

OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE LA BOMBA Y SISTEMA, PARA ENCONTRAR EL PUNTO DE OPERACIÓN ENTRE LA INTERACCIÓN BOMBA-SISTEMA, EN UN BANCO DE PRUEBAS PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS.

Guano A. Jijón F.

Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, Ecuador

barg.and.90@gmail.com

javijijon_85@yahoo.es

Abstract— El documento indica como determinar el punto de operación de una bomba centrífuga a partir de la curva de la bomba y la curva del sistema. La obtención de las curvas se lo realizara con la ayuda de diferentes softwares como son: TIA, LabVIEW y OPC Server. El banco de pruebas de Bombas centrífugas del laboratorio de REDES DIGITALES Y CONTROL DE PROCESOS es el Hardware empleado.

Palabras claves—Banco de pruebas, Sistema, Bomba, Punto de operación, LabVIEW, presión caudal.

I. INTRODUCCIÓN

EL presente documento indica cómo obtener la curva de la bomba y sistema del banco de pruebas de bombas centrífugas en el laboratorio de REDES DIGITALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE LATACUNGA, y a partir de ellas encontrar el punto de operación entre la bomba y el sistema.

II. MARCO TEORICO

A. Banco de pruebas de bombas centrífugas

El banco de pruebas de bombas centrífugas ver Fig. 1, posee dos paneles, el panel lateral en donde se realizan las conexiones y el panel frontal donde se ubican el PLC, una TOUCH Panel, dos transmisores de presión y un puerto para comunicación Ethernet. Como parte de la estructura tiene también una bomba centrífuga, una tubería, en la cual se ubican los sensores de presión y caudal con su transmisor, que sale y entra a un tanque de agua.



Fig. 1. Banco de Pruebas de bombas centrífugas.

El PLC se encarga de tomar datos de las variables de Presión y Caudal que son enviadas como señal estándar de 4 a 20 mA con la ayuda de transmisores industriales, el PLC acondiciona las señales de los transmisores para que puedan ser utilizadas en una TOUCH Panel o en un computador, los datos se comparten a través de una red Ethernet

Fig. 2 muestra el funcionamiento a lazo abierto del banco de pruebas en donde el caudal se varía con la ayuda de un potenciómetro el cual actúa sobre el variador de frecuencia que controla a la bomba centrífuga y todos los datos son enviados por los transmisores al PLC que se comunica con un computador.

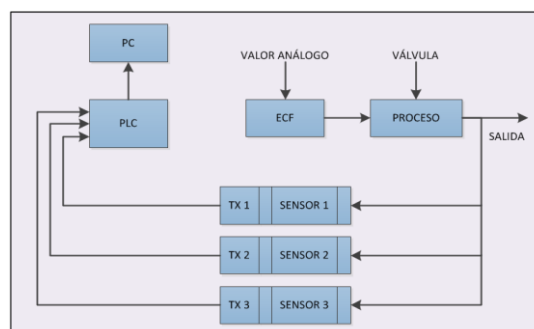


Fig. 2. Diagrama de bloques de lazo abierto del banco de pruebas de bombas centrífugas.

B. Sensores e importancia

Los sensores ubicados para la obtención de los datos para el banco de pruebas de bombas centrífugas son: el sensor de flujo de paletas y los sensores de presión manométrica. Los sensores están acoplados a los transmisores industriales para obtener señales estándar de corriente.

El sensor de flujo de paletas se requiere para medir la variable caudal que circula a través de la tubería y los datos obtenidos y enviados por el transmisor son empleados en la construcción de la curva de la bomba, curva del sistema y monitoreo de la variable caudal.

Los sensores de presión se los requiere para medir la presión que existe a la succión y a la impulsión del caudal en

la bomba centrífuga, los datos se los utiliza para la construcción de la curva de la bomba ya que la altura total se tiene en función de la diferencia de presiones de la impulsión y la succión.

