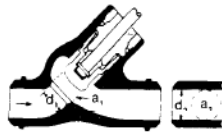


$K = 100 f_T$ $K = 50 f_T$
 Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador
 (m/seg) = $45 \sqrt{V}$ = $75 \sqrt{V}$
 (pie/seg) = $35 \sqrt{V}$ = $60 \sqrt{V}$
 U/L Registradas = $120 \sqrt{V}$ = $100 \sqrt{V}$

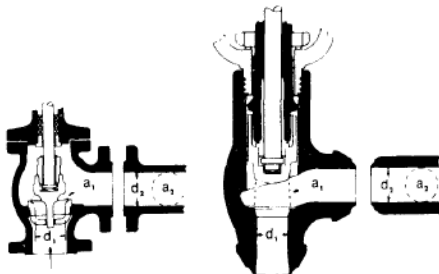
VÁLVULAS DE GLOBO Y ANGULARES



Si: $\beta = 1 \quad K_1 = 340 f_T$



Si: $\beta = 1 \dots \dots K_1 = 55 f_T$

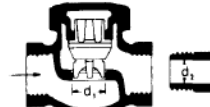


Si: $\beta = 1 \dots \dots K_1 = 150 f_T$ Si: $\beta = 1 \dots \dots K_1 = 55 f_T$

Todas las válvulas de globo y angulares con asiento reducido ϕ de mariposa

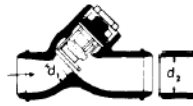
Si: $\beta < 1 \dots \dots K_2 = \text{Fórmula 7}$

VÁLVULAS DE RETENCIÓN DE OBTURADOR ASCENDENTE



Si: $\beta = 1 \dots \dots K_1 = 600 f_T$
 $\beta < 1 \dots \dots K_1 = \text{Fórmula 7}$

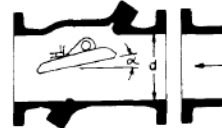
Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador = $50 \beta^2 \sqrt{V}$ m/seg $40 \beta^2 \sqrt{V}$ pie/seg



Si: $\beta = 1 \dots \dots K_1 = 55 f_T$
 $\beta < 1 \dots \dots K_1 = \text{Fórmula 7}$

Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador = $170 \beta^2 \sqrt{V}$ m/seg $140 \beta^2 \sqrt{V}$ pie/seg

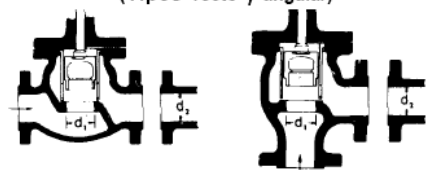
VÁLVULAS DE RETENCIÓN DE DISCO BASCULANTE



Pasos	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 15^\circ$
50 mm (2") a 200 mm (8")	$K = 40 f_T$	$120 f_T$
250 mm (10") a 350 mm (14")	$30 f_T$	$90 f_T$
400 mm (16") a 1200 mm (48")	$20 f_T$	$60 f_T$
Velocidad mínima en la tubería para abrir totalmente el obturador = m/seg	$100 \sqrt{V}$	$40 \sqrt{V}$
pie/seg	$80 \sqrt{V}$	$30 \sqrt{V}$

A-24. TABLA DEL FACTOR "K" (página 3 de 4)
Coefficientes de resistencia (K) válidos para válvulas y accesorios

VÁLVULAS DE RETENCIÓN Y CIERRE
(Tipos recto y angular)

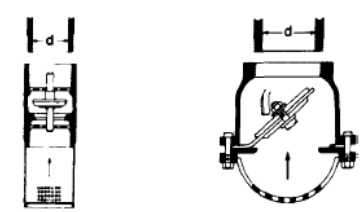


Si: $\beta = 1 \dots K_1 = 400 f_T$ Si: $\beta = 1 \dots K_1 = 200 f_T$
 $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}$ $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}$

Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador
 m/seg = $70 \beta^2 \sqrt{V}$ pie/seg = $55 \beta^2 \sqrt{V}$

Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador
 = $95 \beta^2 \sqrt{V}$ = $75 \beta^2 \sqrt{V}$

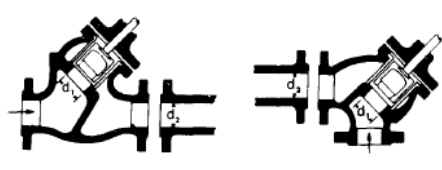
VÁLVULAS DE PIE CON FILTRO
Obturador ascendente Obturador oscilante



$K = 420 f_T$ $K = 75 f_T$

Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador
 m/seg = $20 \sqrt{V}$ pie/seg = $15 \sqrt{V}$

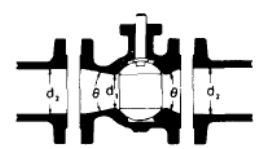
Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador
 = $45 \sqrt{V}$ = $35 \sqrt{V}$




