

# **CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA COMO RECURSO DIDÁCTICO**

## *CHARACTERISTIC CURVES OF A CENTRIFUGAL PUMP AS A DIDACTIC RESOURCE*

**Marco Antonio Peñaloza López**

Instituto Politécnico Nacional, México  
*mpenalozal1500@alumno.ipn.mx*

**René Tolentino Eslava**

Instituto Politécnico Nacional, México  
*rtolentino@ipn.mx*

**Recepción:** 31/octubre/2021

**Aceptación:** 24/febrero/2022

### **Resumen**

Se obtuvieron las curvas características de flujo-carga, flujo – potencia y flujo – eficiencia de una bomba centrífuga de uso residencial de 558 W (0.75 HP) de potencia. Para la medición de velocidad angular, temperatura, flujo y corriente se emplearon sensores y sus señales se adquirieron mediante una tarjeta Arduino Uno; la carga se obtuvo con un manómetro Bourdon ubicado en la descarga y la tensión eléctrica se midió con un voltmetro. Los datos experimentales obtenidos, así como los videos serán empleados en las clases pertinentes del Departamento de Control y Automatización de la ESIME Zacatenco, con la finalidad de cubrir el aspecto práctico de las unidades de aprendizaje ante las condiciones de salud y clases a distancia que se tienen en el País.

**Palabras Clave:** Bomba centrífuga, condiciones de operación, curvas características, eficiencia.

### **Abstract**

*The characteristic curves of flow - head, flow - power and flow - efficiency of a residential centrifugal pump of 558 W (0.75 HP) power were obtained. For the measurement of angular velocity, temperature, flow and current, sensors were used, and their signals were acquired using an Arduino Uno card. The head was obtained*

*with a Bourdon manometer located in the discharge, and the voltage was measured with a voltmeter. The experimental data obtained, as well as the videos will be used in the relevant classes of the Department of Control and Automation of the ESIME Zacatenco, to cover the practical aspect of the learning units in the face of health conditions and distance classes that are held in the country due to Covid.*

**Keywords:** *Centrifugal pump, characteristic curves, efficiency, operating conditions.*

## **1.Introducción**

Los procesos para transformar la materia prima en productos representan aproximadamente el 85% del uso total de la energía eléctrica en el sector industrial. De esto el 14% de energía es usada por ventiladores y sopladores, 12% en compresores y 24% por bombas; lo que equivale al 50% del total de la energía utilizada (Capehart, 2003). Estas turbomáquinas se emplean con el fin de generar flujo o presión dependiendo de los requerimientos del proceso para cumplir con la demanda. En la industria, los ventiladores, bombas, compresores y sopladores trabajan al 100% de su capacidad y la variación del flujo se realiza mediante compuertas de estrangulamiento, válvulas, entre otros; provocando un consumo alto de energía, debido a que algunas aplicaciones no requieren que trabajen a plena capacidad.

Para la selección de estas máquinas, se determinan las pérdidas de presión en las tuberías o ductos que conducen al fluido, adicionando la carga estática de la instalación para generar la curva del sistema. Con esta curva además de la curva de flujo-presión de un ventilador o compresor o la curva flujo-carga de una bomba, se tiene el punto de operación del sistema. Adicionalmente, se requiere conocer la potencia que requerirá la turbomáquina para generar las condiciones de flujo y presión requeridas; así como la eficiencia de ésta. Conocer las curvas características de ventiladores, compresores y bombas; lleva a una selección adecuada para tener sistemas más eficientes al momento de transportar o mover algún fluido.

Se han realizado diversos trabajos respecto a la operación y funcionamiento de bombas, incluyendo desarrollo de instalaciones experimentales, estudios con

software y evaluaciones en laboratorios. [Amores, 2018], implementaron un banco de pruebas de bombas centrífugas para prácticas de laboratorio, el cual tiene un sistema de control y adquisición de datos para obtener las curvas de desempeño de cada bomba comparándolas contra el fabricante; además de las curvas de flujo-carga de los arreglos de las bombas en serie y paralelo. [Vanderslice, 2012], implementaron prácticas de laboratorio en donde se obtuvieron las curvas características de una bomba centrífuga y la aplicación de los resultados obtenidos, considerando un escenario en la industria en el que se obtiene el costo de la energía para un flujo determinado en un sistema de bombeo. Además, en la instalación empleada verificaron también las leyes de afinidad, determinaron el punto de mejor eficiencia de la bomba y estimaron el costo anual de operación. [Kuritza, 2017], realizaron un estudio sobre las características adimensionales de las condiciones de operación de bombas centrífugas, llevaron a cabo el estudio del Sistema de Abastecimiento de Agua del Campus Vale de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, para demostrar la aplicación de esas ecuaciones y curvas desarrolladas. Las ecuaciones adimensionales fueron útiles para determinar que descarga debía adoptarse para que el sistema fuera más eficiente hidráulica y energéticamente y también para determinar cuánta energía se consumiría en caso de alteración del punto de operación de la bomba por una válvula de estrangulamiento. [Hernández, 2008], realizaron una propuesta para reducir el consumo de energía eléctrica en el proceso experimental sobre especies nativas que realiza el laboratorio de acuicultura de la DACBIOL y contribuir a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Para lo cual, efectuaron un diagnóstico de la eficiencia energética en las bombas del laboratorio usando datos de consumo de electricidad, de la cual se tuvo la propuesta de colocar un tanque hidroneumático acoplado a 2 bombas centrífugas de 2 HP y un tablero de control para reducir el uso de bombas, los costos, mejorar el proceso y en consecuencia reducir el impacto en el ambiente. [Simpson, 2013], realizaron un estudio de la estimación de eficiencia en bombas centrífugas a velocidad variable basados en simulaciones hidráulicas y en las leyes de afinidad. Encontraron que las leyes de afinidad que calculan la potencia y la eficiencia pueden producir un resultado no adecuado para bombas de potencias