C. Curva de la bomba

La curva de la bomba describe el funcionamiento de la bomba centrífuga durante su operación. La altura total entregada por la bomba disminuye a medida que el caudal aumenta.

Las curvas de caudal contra cabeza total (altura) y contra eficiencia son suministradas por los fabricantes de las bombas. Las primeras de estas (Q vs. H_m) se conoce como la curva de la bomba.

Por lo general, la curva de caudal contra cabeza total (H_m) (curva de la bomba) para una bomba centrífuga se puede expresar en la siguiente forma funcional:

$$H_m = AQ^2 + BQ + C \quad (1)$$

Los coeficientes A, B y C pueden ser calculados tomando tres puntos (Q, H_m) de la curva del fabricante y resolviendo la ecuación (1) para cada uno de ellos. [1]

D. Curva del Sistema.

Para la obtención de la curva del sistema se parte de la conservación de energía teniendo en cuenta la ecuación (2).

$$H_m = H_T = \left(\sum f_i \frac{l_i}{d_i} + \sum k_{mi} \right) \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2)$$

Donde:

HT= desnivel geométrico total

f= Factor fricción

l= Distancia de la tubería

km= Pérdidas en tubería y accesorios.

Q= Caudal.

g= Gravedad.

A= Área de la tubería.

(2) indica que el caudal crece con la raíz cuadrada de H_m. La forma final de la ecuación depende de las características físicas de la tubería (longitud accesorios diámetro, rugosidad absoluta, etc.). La pareja de puntos que se lleva a una gráfica es de H_m vs. Q.

E. Cálculo de la fricción

El coeficiente f recibe el nombre de factor de fricción, que depende por un lado de las condiciones hidrodinámicas del flujo, expresadas a través del número de Reynolds y por otro lado depende del estado de la superficie de la conducción que está en contacto con el fluido, a través de la rugosidad

relativa.

Para el cálculo de la fricción se utiliza la fórmula de Swamee y Jain (1976) que se muestra en la ecuación (3).

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{5,74}{Re^{0,9}} + \frac{\epsilon_r}{3,7} \right) \right]^2} \quad (3)$$

Donde:

Re= Número de Reynolds

ε_r= Rugosidad relativa

Para calcular la rugosidad relativa se utiliza la ecuación (4) y para el número de Reynolds la ecuación (5). [2]

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{D} \quad (4)$$

Donde:

ε= Rugosidad absoluta (1,5E-6 m)

D= Diámetro

$$Re = \frac{Q \times D}{A \times \nu} \quad (5)$$

Donde:

Q= Caudal

D= Diámetro

A= Área

ν= Viscosidad del agua (1,007E-6 m²/s)

F. Cálculo de Pérdidas en tuberías y accesorios

Los elementos accesorios son imprescindibles en toda red de tuberías, entre ellos se incluyen los que permiten acomodar el trazado de toda red a los accidentes topográficos del terreno (codos, juntas), otros que permiten empalmar y derivar tuberías (tes, collarines, uniones en Y), o bien acoplar los cambios de geometría en la sección (conos) y también los dispositivos de control del flujo (válvulas de compuerta, lenteja o mariposa, estrechamientos).

Los elementos mencionados producen pérdidas de carga que, al estar originadas por dispositivos concretos se conocen con el nombre de pérdidas localizadas, locales, singulares o menores.

Para obtener los coeficientes de pérdidas k se utiliza los siguientes valores y fórmulas dadas:

Codo 90°: k=1,8.

Válvula de Globo y compuerta: k=0,2.

