



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

**TITULACIÓN DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Rehabilitación y adecuación de un banco de pruebas Armfield en el Laboratorio de Hidráulica de la UTPL: selección de instrumentación requerida para el estudio de bombas centrífugas y turbinas Pelton y Turgo

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTORES: Rojas Rojas, Víctor Alejandro.

DIRECTOR: Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, Ing.

LOJA – ECUADOR

2015

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

Ingeniero.

Jorge Luis Jaramillo Pacheco

DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

CERTIFICA:

El presente trabajo de fin de titulación: "Rehabilitación y adecuación de un banco de pruebas Armfield en el Laboratorio de Hidráulica de la UTP: selección de instrumentación requerida para el estudio de bombas centrífugas y turbinas Pelton y Turgo", realizado por: Rojas Rojas Víctor Alejandro, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, febrero de 2015

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo, Rojas Rojas Víctor Alejandro, declaro ser autor del presente trabajo de fin de titulación: “Rehabilitación y adecuación de un banco de pruebas Armfield en el Laboratorio de Hidráulica de la UTPL: selección de instrumentación requerida para el estudio de bombas centrífugas y turbinas Pelton y Turgo” de la Titulación de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, siendo Jorge Luis Jaramillo Pacheco director de presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f).....
Autor: Rojas Rojas, Víctor Alejandro
Cédula:

DEDICATORIA

A, Gloria Rojas y Víctor Rojas, para ustedes va esto con todo el amor de un hijo agradecido por todo el apoyo y fortaleza que he recibido de ustedes, mi motivación y mi mano en tiempos de nostalgia. Todo gracias a ustedes y para ustedes.

A, mis hermanas, Verónica Rojas y Andrea Rojas, por cada consejo y apoyo recibido durante toda mi vida

A, mis sobrinas, Nayely Quezada y Alejandra Loyola, que este pequeño triunfo, sea para ustedes un motivo alcanzable y superable.

A, mis amigos en general, por darle sentido a la vida, llenándola de risas, y muy buenos momentos.

- *Víctor Alejandro*

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que de alguna manera han sido parte de este logro, compañeros de estudio, de trabajo, amigos en general y en especial mi familia, que ha sido pilar fundamental para alcanzar esta meta.

Un agradecimiento a Daniel Uchuari, quien cumplió, de excelente manera, con la primera etapa de este trabajo.

De manera muy especial agradezco al Ing. Jorge Luis Jaramillo, director de la presente tesis, por ser un gran mentor y consejero en el desarrollo de la misma.

Agradezco a la Universidad Técnica Particular de Loja, porque en sus aulas, recibimos el conocimiento intelectual y humano de cada uno de los docentes de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	I
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS.....	X
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS	14
. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS Y DE LAS TURBINAS TURGO.....	15
1.1. Introducción.....	16
1.2. Estado actual del banco de pruebas	16
1.2.1 Trabajos de rehabilitación.....	16
1.2.2 Trabajos de adecuación.....	16
1.3. Características de trabajo de las bombas centrífugas.....	17
1.3.1 Construcción de la curva H vs Q	17
1.3.2 Construcción de la curva P vs Q	19
1.3.3 Construcción de la curva P_H vs Q	20
1.3.4 Construcción de la curva η_B vs (Q)	20
1.3.5 Curva Net Positive Suction Head (NPSHr)	20
1.3.6 Curvas de iso-rendimiento de una bomba	21
1.3.7 Posibilidades técnicas del banco de pruebas para obtención de las curvas características de las bombas centrífugas.....	22
1.4. Características de trabajo de las turbinas tipo Pelton y Turgo	23
1.4.1 Características generales de las turbinas Pelton y Turgo	23
1.4.2 Construcción de las curvas características de las turbinas tipo Pelton y Turgo	26
1.4.2.1 Construcción de la curva η_H vs u/c_1	26
1.4.2.2 Construcción de la curva P_E vs Q.....	27
1.4.2.3 Construcción de la curva P_T vs n	27
1.4.2.4 Rendimiento global de la turbina	27
. INSTRUMENTACIÓN PARA EL ESTUDIO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	29
2.1. Introducción.....	30
2.2. Requerimientos generales sobre la instrumentación	30
2.3. Instrumentación de la curva H vs Q	31