bajas. [Sahoo, 2009], determinaron el costo del ciclo de vida de bombas centrífugas en 20 años considerando los costos iniciales, de mantenimiento y energía. La energía fue el mayor costo de 25% al 60% dependiendo de la industria. Su estudio también mostró que el variador de frecuencia permite la operación de la bomba a velocidades bajas contribuyendo a la confiabilidad del sistema, reduciendo el tiempo medio entre fallas (MTBF) y proporcionando un ahorro de energía.

Debido a lo anterior, se tiene la relevancia del uso de las bombas centrífugas en los procesos industriales; así como la importancia en la energía consumida y eficiencia las cuales repercuten en los costos de operación. Por lo que en este trabajo se obtuvieron las curvas características de una bomba centrífuga empleando sensores y equipo de bajo costo, integrando un sistema de adquisición de datos para emplearse en la formación de los estudiantes de Ingeniería en Control y Automatización de la ESIME, Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

## **2. Métodos**

La instalación experimental desarrollada consiste en dos recipientes atmosféricos con capacidad de 19 L y una bomba centrífuga de uso residencial con potencia nominal de 558 W ( $\frac{3}{4}$  hp), la cual ha estado en servicio por más de 5 años, lapso en el que una falla provocada por un conductor abierto propició su desinstalación y reemplazo. La bomba se reparó para fines de este trabajo, por lo que el mantenimiento correctivo y los años de operación puede tener impacto en su desempeño. Uno de los recipientes se llena de agua manualmente y se activa la bomba para enviar el fluido al otro tanque. Se tiene una válvula de globo manual antes de la salida al recipiente de descarga, para variar el flujo y en consecuencia la presión en la instalación, posibilitando la modificación de las condiciones de operación de la bomba. Para la instalación se usó tubería de PVC de 19 mm ( $\frac{3}{4}$  pulgada) de diámetro y tuercas unión para facilitar la instalación y desinstalación de la bombacentrífuga.

Un fenómeno frecuente presente en el uso continuo de máquinas tanto eléctricas como hidráulicas, es el deterioro de sus piezas móviles debido al constante rozamiento entre superficies, pequeñas partículas de material son desprendidas

generando desgaste. Usualmente se recurre al uso de rodamientos y lubricantes para prevenir un prematuro desgaste de mecanismos y una inminente avería; sin embargo, tanto lubricantes como rodamientos deben ser reemplazados tras cierto tiempo de uso el cual casi siempre es proporcionado por el fabricante; por otro lado, también se pueden identificar algunos indicadores de un necesario mantenimiento como son: ruido excesivo, potencia reducida, aumento en el consumo de combustible o energía eléctrica, sobrecalentamiento, entre otros.

### **Instrumentación**

Para obtener las curvas características de la bomba se requiere de instrumentos de medición tanto para los parámetros eléctricos como los mecánicos. Para este fin, se instaló un manómetro tipo Bourdon con conexión roscada de 6 mm ( $\frac{1}{4}$  pulgada) NPT, alcance de 0 a 11 kg/cm<sup>2</sup> (0 psi a 160 psi) y resolución de 0.2 kg/cm<sup>2</sup> (4 psi) antes de la válvula manual. El manómetro se unió a la tubería principal mediante una "T" de 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$  pulgada) de diámetro. Se purgó el sistema para que no se tuviera aire el manómetro y afectará las mediciones.

Experimentalmente las condiciones de presión y temperatura bajo las cuales se encuentra un líquido llegan a modificar otras propiedades físicas de él como su densidad o punto de ebullición; siendo de más impacto los efectos que conlleva la variación de la temperatura. Por lo que los efectos de la presión atmosférica en este proyecto se despreciaron, de tal forma que la instalación de un manómetro en lugar de un medidor de presión absoluta es suficiente para proporcionar los datos necesarios para obtener las curvas características de la bomba.

Considerando ahora las variables eléctricas para la evaluación de la bomba centrífuga, la medición de la diferencia de potencial se realizó empleando un voltímetro conectado directamente en los bornes de alimentación de la bomba. La presión y tensión eléctrica se midieron con instrumentos analógicos, por lo que los datos se registraron de forma manual en una tabla diseñada para tal fin.