Si: $\beta = 1 \dots K_1 = 300 f_T$ Si: $\beta = 1 \dots K_1 = 350 f_T$
 $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}$ $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}$

velocidad mínima en la tubería para abrir totalmente el obturador
 m/seg = $75 \beta^2 \sqrt{V}$ pie/seg = $60 \beta^2 \sqrt{V}$

VÁLVULAS DE GLOBO



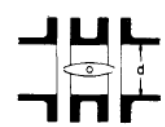
Si: $\beta = 1, \theta = 0 \dots K_1 = 3 f_T$
 $\beta < 1$ y $\theta < 45^\circ \dots K_2 = \text{Fórmula 5}$
 $\beta < 1$ y $45^\circ < \theta < 180^\circ \dots K_3 = \text{Fórmula 6}$



$\beta = 1 \dots K_1 = 55 f_T$ $\beta = 1 \dots K_1 = 55 f_T$
 $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}$ $\beta < 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}$

Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador
 mg/seg = $170 \beta^2 \sqrt{V}$ (pie/seg) = $140 \beta^2 \sqrt{V}$

VÁLVULAS DE MARIPOSA



Diámetro 50 mm (2") a 200 mm (8") ... $K = 45 f_T$
 Diámetro 250 mm (10") a 350 mm (14") ... $K = 35 f_T$
 Diámetro 400 mm (16") a 600 mm (24") ... $K = 25 f_T$

A-24. TABLA DEL FACTOR "K" (página 4 de 4)
Coefficientes de resistencia (K) válidos para válvulas y accesorios

VÁLVULAS DE MACHO Y LLAVES

Paso directo tres entradas

Si: $\beta = 1$, $K_1 = 18 f_T$ Si: $\beta = 1$, $K_1 = 30 f_T$ Si: $\beta = 1$, $K_1 = 90 f_T$

Si: $\beta < 1$ $K_2 = \text{Fórmula 6}$

CODOS ESTÁNDAR

90° 45°

$K = 30 f_T$ $K = 16 f_T$

CURVAS EN ESCUADRA O FALSA ESCUADRA

α	K
0°	2 f_T
15°	4 f_T
30°	8 f_T
45°	15 f_T
60°	25 f_T
75°	40 f_T
90°	60 f_T

CONEXIONES ESTÁNDAR EN "T"

Flujo directo $K = 20 f_T$
 Flujo desviado a 90° . . . $K = 60 f_T$

CURVAS Y CODOS DE 90° CON BRIDAS O CON EXTREMOS PARA SOLDAR A TOPE

r/d	K	r/d	K
1	20 f_T	8	24 f_T
1.5	14 f_T	10	30 f_T
2	12 f_T	12	34 f_T
3	12 f_T	14	38 f_T
4	14 f_T	16	42 f_T
6	17 f_T	20	50 f_T

El coeficiente de resistencia K_B , para curvas que no sean de 90° puede determinarse con la fórmula:

$$K_B = (n - 1) \left(0.25 \pi f_T \frac{r}{d} + 0.5 K \right) + K$$

n = número de curvas de 90°
 K = coeficiente de resistencia para una curva de 90° (según tabla)