Tee: k=1,8

Entrada de depósito: k=1

(6) Ensanchamiento brusco:

$$k = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (6)$$

(7) Contracción brusca:

$$k = 0,5 \left[1 - \left(\frac{D2}{D1} \right)^2 \right] \tag{7}$$

D1 = Diámetro inicial y D2 = Diámetro final [3]

III. IMPLEMENTACIÓN

A. Programación en TIA Portal para el PLC S7 1200

En el software TIA Portal se programa la adquisición y acondicionamiento de datos enviados por los transmisores industriales. En donde se realiza una normalización y un escalamiento ver Fig. 3, los rangos en el bloque de escalamiento varían de acuerdo a la variable a medir, la presión a la impulsión va desde valor mínimo de -2 y el valor máximo de 320 y a la succión un valor mínimo de 5 y el valor máximo de -60, para el caudal va de 0 a 30. Los datos en el bloque de normalización son los mismos para las tres variables de 5529 a 27648 ya que representan los valores de bits de la entrada analógica del PLC.

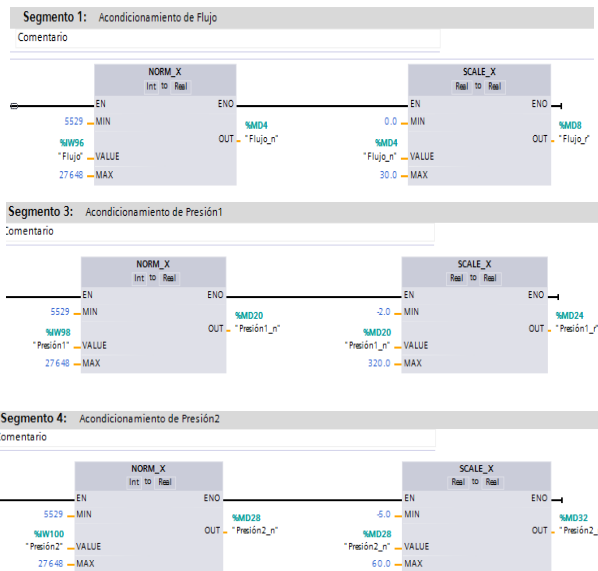


Fig. 3. Acondicionamiento de caudal, presión a la impulsión y succión.

B. OPC

El servidor utilizado es NI OPC Servers de LabVIEW 2013, en el cual se va a crear una red Ethernet con los tag de las variables que tiene el PLC ver Fig. 4 y poderse comunicar con el computador hacia LabView.

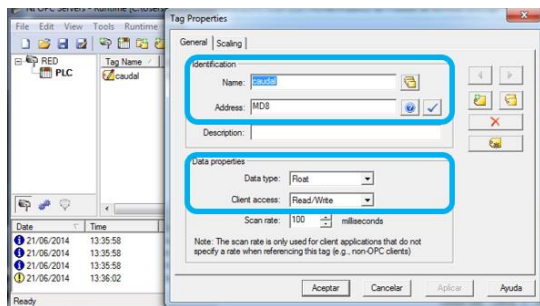


Fig. 4. Tag de la variable caudal.

x Obtención de la curva de la Bomba en LabVIEW
 Obtención de la curva de la Bomba en LabVIEW

C. Obtención de la curva de la Bomba en LabVIEW

Para obtener la curva de la bomba se requiere ingresar los valores de flujo y altura (cabeza total) ver Fig. 5 para poder almacenar los datos en seis vectores a frecuencias de 60, 50 y 40 Hz ver Fig. 6.

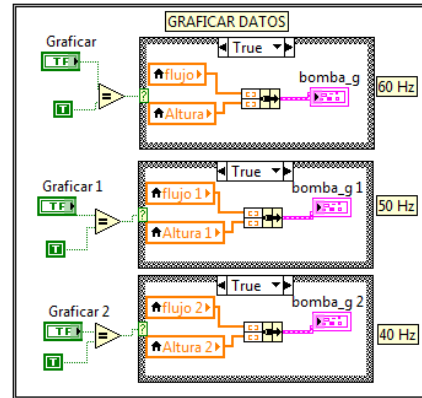


Fig. 5. Programación para obtener datos.



Fig. 6. Interface para la obtención de datos en los vectores a frecuencias de 60, 50 y 40 Hz.