2.3.1	Medición de la altura manométrica (H).....	31
2.3.2	Medición del caudal (Q).....	33
2.4.	Instrumentación de la curva P_H vs Q.....	34
2.5.	Instrumentación de la curva de rendimiento	34
2.6.	Presupuesto.....	37
. INSTRUMENTACIÓN PARA EL ESTUDIO DE TURBINAS TIPO PELTON Y TURGO		38
3.1	Introducción.....	39
3.2	Una breve referencia sobre las turbinas hidráulicas	39
3.3	Selección de la instrumentación.....	40
3.3.1	Requerimientos generales para la instrumentación	40
3.3.2	Instrumentación de la curva η_H vs u/c_1	41
3.3.2.1	Registro de la velocidad absoluta a la entrada del rodete (c_1)	41
3.3.2.2	Registro de la velocidad tangencial del rodete (u).....	42
3.3.3	Instrumentación de la curva P_H vs Q	43
3.3.4	Instrumentación de la curva P_T vs n	43
3.3.5	Instrumentación de la curva η_T vs Q	43
3.4	Inversión requerida.....	44
. INGENIERÍA DE DETALLE DE LA ETAPA DE INSTRUMENTACIÓN.....		45
4.1	Introducción.....	46
4.2	Sobre la instrumentación suficiente para el estudio de bombas centrifugas	46
4.2.1	Construcción de la curva H vs Q	46
4.2.2	Construcción de la curva P_H vs Q	47
4.2.3	Construcción de la curva η vs Q	48
4.3	Sobre la instrumentación suficiente para el estudio de turbinas tipo Pelton y Turgo.....	49
4.3.1	Construcción de la curva de η_H vs u/c_1	49
4.3.2	Construcción de la curva P_E vs Q	50
4.3.3	Construcción de la curva P_T vs n	50
4.3.4	Construcción de la curva η_T vs Q	51
4.4	Detalles generales de la instalación de la instrumentación.....	51
4.4.1	Sobre la fuente de voltaje regulado	51
4.4.2	Sobre la conexión de los sensores	52
4.4.3	Sobre el nodo de procesamiento de datos	54
4.5	Algoritmos para el cálculo de parámetros y construcción de curvas características	54
4.5.1	Cálculo de la altura manométrica	54
4.5.2	Calculo del caudal.....	55
4.5.3	Cálculo de la velocidad de rotación	58