Por otro lado, la utilización de instrumentación electrónica permitió obtener datos de los sensores y presentarlos en una Interfaz Humano-Máquina (HMI) de forma dinámica y visualmente amigable para el operador. Por lo que el resto de las

variables se miden de esta manera utilizando sensores específicos, una tarjeta de adquisición de datos y una computadora portátil. A continuación, se describe la instrumentación electrónica utilizada y el parámetro con el que está relacionada.

### Tarjeta de adquisición de datos

La placa de desarrollo Arduino UNO con microprocesador ATMEGA 328P-PU, tiene entradas y salidas, tanto digitales como analógicas, alimentación regulada a 5 V de CD y comunicación a la computadora por puerto serial USB, lo que la hace adecuada para propósitos de este trabajo. La función de la tarjeta de adquisición de datos es gestionar el tráfico de datos entre los sensores y actuadores con una computadora o una HMI. Su importancia radica en que a través de un solo puerto de comunicación se obtiene la información digitalizada correspondiente al estado en tiempo real de todos los elementos de campo.

### Temperatura

Se empleó el sensor de temperatura LM35 que se alimenta a 5 V de CD con la tensión que proporciona la placa Arduino. Tiene una sensibilidad de 10 mV/°C por lo que bastaría con conectarlo directamente a una de las entradas analógicas del microcontrolador, pero las pruebas realizadas mostraron ruido en exceso en la señal recibida, por lo que fue necesaria la adición de un capacitor para estabilizar el valor de tensión sin afectar la medición. El diagrama de conexión del sensor se muestra en la figura 1.

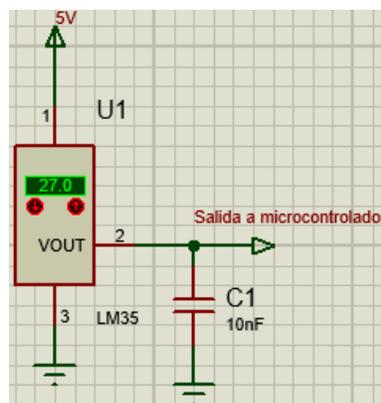


Figura 1 Conexión del LM35.

Al analizar el diagrama de la figura 1, se tiene que la interconexión de la resistencia intrínseca del sensor LM35 y de los cables conductores con el capacitor forman una configuración conocida como filtro pasa bajas pasivo, el cual aprovecha la tendencia del capacitor a oponerse a los cambios abruptos de tensión para suprimir el ruido presentado en la señal (frecuencia alta) y dejar pasar la señal proporcional a la temperatura (frecuencia baja).

### **Intensidad de corriente**

Se implementó un sensor de corriente SCT 013, con alcance de 0 a 100 A de CA y salida de 0 a 50 mA CA. Este sensor es un transformador de corriente que mantiene una relación proporcional entre el valor de entrada y el de salida, en este caso la constante de proporcionalidad es de 2000, esto significa que el valor de corriente que entrega el sensor como señal de medición es 2000 veces menor que el valor de corriente medido.

Se requiere el acondicionamiento de la señal de este sensor, por lo que se usó una resistencia eléctrica. Considerando que el valor de tensión que recibe la placa Arduino es de 0 a 5 V de CD, un valor de resistencia adecuado es de 20  $\Omega$  para generar una señal en tensión eléctrica de 0 a 1 V; debido a que este valor no es comercial, se usó el valor superior comercial próximo de 22  $\Omega$ .

Aunque se está trabajando con corriente alterna, las resistencias no son elementos reactivos por lo que la intensidad de corriente que circula por ellos y la diferencia de potencial en sus terminales están en fase, de tal forma que el cálculo de potencia en CA para una resistencia es el mismo que si fuera para CD teniendo la precaución de utilizar el valor cuadrático medio de intensidad de corriente. Por lo que la potencia se calcula como sigue en la ecuación 1, [Serway, 2008].

$$P = I^2R \quad (1)$$

Sustituyendo en la ecuación 1, el valor de 50 mA que como máximo entrega el SCT 013, se obtuvo una potencia de 0.055 W. Por lo tanto, una resistencia de 0.25 W es adecuado para la aplicación. Se midió el valor real de resistencia, siendo este de 21.4  $\Omega$ . Se requiere además eliminar el valor de tensión negativo antes de enviar la señal a la tarjeta Arduino, por lo que se utilizó un amplificador operacional que no

solo suprime la media onda negativa al ser polarizado con la alimentación del Arduino, sino que puede configurarse para amplificar el valor de tensión, lo cual resulta útil ya que el alcance del sensor SCT013 es demasiado grande (100 A) y en el caso de esta aplicación producirá señales del orden de mV. El OPAM seleccionado es el LM358 y a éste se conectan resistencias de 10 kΩ y 22 kΩ para conseguir la amplificación. Estas conexiones se presentan en la figura 2.