Para obtener la altura se requiere realizar una diferencia de presiones (8) entre la impulsión y la succión.

$$H_m = \frac{P1 - P2}{\gamma} \tag{8}$$

Donde:

- P1= Presión a la impulsión
- P2= Presión a la succión
- γ= Peso específico del agua 9800 N/m³

D. Reconstrucción de la curva de la Bomba en LabVIEW

Para determinar la curva de la bomba se requieren seis valores obtenidos de los vectores de flujo y altura ver Fig. 7, estos valores son enviados a un Sub VI, para resolver el sistema de ecuaciones se utiliza el método de cramer y una vez obtenidos los valores de las constantes se generan los vectores con los valores del flujo y de cabeza total corregidos,

estos vectores son la salida del Sub VI ver Fig. 8.

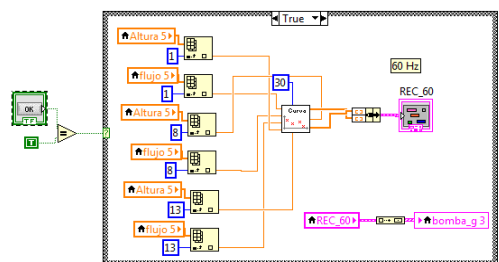


Fig. 7. Programación de la reconstrucción de la curva de la bomba.

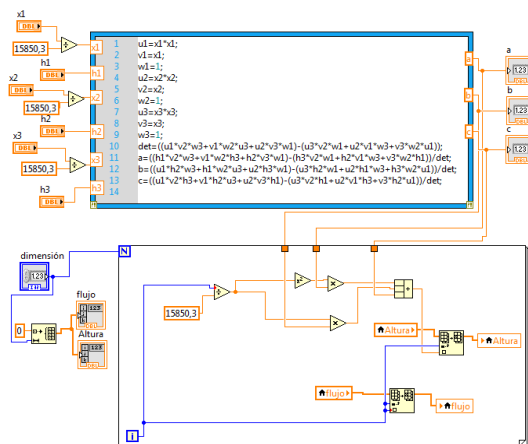


Fig. 8. Programación del Sub VI.

E. Curva del Sistema

La programación para el cálculo de la curva del sistema tiene dos partes, el programa principal para ingresar los datos ver Fig. 9 y el sub VI para realizar los cálculos ver Fig. 10.

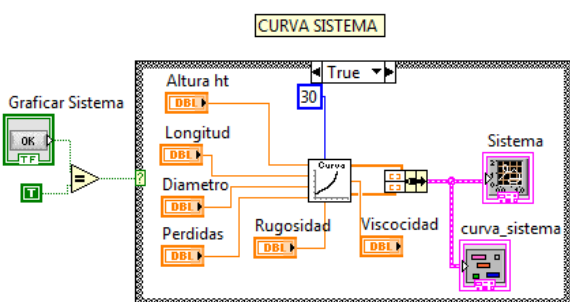


Fig. 9. Programa principal de la curva del sistema.

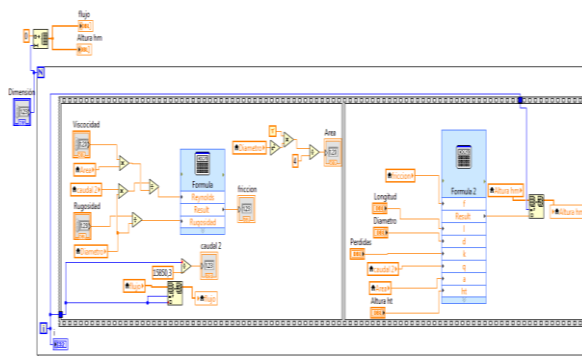


Fig.10: Programación del sub VI para el cálculo de la curva del sistema.

Para obtener la curva del sistema se requiere ingresar los datos de desnivel geométrico total de 0.63 que es la altura que existe desde la succión hasta donde regresa el agua al tanque, longitud y diámetro de la tubería (3.615 m y 3/4 de pulgada), pérdidas ver Tabla I (Km = 22), rugosidad absoluta y la viscosidad del agua ver Fig. 11.