ENTRADAS DE TUBERÍA

Con resalte hacia el interior A tope

r/d	K
0.00*	0.5
0.02	0.28
0.04	0.24
0.06	0.15
0.10	0.09
0.15 y más	0.04

*de cantos vivos Véanse los valores de K en la tabla

$K = 0.78$

CURVAS DE 180° DE RADIO CORTO

$K = 50 f_T$

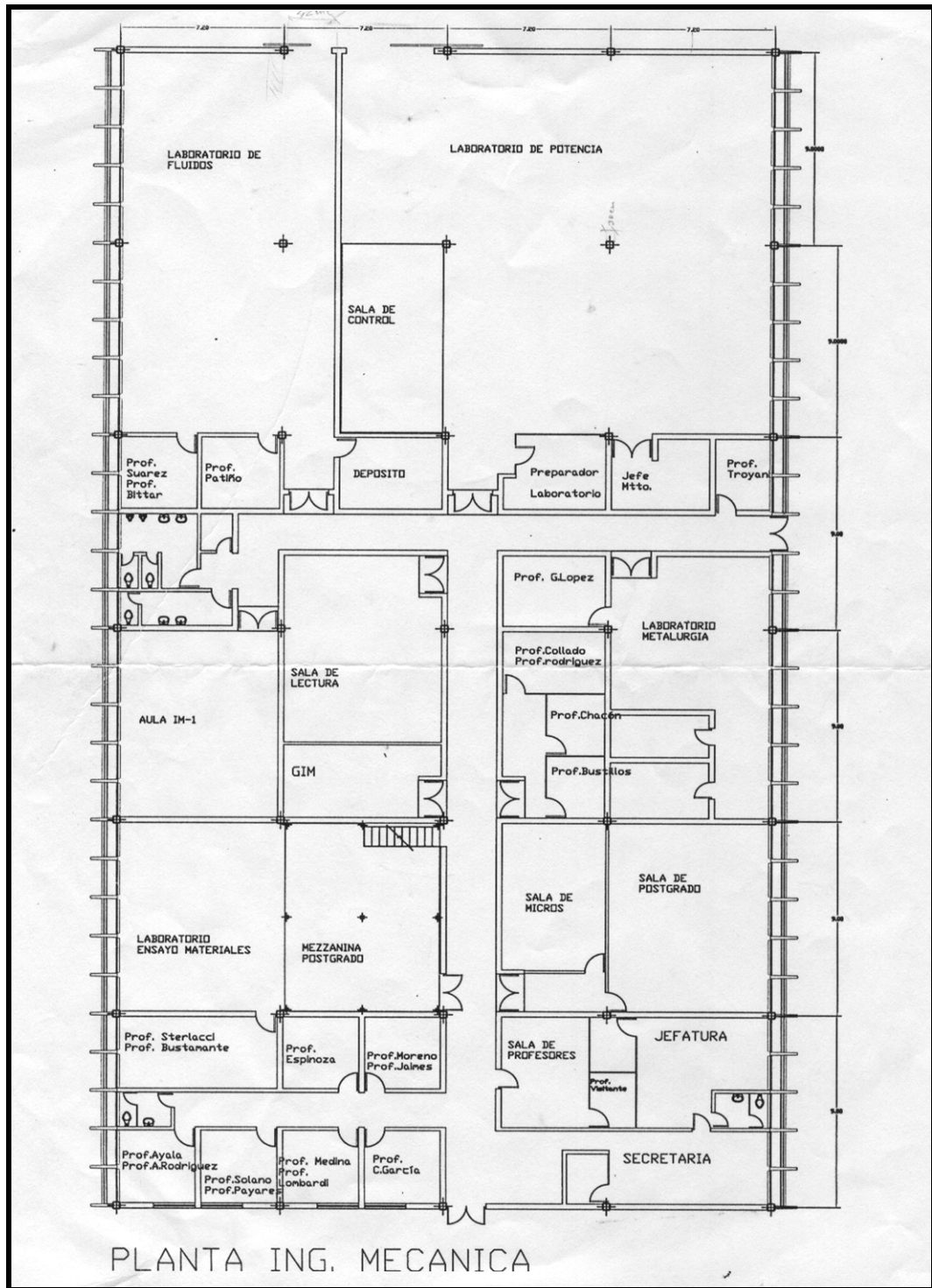
SALIDAS DE TUBERÍA

Con resalte De cantos vivos Redondeada

$K = 1.0$ $K = 1.0$ $K = 1.0$

APENDICE C
PLANOS

**Laboratorio de Termodinámica del departamento de Mecánica de la
Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui**



METADATOS

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO**

TÍTULO	AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS ARMFIELD FM20 DE BOMBA CENTRÍFUGA
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
TOBÍA RODRÍGUEZ, GABRIELA C.	CVLAC:15.742.777 E MAIL: gabycytobia@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Automatización

Banco de pruebas

Bomba Centrífuga

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y

ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
<u>INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS</u>	SISTEMAS DINÀMICOS

RESUMEN (ABSTRACT):

En el siguiente proyecto se desarrolla la automatización del sistema de adquisición de datos del banco de pruebas Armfield FM20 de bomba centrífuga, con el fin de evaluar y conocer, mediante la obtención de gráficas, el funcionamiento y características del equipo. Las gráficas son generadas en un computador mediante la aplicación del software LabView 8.20, quien registra los datos provenientes del sistema para mostrar las curvas de funcionamiento y parámetros medidos en el banco de pruebas. Este trabajo contempla la evaluación de las condiciones del banco, se implementa y adapta un sistema de adquisición de datos, se crea un entorno gráfico para el monitoreo de las variables, se obtienen y analizan las curvas características de la bomba, además de describir procedimientos para evaluar el comportamiento de la bomba centrífuga y el correcto manejo del equipo. Asimismo, se incluye documentación referente al banco de pruebas y a los elementos seleccionados para la automatización, diagramas, manuales y cálculos necesarios para cumplir con los objetivos del proyecto.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
GONZÁLEZ, YORDY	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
RENGEL, JOSE	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
AYALA, ORLANDO	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2008	11	06
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESISautomatizacion.doc. doc	application/ ms word

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L
M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x
y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: **AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS ARMFIELD FM20
DE BOMBA CENTRÍFUGA**

TEMPORAL: 1 año

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

INGENIERO MECÁNICO _____

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

PREGRADO _____

ÁREA DE ESTUDIO:

SISTEMAS DINÁMICOS _____

INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE. NUCLEO DE ANZOATEGUI _____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**DERECHOS**

DE ACUERDO CON EL ARTICULO 44 DEL REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE: “LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD Y SOLO PODRÁN SER UTILIZADOS POR OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”.

Gabriela Tobía

AUTOR

Yordy González

TUTOR

José Rengel

JURADO

Orlando Ayala

JURADO

POR LA SUBCOMISION DE TESIS