La configuración de la figura 2 permite obtener una amplificación de la tensión de entrada sin modificar su signo, por lo que es un amplificador no inversor. El valor de ganancia puede estimarse teóricamente usando la ecuación 2, [Reyes, 2013].

$$A = 1 + \frac{RR1 + RR2}{R1} \quad (2)$$

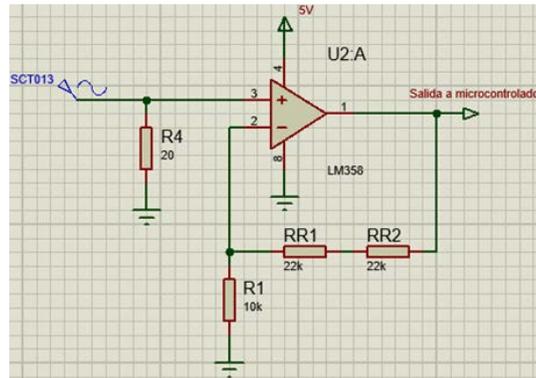


Figura 2 Conexión del SCT013 y acondicionamiento de su señal.

Sustituyendo los valores de las resistencias se obtuvo una ganancia de 5.4. Sin embargo, de forma experimental el valor de ganancia promedio obtenido es de 5.5017. En la tabla 1 se muestran los valores de tensión de entrada y salida del amplificador operacional, así como el valor de ganancia en cada caso.

Tabla 1 Mediciones de ganancia.

Tensión de entrada	Tensión de salida	Ganancia
5 m	26.5 mV	5.3
9 mV	47 mV	5.22
178 mV	1000 mV	5.6
259 mV	1422 mV	5.49
0.53 V	3.04 V	5.7
0.50 V	2.87 V	5.7

## Nivel

La instalación de un sensor ultrasónico en la parte superior del recipiente ubicado en la succión permite conocer la altura de la columna de agua almacenada. El principio de funcionamiento es sencillo pues se reduce a la temporización del viaje de una onda sonora desde un emisor hasta alguna superficie que la haga rebotar y regresar hasta un elemento receptor. Conociendo la velocidad del sonido en el medio en el que viaja la onda puede obtenerse la distancia de una forma exacta. En este caso se usó el sensor ultrasónico HC – SR04. Para la medición del nivel se requiere inicialmente instalar el sensor a una distancia conocida desde el fondo del recipiente vacío, en este caso se considera una distancia de 35 cm, que se midió utilizando el sensor ultrasónico conectado a la placa de desarrollo Arduino y ésta a la computadora. En la figura 3 se muestra el código para la medición del nivel con el sensor ultrasónico escrito en la IDE de Arduino.



```
Medicion_de_distancia $
int TRIG = 10;
int ECHO = 9;
int DURACION;
int DISTANCIA;
void setup() {
  pinMode(TRIG, OUTPUT);
  pinMode(ECHO, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  digitalWrite(TRIG, HIGH);
  delay(1);
  digitalWrite(TRIG, LOW);
  DURACION = pulseIn(ECHO, HIGH);
  DISTANCIA = DURACION / 58.2;
  Serial.println(DISTANCIA);
  delay(200);
}
}
Compilado
```

Figura 3 Programación para HC – SR04.

Conociendo la distancia a la que se encuentra el sensor respecto al fondo del recipiente, el cálculo del nivel de la columna de agua almacenada se reduce a la diferencia entre los 35 cm y la lectura del sensor ultrasónico, tal y como se muestra en la ecuación 3.

$$\text{Nivel} = 35 \text{ cm} - \text{lectura del sensor} \quad (3)$$

En el caso del recipiente en la descarga, el nivel debe estimarse según el nivel medido en el recipiente de succión, para esto el nivel inicial de ambos recipientes

debe ser conocido. Utilizando un marcador permanente y un flexómetro, se establece el nivel inicial de 25 cm en el recipiente de succión, mientras que el recipiente de descarga se trabaja con un nivel inicial de 0 cm (vacío). El principio de conservación de masa, la igualdad de dimensiones de ambos recipientes y la ausencia de fugas, permiten definir el nivel del tanque de descarga como el cambio en el nivel del tanque de succión como se muestra en la ecuación 4.

$$Nivel_{descarga} = 25 \text{ cm} - Nivel_{succión} \quad (4)$$

### Flujo volumétrico

El flujo volumétrico es el volumen de fluido que circula en una sección dada por unidad de tiempo [Mott, 2006], por lo que el volumen descargado en el tanque se usa para calcular el flujo volumétrico como se muestra en la ecuación 5.