Tabla I. Pérdidas en los accesorios.

CANTIDAD	ACCESORIO	Km	Km Total
7	Codos	1,800	12,600
2	Válvula de Globo	0,200	0,400
1	Válvula de Compuerta	0,200	0,200
1	Tee	1,800	1,800
2	Entrada al tanque	1,000	2,000
1	Ensanchamiento brusco	0,563	0,563
1	Ensanchamiento brusco	0,410	0,410
1	Contracción brusca	0,605	0,605
1	Contracción brusca	3,160	3,160
TOTAL			21,738

CÁLCULO CURVA DEL SISTEMA			
DATOS			
ALTURA	0,63 (m)	PÉRDIDAS	22 ()
DIAMETRO	0,01905 (m)	RUGOSIDAD	1,5E-6 (m)
LONGITUD	3,615 (m)	VISCOSIDAD	1,007E-6 (m^2/s)

Fig. 11. Ingreso de datos para la curva del sistema en LabVIEW.

F. Punto de operación de la bomba

El punto de operación de la bomba centrífuga es la intersección entre las curvas del sistema y de la bomba ver Fig. 11.

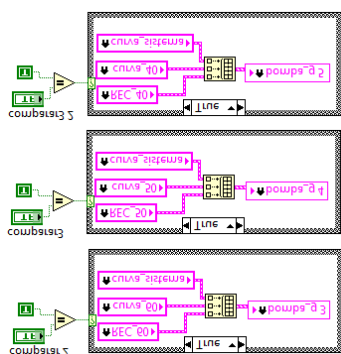


Fig. 12. Programación para obtener las curvas con el punto de operación a cada frecuencia.

IV. PRUEBAS DE LAS CURVAS

A. Curva de la bomba obtenida y reconstruida a 60 Hz

Los vectores de flujo y altura obtenidos con 15 datos cada uno para la curva de la bomba a 60 Hz, teniendo en cuenta que para cada aumento de 2 GPM que van circulando por la tubería se obtiene el valor de la altura para luego ser graficada la curva de la bomba ver Fig. 13, en donde el flujo en GPM corresponde al eje horizontal y la altura en metros corresponde al eje vertical. La reconstrucción de la curva se la realiza con 30 datos ver Fig. 14.

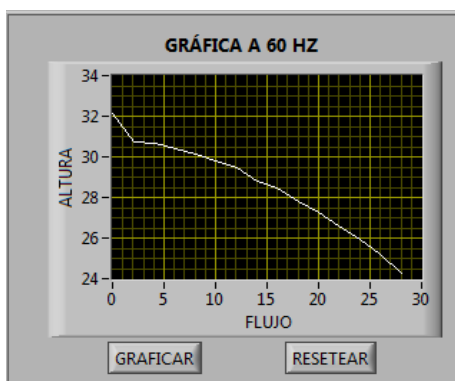


Fig.13. Curva obtenida de la bomba a 60Hz.

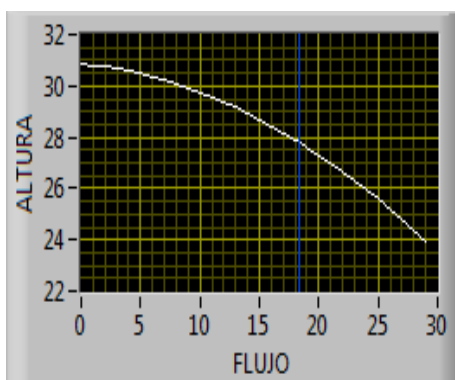


Fig.14. Curva reconstruida de la bomba a 60hz.