4.5.4	Cálculo de la potencia eléctrica suministrada y de la potencia de freno	61
4.5.5	Visualización de datos	61
4.5.6	Simulación del funcionamiento del nodo de procesamiento	61
4.5.7	Construcción de las curvas características en un PC estándar	62
CONCLUSIONES		64
REFERENCIAS		65
ANEXO		68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema básico de un banco de pruebas de bombas centrífugas.....	17
Figura 1.2 Altura manométrica de la bomba en función del caudal.....	18
Figura 1.3 Altura manométrica en función del caudal con distintos diámetros.....	19
Figura 1.4 Potencia total del sistema en función del caudal.....	19
Figura 1.5 Eficiencia del sistema en función del caudal.....	20
Figura 1.6 Altura neta positiva de aspiración requerida en función del caudal.....	21
Figura 1.7 Curvas de iso-rendimiento de una bomba centrífuga.....	21
Figura 1.8 Circuito hidráulico del banco de pruebas armfield.....	22
Figura 1.9 Tubo de Venturi.....	22
Figura 1.10 Triángulos de velocidad de una turbina hidráulica.....	24
Figura 1.11 Triangulo de velocidad a la salida del rodete.....	25
Figura 1.12 Curva de rendimiento hidráulico en función de $u/c1$	27
Figura 1.13 Rendimiento total de la turbina en función del caudal.....	28
Figura 2.1 Banco de pruebas Armfield.....	30
Figura 2.2 Altura manométrica de una bomba centrífuga.....	31
Figura 2.3 Potencia hidráulica del sistema en función del caudal.....	34
Figura 2.4 Eficiencia del sistema en función del caudal.....	35
Figura 2.5 Motor Trifásico SIEMENS 1LA7 083-2YA60.....	35
Figura 2.6 Conexión Y-Y de un motor trifásico.....	36
Figura 2.8 Conexión de un resistor tipo shunt para registro de la corriente en una de las fases.....	37
Figura 3.1 Esquema general de una turbina hidráulica.....	39
Figura 3.2 Triángulos de velocidad de una turbina hidráulica.....	40
Figura 3.3 Banco de pruebas Armfield adecuado para el estudio de turbinas tipo Pelton y Turgo.....	41
Figura 3.4 Módulo de velocidad HC-020K.....	42
Figura 3.5 Freno Prony instalado en el banco de pruebas Armfield.....	43
Figura 3.8 Gráfica del rendimiento de una turbina.....	44
Figura 4.1 Esquema de ubicación de los sensores PX309, PX409 y PX137-015DV, en el banco de prueba.....	47
Figura 4.2 Esquema de ubicación del resistor shunt utilizado para medir la potencia eléctrica suministrada.....	48
Figura 4.3 Esquema de ubicación del módulo de velocidad HC-020K.....	49
Figura 4.4 Freno Prony instalado en el banco de pruebas Armfield.....	50
Figura 4.5 Arquitectura de la fuente de voltaje regulado requerida para alimentar a los sensores a instalar en el banco de pruebas.....	51
Figura 4.6 Sensor de presión manométrica PX309.....	52
Figura 4.7 Sensor de presión de vacío PX409.....	52
Figura 4.8 Sensor PX137-015DV.....	53
Figura 4.9 Módulo de velocidad HC-020K.....	53
Figura 4.10 Algoritmo para el cálculo de la altura manométrica H	55
Figura 4.11 Código IDE para cálculo de la altura manométrica H	56
Figura 4.12 Algoritmo para el cálculo del caudal Q	57
Figura 4.13 Código IDE para cálculo del caudal Q	58
Figura 4.14 Algoritmo para el cálculo de la velocidad de rotación n	59
Figura 4.15 Código IDE para cálculo de la velocidad de rotación n	60
Figura 4.16 Esquema implementado en Proteus para la simulación del funcionamiento del nodo de procesamiento.....	61
Figura 4.17 a) Interfaz gráfica diseñada para exportar datos a Excel. b) Proceso de adquisición de datos. c) Exportación de datos a Excel.....	63

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Características técnicas del sensor de presión de vacío con célula cerámica de medición IFM.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2.2 Características principales del sensor PX409.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2.3 Características principales de los sensores de la gama PX3X9.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2.4 Características principales del sensor WIKA de la serie SCX15DNC.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2.5 Características principales del sensor PX137-015DV.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2.6 Características principales del sensor SDP1108.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2.7 Características técnicas del motor SIEMENS 1LA7 083-2YA60.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 2.8 Presupuesto para la instrumentación de la bomba centrífuga.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3.1 Características del módulo de medición.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4.1 Formato de adquisición de datos para la construcción de la curva H vs Q.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 4.2 Características técnicas principales de los sensores PX309, PX409 y PX137-015DV de OMEGA.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 4.3 Formato de adquisición de datos de la variable potencia eléctrica suministrada.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4.4 Formato de adquisición de datos de la variable velocidad del rodete n.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 4.5 Formato de adquisición de datos de la variable fuerza del freno F.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4.6 Pines de conexión del sensor PX309.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4.7 Pines de conexión sensor PX409.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 4.8 Características del Arduino Mega 2560.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 4.9 Detalle de variables a considerar en el nodo de procesamiento.....</i>	<i>54</i>

RESUMEN

En el marco de la iniciativa de incorporar fuentes renovables al sistema de provisión de energía del campus universitario de la UTPL, un papel importante juegan las aplicaciones de hidrogenación, cuyo diseño requiere de la utilización de un banco de pruebas para estudiar, en un ambiente controlado, el funcionamiento de varios tipos de turbinas, a fin de trasladar los resultados obtenidos a la implementación de las soluciones de hidrogenación en campo.