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (5)$$

El volumen de una columna de agua puede calcularse con la ecuación 6. Donde  $V$  es volumen,  $h$  es altura y  $A$  es área de la base. Al reescribir la ecuación para el flujo volumétrico sustituyendo ecuación 6 en ecuación 5 se obtiene la ecuación 7.

$$V = hA \quad (6)$$

$$Q_v = \frac{hA}{t} \quad (7)$$

Por último, con fines de posibilitar el cálculo del flujo volumétrico en cualquier intervalo de tiempo, se modifica la ecuación 7 para presentar un cambio en el tiempo y su respectivo cambio en de altura, quedando así la ecuación 8.

$$Q_v = A \frac{\Delta h}{\Delta t} = A \frac{(h_1 - h_0)}{(t_1 - t_0)} \quad (8)$$

En este trabajo se utiliza la ecuación 8 para determinar el flujo a través de las mediciones de nivel, ya que es fácil de programar e implementar con el sensor ultrasónico. Sin embargo, un dato que hace falta es el valor del área de los recipientes, para obtenerlo se utiliza nuevamente el sensor ultrasónico y un patrón de medición de volumen. En la tabla 2 se presenta la medición del sensor

ultrasonico en función de la adición de 5 litros de agua en el recipiente. Al promediar los cambios de altura se obtiene un valor de 1.62 cm. Dado que son recipientes cilíndricos, se puede calcular el área de su base interior utilizando un despeje de la ecuación 7, obteniéndose de forma indirecta un área de 617.37 cm<sup>2</sup>.

Tabla 2 Mediciones de nivel y volumen.

Distancia (cm)	Volumen añadido (L)	Cambio en distancia (cm)
25.76	0	-
23.83	1	1.92
22.08	2	1.75
20.46	3	1.62
19.27	4	1.18
17.66	5	1.61

### Velocidad angular (RPM)

Para medir esta variable se requiere conocer las revoluciones de un eje en un determinado intervalo de tiempo. Esta acción es llevada a cabo mediante el sensor óptico CNY70, el cual cuenta con un diodo led infrarrojo y un fototransistor. Dependiendo del color de la superficie que tenga enfrente el sensor óptico, la luz infrarroja será mayor o menormente reflejada y enviada de vuelta al fototransistor para activarlo. La conexión del fototransistor con una resistencia en serie produce un divisor de tensión desde el cual se toma la señal analógica para enviar al microcontrolador. La figura 4 muestra las conexiones utilizadas de este sensor.

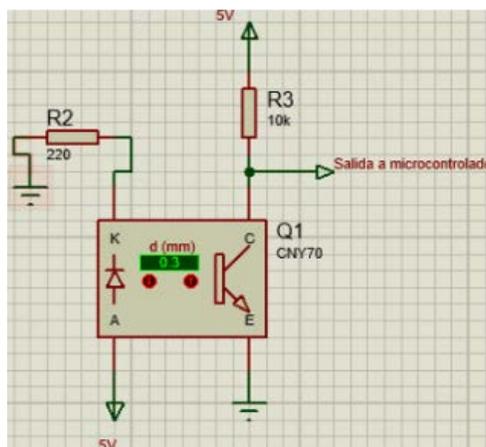


Figura 4 Conexión del sensor óptico CNY70.

El eje del motor debe presentar dos colores distinguibles en el lugar donde se coloca el sensor óptico, de esta manera el microcontrolador identifica cuando el eje del motor ha dado una revolución ya que cada giro viene acompañado de dos cambios en la señal analógica recibida. La figura 5 muestra una sección de la flecha del motor cubierta con colores blanco y negro; así como la ubicación del sensor óptico.

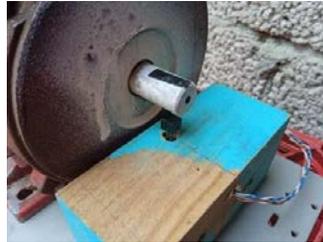


Figura 5 Eje del motor y sensor óptico.

### **Estado de la bomba**

Para conseguir el aislamiento eléctrico del circuito electrónico de control y la línea de potencia a la que se conecta la bomba, se empleó un relevador con capacidad de 20 a 120 V de CA y cuya bobina es accionada con 24 V de CD. El uso del relevador implica también la participación de un controlador que reciba la señal de la placa Arduino y suministre o desconecte los 24 V a la bobina del relevador, el componente seleccionado para este fin es el ULN2803A, debido a que posee diodos de protección para trabajar con cargas inductivas, las cuales tienden a producir grandes diferencias de potencial cuando son desconectadas abruptamente y de no ser aligeradas por el diodo terminarían generando pequeños arcos eléctricos o averías en los dispositivos de control. Las conexiones para el control de la bomba con el Arduino se muestran en la figura 6.

### **Interfaz Humano–Máquina (HMI)**

La instrumentación electrónica facilita el control y monitoreo de un sistema desde una HMI. La interfaz utilizada en este trabajo se diseñó utilizando el software LabVIEW® de National Instruments, el cual permite utilizar la placa Arduino como una tarjeta de adquisición y envío de datos, siendo un medio de comunicación entre

la computadora, sensores y actuadores. Las figuras 7 y 8 muestran respectivamente el diseño de la interfaz y la programación que requiere para su funcionamiento.