B. Curva de la bomba obtenida y reconstruida a 50 Hz

Los vectores de flujo y altura obtenidos con 13 datos cada uno para la curva de la bomba a 50 Hz, teniendo en cuenta

que para cada aumento de 2 GPM que van circulando por la tubería se obtiene el valor de la altura para luego ser graficada la curva de la bomba ver Fig. 15, en donde el flujo en GPM corresponde al eje horizontal y la altura en metros corresponde al eje vertical. La reconstrucción de la curva se la realiza con 26 datos ver Fig. 16.

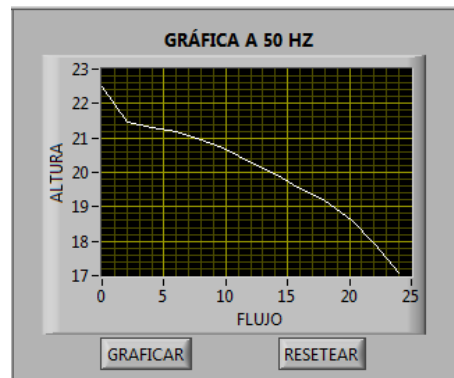


Fig.15. Curva obtenida de la bomba a 50hz.

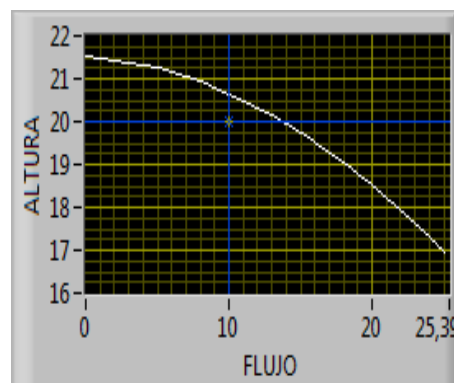


Fig.16. Curva reconstruida de la bomba a 50hz.

C. Curva de la bomba obtenida y reconstruida a 40 Hz

Los vectores de flujo y altura obtenidos con 11 datos cada uno para la curva de la bomba a 40 Hz, teniendo en cuenta que para cada aumento de 2 GPM que van circulando por la tubería se obtiene el valor de la altura para luego ser graficada la curva de la bomba ver Fig. 177, en donde el flujo en GPM corresponde al eje horizontal y la altura en metros corresponde al eje vertical. La reconstrucción de la curva se la realiza con 22 datos ver Fig. 18.

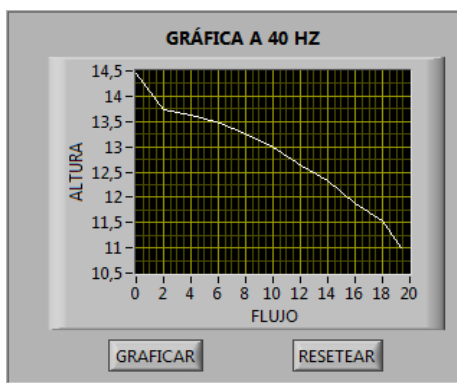


Fig.17. Curva obtenida de la bomba a 40hz.

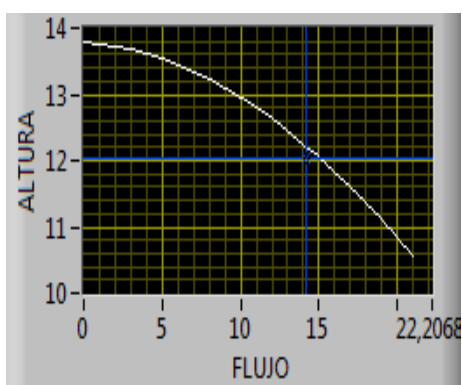


Fig.18. Curva reconstruida de la bomba a 40hz.

D. Curva del Sistema

La curva del sistema muestra la altura de bombeo en función del caudal ver Fig. 19. La altura de bombeo requerida por el sistema es igual a la elevación que la bomba le debe proporcionar al fluido más las pérdidas de carga en todo el sistema. La altura total requerida por el sistema aumenta a medida que el caudal aumenta.