En este contexto, se decidió rehabilitar y adecuar el banco de pruebas Armfield, existente en el Laboratorio de Hidráulica de la UTPL, para el estudio de bombas centrífugas y turbinas tipo Pelton y Turgo. Como parte importante del proceso, se seleccionó la instrumentación requerida para la construcción de las curvas características de las bombas y turbinas.

PALABRAS CLAVES: banco de pruebas Armfield, bombas centrífugas, turbinas tipo Pelton y Turgo

ABSTRACT

As part of the initiative to incorporate renewable energy supply system of the campus of the UTPL, play an important role hydro applications whose design requires the use of a pump test to study, in a controlled environment the operation of various types of turbines, in order to transfer the results to implementing solutions hydro field.

In this context, it was decided to rehabilitate and adapt the stand Armfield, existing in the Hydraulics Laboratory of UTPL, for the study of centrifugal pumps and turbines Pelton and Turgo type.

KEYWORDS: central test Armfield, centrifugal pump, turbines Pelton and Turgo type

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se estructuró de 4 capítulos. En el primer capítulo, se realizó un breve resumen de la rehabilitación mecánica del banco de pruebas Armfield, y, se analizó las curvas características de las bombas centrífugas y las turbinas Pelton y Turgo.

En el segundo capítulo se seleccionó la instrumentación óptima requerida para la construcción de las curvas características de las bombas centrífugas.

En el tercer capítulo se escogió la instrumentación óptima requerida para la construcción de las curvas características de las turbinas Pelton y Turgo.

Finalmente, en el capítulo cuarto, se describió la ingeniería de detalle de la instrumentación seleccionada, se explicó el funcionamiento del nodo de procesamiento, y, se especificó las características más sobresalientes de la adquisición de data.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Seleccionar la instrumentación requerida en el banco de pruebas Armfield, para la construcción de curvas características de bombas centrífugas, y turbinas Pelton y Turgo

Objetivos Específicos

- Determinar las curvas características que describen el comportamiento de las bombas centrífugas, y de las turbinas tipo Pelton y Turgo.
- Seleccionar la instrumentación que reemplace la instrumentación original inoperativa del banco, observando, en lo posible, la compatibilidad en rango de medición, acople mecánico, y, salida en voltaje o corriente.
- Diseñar un nodo de procesamiento de data, que permita la construcción de las curvas características de forma automatizada.

**. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS Y DE LAS
TURBINAS TURGO**

1.1. Introducción

En el marco de la iniciativa de incorporar fuentes renovables al sistema de provisión de energía del campus universitario de la UTPL, un papel importante juegan las aplicaciones de hidrogenación, cuyo diseño requiere de la utilización de un banco de pruebas para estudiar, en un ambiente controlado, el funcionamiento de varios tipos de turbinas centrífugas, a fin de trasladar los resultados obtenidos a la implementación de las soluciones de hidrogenación en campo.

En este contexto, se decidió rehabilitar el banco de pruebas Armfield para el estudio de bombas centrífugas, existente en el laboratorio de hidráulica en el departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil, y, posteriormente modificarlo para estudiar el desempeño de turbinas tipo Turgo. En este capítulo se describe las características generales de las bombas centrífugas y de las turbinas Pelton y Turgo.

1.2. Estado actual del banco de pruebas

1.2.1 Trabajos de rehabilitación

En un trabajo anterior [1], se definió los requerimientos para la rehabilitación y adecuación del banco de pruebas existente en el Laboratorio de Hidráulica de la UTPL, identificando la necesidad de intervenir en 2 circuitos: hidráulico y de fuerza.

El análisis realizado al circuito hidráulico, reveló problemas en tuberías, bomba de pie defectuosa, bomba centrífuga inoperativa, y, empaques envejecidos y obstruidos. En el circuito de fuerza, se determinó que el motor eléctrico estaba inoperativo, que el regulador de potencia era defectuoso, y, se encontró problemas en la alimentación eléctrica y en la instrumentación del banco.

Todos los problemas identificados fueron resueltos como parte de [1].