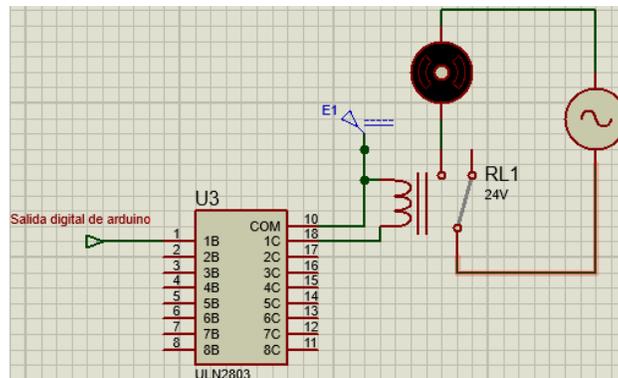


Figura 6 Conexiones para control de estado de la bomba.

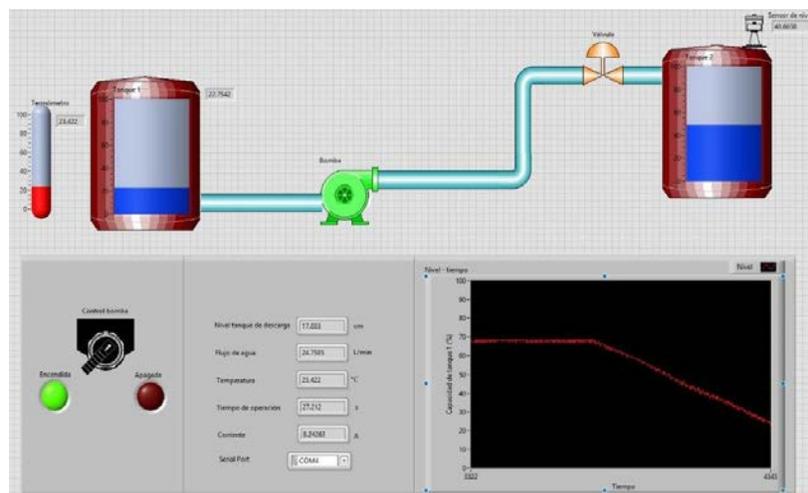


Figura 7 Interfaz hombre – máquina diseñada con LabVIEW.

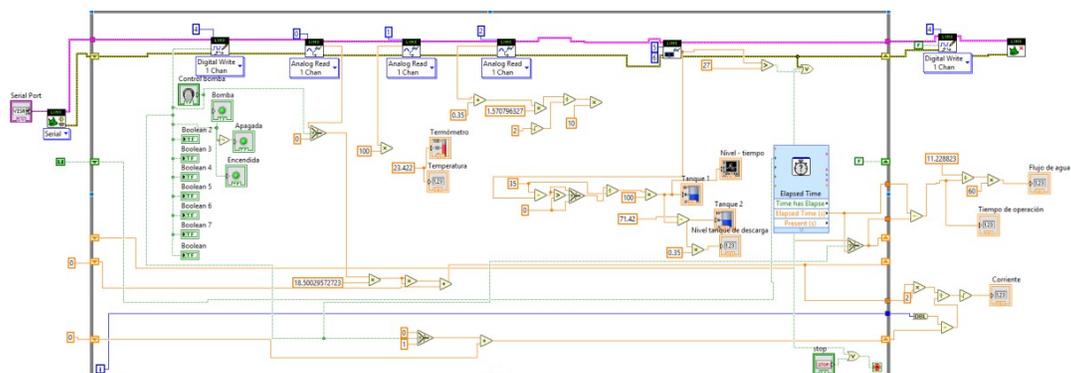


Figura 8 Programación en LabVIEW.

La interfaz cuenta con un panel de control y monitoreo, donde se incluye un interruptor para el arranque y paro de la bomba, indicadores numéricos de las variables medidas por los sensores y un graficador del nivel del tanque de succión en el tiempo. En la parte superior se tiene un diagrama esquemático de la instalación con indicadores gráficos dinámicos para las variables de temperatura, nivel y flujo; así como el estado de la bomba.

En la programación se tiene una sección encargada de detener automáticamente la bomba cuando el nivel del tanque de succión llega a los 8 cm. Esta acción permite proteger la bomba y mantener el volumen constante del agua desplazada. El cálculo del volumen desplazado constantemente por la bomba se determina con la ecuación 6. Siendo que el valor de  $h$  es igual a la diferencia del nivel final y el nivel inicial de cualquiera de los dos tanques obteniéndose un volumen desplazado de 10.49 L. Los indicadores numéricos correspondientes a las variables de flujo volumétrico y corriente eléctrica no muestran un valor instantáneo, sino que deben esperar a que la bomba se detenga para mostrar un valor promedio durante la prueba realizada. Por otro lado, el indicador numérico de tiempo de operación solo muestra el tiempo que la bomba centrífuga ha estado funcionando, por lo que también se debe esperar a que ésta se detenga para actualizar su valor. Finalmente, es necesario realizar la medición de la velocidad angular de forma independiente debido a que el tiempo en el que se contabilizan las revoluciones retrasa la operación de la interfaz y genera errores de medición en el resto de las variables. En la figura 9 se observa la instalación de la bomba con sus dos recipientes.



Figura 9 Instalación experimental.