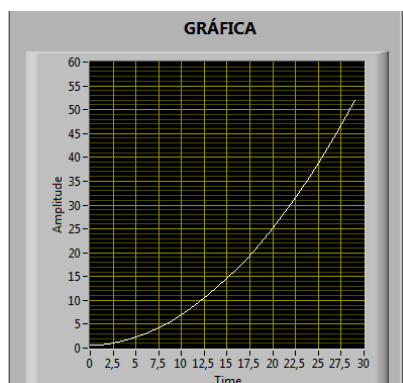


Fig.19. Curva del Sistema.

E. Punto de operación a 60, 50 y 40 Hz.

El punto de operación de la bomba centrífuga es la intersección entre las curvas del sistema y de la bomba. El punto de operación se lo determina para tener una mayor eficiencia en el funcionamiento de la misma, un ahorro de energía y prolongar la vida útil de la bomba.

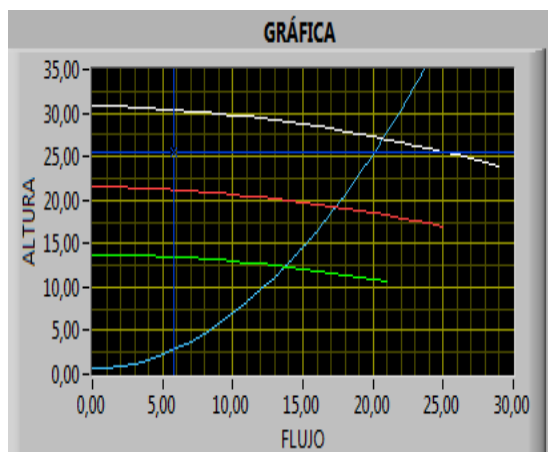


Fig.20. Punto de operación de la bomba a 60, 50 y 40 Hz. La bomba centrífuga a 60 Hz trabaja con un flujo de 28 GPM y una altura de 24 m, al encontrar el punto de operación el flujo es de 20,8 GPM y la altura es de 27 m ver Fig. 21.

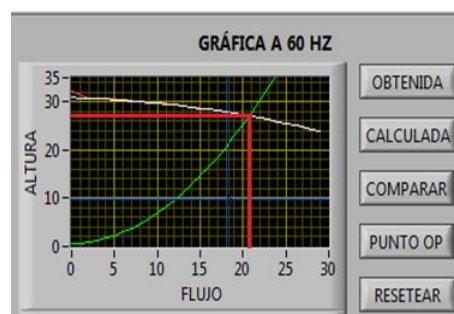


Fig. 21. Punto de operación de la bomba a 60 Hz.

Para que la bomba centrífuga trabaje a su máximo rendimiento se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta llegar a tener un flujo de 20,8 GPM circulando por la tubería.

La bomba centrífuga a 50 Hz trabaja con un flujo de 24 GPM y una altura de 17,5 m, al encontrar el punto de operación el flujo es de 17,2 GPM y la altura es de 19 m ver Fig. 22.

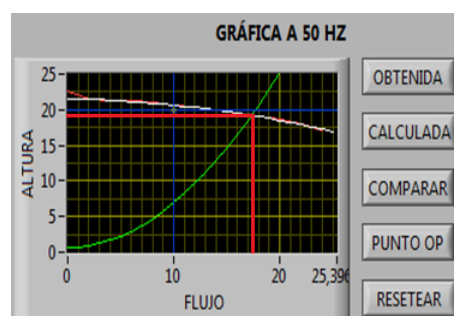


Fig. 22. Punto de operación de la bomba a 50 Hz.

Para que la bomba centrífuga trabaje a su máximo rendimiento se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta llegar a tener un flujo de 17,2 GPM circulando por la tubería.

La bomba centrífuga a 40 Hz trabaja con un flujo de 20 GPM y una altura de 11 m, al encontrar el punto de operación el flujo es de 13,9 GPM y la altura es de 12,4 m ver Fig. 23.