1.2.2 Trabajos de adecuación

Originalmente, el banco de pruebas permitía la operación de una turbina Pelton, ubicada en el interior de una campana metálica. Considerando que, las turbinas tipo Turgo operan con un chorro de accionamiento cuyo ángulo varía entre 15 y 22 grados respecto al plano diametral del rodete, se decidió obtener la variación del ángulo por medio del posicionamiento de la turbina, a través del fresado de un canal en la campana, manteniendo fijo el distribuidor. Esta adecuación fue efectuada en [1].

1.3. Características de trabajo de las bombas centrífugas

Culminada la etapa de rehabilitación y adecuación del banco de pruebas, se requiere su instrumentación para el estudio de la performance de bombas centrífugas, y, de turbinas Pelton y turgo. Para esto, es fundamental caracterizar el funcionamiento de cada una de ellas.

Caracterizar una bomba centrífuga implica determinar sus curvas características: altura manométrica (H) vs caudal (Q), potencia consumida (P) vs caudal (Q), eficiencia (η_B) vs caudal (Q), y, curva Net Positive Suction Head (NPSHr) [2].

Para la obtención de las curvas características de una bomba centrífuga, se utilizan bancos de prueba que operan de acuerdo al esquema básico mostrado en la Fig.1.1. En general, se debe monitorear las presiones de aspiración e impulsión de la bomba, regular el caudal de salida, y, registrar el caudal que suministra la bomba [2].

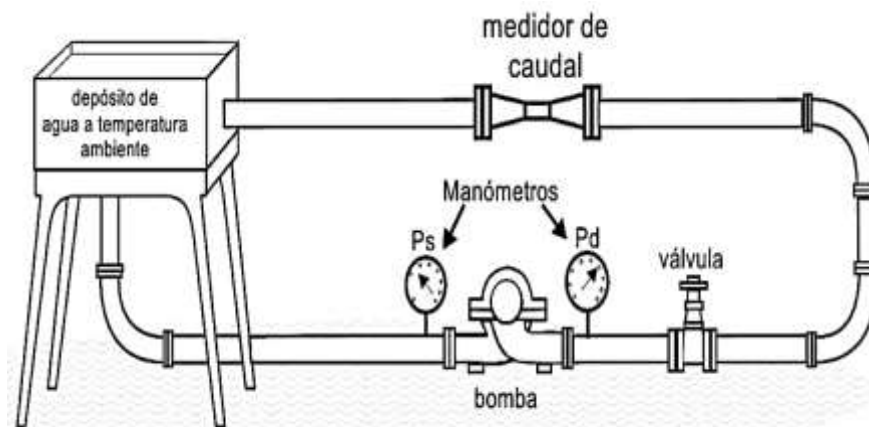


Figura 1.1 Esquema básico de un banco de pruebas de bombas centrífugas.

Fuente: <http://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-i/>

1.3.1 Construcción de la curva H vs Q

Considerando que P_s es la presión en la brida de aspiración de la bomba, y, P_d es la presión en la brida de impulsión, se arranca la bomba con la válvula de descarga totalmente cerrada (para una caudal Q_0), obteniendo la presión diferencial de la bomba ($P_d - P_s$).

Conociendo la presión diferencial y el peso específico del líquido bombeado a temperatura ambiente (16°C), se obtiene la altura manométrica de la bomba a través de la expresión (1). La altura manométrica desarrollada por la bomba con caudal nulo Q_0 , se conoce como “shut-off” o H_0 .

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} \quad (1)$$

En dónde,

H, es la altura manométrica, m

P_d, es la presión en la brida de impulsión de la bomba, kg/cm²

P_s, es la presión en la brida de aspiración de la bomba, kg/cm²

γ, es el peso específico del líquido, kg/m³

Al abrir parcialmente la válvula reguladora de caudal, se obtiene un nuevo valor de caudal, y, nuevos valores de presión en la entrada y salida de la bomba. El proceso se repite varias veces, obteniendo la curva altura manométrica (H) vs caudal (Q), o, curva H-Q (ver Fig.1.2).