## Pruebas y mediciones

Para la obtención de las curvas características de la bomba se necesita analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación, para lo cual se realizan mediciones haciendo uso de la instrumentación mencionada. En total se realizaron seis pruebas, cada una correspondiente a posiciones equidistantes de apertura de la válvula. Previo a cada prueba es necesario ajustar manualmente, tanto a través de la HMI como visualmente el nivel inicial de ambos recipientes, así como posicionar a la válvula en su nuevo porcentaje de apertura. En la tabla 3 muestran los datos obtenidos experimentalmente en cada una de las pruebas.

Tabla 3 Datos experimentales.

% de apertura	Presión (psi)	Volumen (L)	Tiempo (s)	Flujo (L/min)	Temperatura (°C)	Tensión (V)	Corriente (A)
100	24	10.49	20.53	30.66	23.54	126.5	6.85
80	26	10.49	21.55	29.21	23.42	127.7	7.41
60	28	10.49	22.69	27.75	23.55	127.7	7.22
40	36	10.49	27.21	23.14	23.52	127.1	8.24
20	44	10.49	60.84	10.35	23.26	126.7	9.57
0	58	0	-	0	23.42	126.2	-
<b>Medición independiente de velocidad angular</b>							
	<b>Porcentaje de apertura</b>						
	<b>100 %</b>	<b>80%</b>	<b>60%</b>	<b>40%</b>	<b>20%</b>	<b>0%</b>	
<b>RPM</b>	2532	2544	2514	2544	2418	2356	

Realizadas las mediciones se obtienen las curvas características de la bomba procesando los datos en un script de Matlab. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la potencia eléctrica entregada a la bomba [Serway, 2008], la potencia mecánica transferida al fluido [Díez de la Cortina, 2008] y la eficiencia de la bomba [Díez de la Cortina] son las ecuaciones 9, 10 y 11 respectivamente.

$$P_{promedio} = I_{RMS} V_{RMS} \cos \phi \quad (9)$$

Donde  $\cos \phi$  es el factor de potencia cuyo valor se considera en este trabajo de 0.9.

$$P_{mecánica} = P Q_v \quad (10)$$

Donde  $P$  es la presión del fluido.

$$Eficiencia = \frac{P_{promedio}}{P_{mecanica}} = \frac{I_{RMS} V_{RMS} \cos\phi}{P Q_v} \quad (11)$$

### 3. Resultados

Matlab utiliza una regresión polinomial para encontrar la función de segundo orden que más se aproxime a todos los puntos en cada una de las gráficas, generando así las curvas características de la bomba centrífuga partiendo de los datos obtenidos experimentalmente. La figura 10 muestra el comportamiento de la curva flujo volumétrico– carga (presión), donde al incrementarse la presión por el cierre de la válvula se reduce el flujo que circula por el sistema. Este comportamiento se entiende bajo el razonamiento de que, al incrementar la presión de trabajo, el esfuerzo que debe realizar la bomba es también mayor, por lo que mantener un mismo flujo a presiones mayores no es factible para la bomba. Sin embargo, cabe destacar que la afectación negativa que resiente el flujo ante los aumentos de presión depende tanto de las condiciones de operación como del nivel de desgaste de las partes de la bomba. La figura 11 presenta el comportamiento de la curva flujo volumétrico–potencia eléctrica.  $n$ ). En este caso, aunque la válvula se llegue a cerrar completamente y no se tenga flujo en el sistema, la bomba centrífuga estará demandando energía eléctrica para mantener la presión máxima en la tubería.

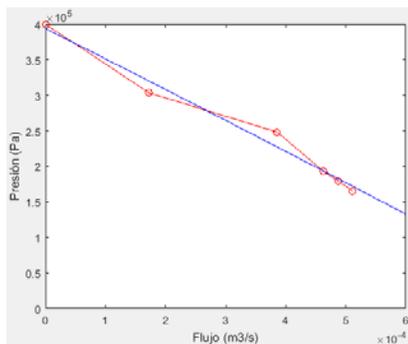


Figura 10 Curva flujo – carga (presión).

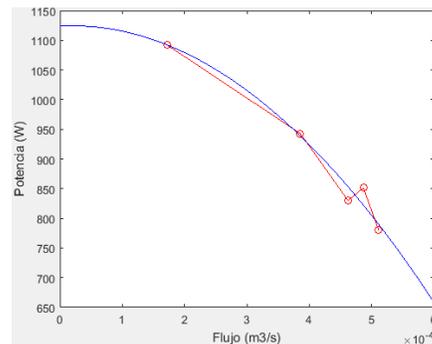


Figura 11 Curva flujo – potencia eléctrica.

Finalmente, la gráfica de la figura 12 presenta el aprovechamiento de la energía por parte de la bomba en función del flujo volumétrico (curva flujo–eficiencia). Puede

notarse que existe un punto máximo de eficiencia; sin embargo, cabe destacar que dicho punto no supera el 12%, lo cual significa que incluso bajo condiciones de operación óptimas, la bomba sigue presentando un enorme desperdicio de energía, esto puede atribuirse a las acciones de mantenimiento correctivo a las que fue sometida la bomba; así como a los años de operación que presenta.