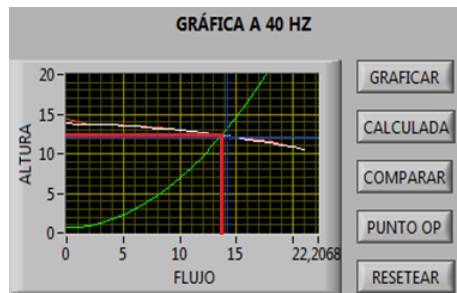


Fig. 23. Punto de operación de la bomba a 40 Hz.

Para que la bomba centrífuga trabaje a su máximo rendimiento se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta llegar a tener un flujo de 13,9 GPM circulando por la tubería.

V. CONCLUSIONES

- Al cerrar completamente la válvula V 2.1 ó V 2.2 del banco de pruebas de bombas centrífugas la presión ejercida sobre los sensores aumenta considerablemente ya que la bomba trabaja a su máxima potencia intentando impulsar al caudal, esto genera un desvío en la curva de la bomba
- La curva de la bomba reconstruida con el procesamiento de los datos, genera una curva con un mayor número de puntos y elimina el desvío del primer dato de la curva obtenida.
- La diferencia entre la curva obtenida y la reconstruida es mínima, y si se desea analizar la curva de la bomba se puede utilizar la curva reconstruida.
- En la curva de la bomba, la altura decrece a medida que se aumenta el flujo en la tubería y viceversa si se disminuye el flujo la altura aumenta, la curva del sistema permanece constante, esto cuando se cierra la válvula del banco de pruebas.
- Las características físicas de la tubería, sus accesorios y distancias, influyen para el cálculo de las pérdidas y afectan directamente a la gráfica de la curva del sistema.
- El punto de intersección entre la curva de la bomba y la curva del sistema (punto de operación), en las tres frecuencias experimentadas de 40, 50 y 60 Hz, indica que el banco de pruebas de bombas centrífugas debe funcionar a un menor caudal del que se encuentra operando, para ello se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.1 hasta que el caudal se encuentre en el punto de operación.
- Para que la bomba centrífuga trabaje a su máximo rendimiento a 60 Hz se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta llegar a tener un flujo de 20,8 GPM circulando por la tubería.
- Para que la bomba centrífuga trabaje a su máximo rendimiento a 50 Hz se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta llegar a tener un flujo de 17,2 GPM circulando por la tubería.
- Para que la bomba centrífuga trabaje a su máximo

rendimiento a 40 Hz se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta llegar a tener un flujo de 13,9 GPM circulando por la tubería.

VI. REFERENCIAS

- [1] J. Saldarriaga, de *Hidráulica de tuberías*, Colombia, Mc Graw Hill, 2003, pp. 157-158.
- [2] P. Rafael, I. Pedro y F. Vicente, *Flujo estacionario de fluidos incompresibles en tuberías*, Valencia: UPV, 2009.
- [3] J. Saldarriaga, «Hidráulica de tuberías,» de *18,19,20*, Colombia, Mc Graw Hill, 2003.
- [4] P. Rafael, I. Pedro y F. Vicente, «Flujo estacionario de fluidos incompresibles en tuberías,» de *18,19,20*, Valencia, UPV, 2009.



Guano Andrés. Nació en Latacunga provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es graduado del Colegio Particular "Hermano Miguel" donde obtuvo el título de Bachiller en Electrónica de consumo. Actualmente se encuentra egresado de la Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación en la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" en la ciudad de Latacunga Ecuador.
E-mail: barg.and.90@gmail.com



Jijón Francisco. Nació en Salcedo provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es graduado del Colegio Nacional Experimental Salcedo, Salcedo – Ecuador donde obtuvo el título de Bachiller Físico Matemático. Actualmente se encuentra egresado de la Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación en la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" en la ciudad de Latacunga Ecuador.
E-mail: javijon_85@yahoo.es