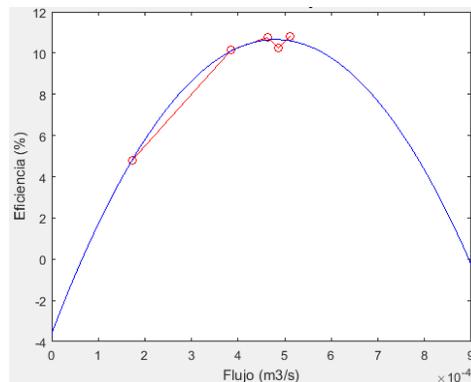


Figura 12 Curva flujo – eficiencia.

## 4. Discusión

El uso de la HMI facilitó la medición y visualización en tiempo real de las variables de interés; sin embargo, para su implementación se requieren previos conocimientos de eléctrica, electrónica, instrumentación y programación, así como la planeación para llevar a cabo la instalación. Como mejoras en un proyecto futuro se tiene la posibilidad de medir en tiempo real las variables que en esta ocasión fueron promediadas y presentadas al final de cada prueba, de esta manera se tendría un conocimiento completo de la influencia que tienen entre sí todos los parámetros de la bomba durante todo el tiempo de operación, dando pauta incluso a un análisis de condiciones transitorias y no solo en estado estable.

## 5. Conclusiones

Se determinaron las curvas características de una bomba centrífuga residencial, implementando instrumentación mecánica y sensores para integrar una HMI y tener un prototipo didáctico de bajo costo para prácticas de laboratorio y con los datos y videos obtenidos apoyar el aspecto práctico en las materias pertinentes de la carrera

de Ingeniería en Control y Automatización de la ESIME Zacatenco. De la curva de eficiencia-flujo, quedaron demostrados los efectos que el tiempo de uso y la falta de mantenimiento tienen sobre el desempeño de la bomba al ocasionar un prematuro deterioro de los componentes y un creciente desaprovechamiento de la energía que llega a ser superior incluso al 80%. Aunado a esto, la operación de la bomba en condiciones demasiado alejadas de las óptimas logra reducir aún más la cantidad de energía que realmente se transfiere al fluido. Con base en lo anterior, no es posible dudar de la importancia de las curvas características para la selección y operación de una bomba, haciendo la aclaración de que estas curvas tienden a verse modificadas por los efectos que la propia operación produce, de tal forma que es también indispensable el constante monitoreo del desempeño de las bombas centrífugas para asegurar un máximo aprovechamiento de la energía y, por supuesto, un mínimo costo de operación.

### **Agradecimientos**

Se agradece el apoyo del técnico José Juan Peñaloza Soto en la integración de la instalación experimental para la realización de este trabajo.

### **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Amores Silva I., Chávez Estrada M., Miranda Ramos M., Diseño, implementación y control para un banco de pruebas con bombas centrífugas en conexión serie paralelo, *Científica*, Vol. 22, No.1, pp. 51-59, 2018.
- [2] Capehart, B. L., Turner, W. C., & Kennedy, W. J., (2003). *Guide to energy management*. The Fairmont Press, Inc. USA. 2003, pp. 1-42.
- [3] Díez de la Cortina, A., *Manual de Oleohidráulica*. Primera edición. Editorial Alfaomega. México, pp. 9-10, 2008.
- [4] Hernández L. F. M., Villegas E. M., Estudio de eficiencia energética en bombas de agua del laboratorio de acuicultura de la DACbiol, Kuxulkab' *Revista de Divulgación División Académica de Ciencias Biológicas*, Vol14, Número 26, pp. 89-94, 2008.
- [5] Kuritza J. C., Camponogara G., Marques M. G., Sanagiotto D. G., & Battiston,

- C., Dimensionless curves of centrifugal pumps for water supply systems: development and case study, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol 22, 2017.
- [6] Mott, Robert, *Mecánica de fluidos*. Sexta edición. Editorial Pearson education. México, página 154, 2006.
- [7] Reyes, F., Cid, J., & Vargas, E., *Mecatrónica. Control y automatización*. Primera edición. Editorial Alfaomega. México, página 210, 2013.
- [8] Sahoo T. and Guharoy A, Energy cost savings with centrifugal pumps, *World Pumps*, Issue 510, pp. 35-37, 2009.
- [9] Serway, R., & Jewett, J., *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*. Volumen 2. Séptima edición. Editorial Cengage Learning, pp. 924–936, 2009.
- [10] Simpson A. R., Marchi A., Evaluating the approximation of the affinity laws and improving the efficiency estimate for variable speed pumps, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 13, pp 1314-1317, 2013.
- [11] Vanderslice N., Oberto R., & Marrero T. R., Centrifugal Pump Experiment for Chemical Engineering Undergraduates, *Chemical Engineering Education*, Vol 46, no. 1, pp 50-57, 2012.