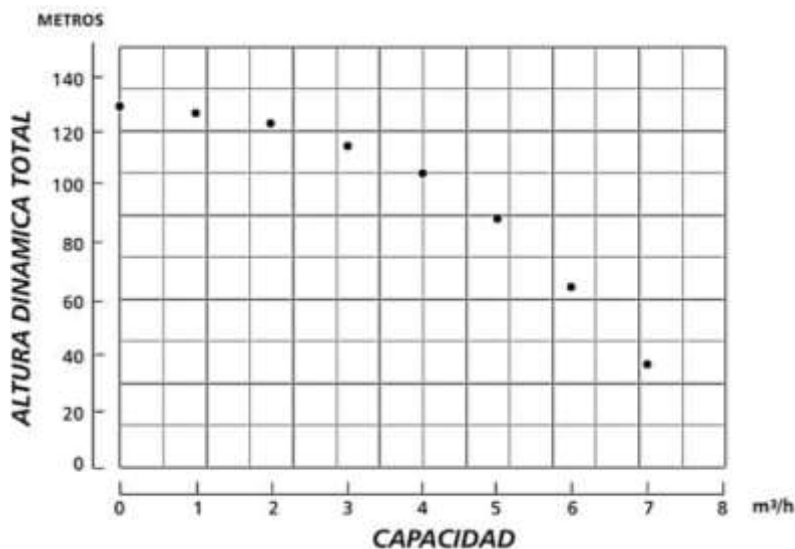


Figura 1.2 Altura manométrica de la bomba en función del caudal

Fuente: http://www.unioviado.es/Areas/Mecanica.Fluidos/docencia/_asi_gnaturas/ingenieria_de_fluidos/GuionCurvasBomba.pdf

La curva así obtenida es válida para un determinado diámetro de impulsor. Al variar el diámetro, se obtiene una curva distinta, por lo que se habla de una familia de curvas (ver Fig.1.3).

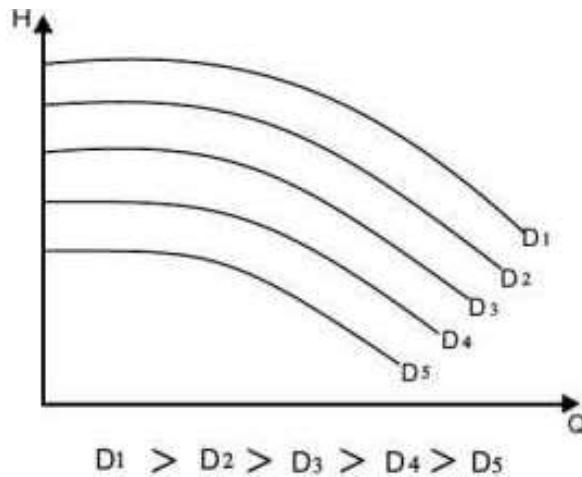


Figura 1.3 Altura manométrica en función del caudal con distintos diámetros.

Fuente: <http://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-i/>

1.3.2 Construcción de la curva P vs Q

La curva P-Q se construye monitoreando la potencia eléctrica consumida en el motor que impulsa la bomba (ver Fig.1.4). La potencia eléctrica se aproxima a través de la expresión (2).

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos(\phi) \quad (2)$$

En dónde,

P, es la potencia consumida, W.

V, es el voltaje de operación de la bomba, V.

I, es la corriente eléctrica en la bomba, A.

$\cos(\phi)$, es el factor de potencia en la bomba.

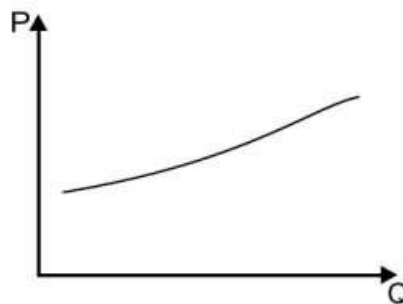


Figura 1.4 Potencia total del sistema en función del caudal.

Fuente: <http://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-i/>

1.3.3 Construcción de la curva P_H vs Q

La potencia hidráulica de la bomba (P_H), está ligada al caudal y a la altura manométrica a través de la expresión (3), a partir de la cual se construye la curva P_H vs Q .

$$P_H = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (3)$$

1.3.4 Construcción de la curva η_B vs (Q)

La potencia hidráulica difiere de la potencia consumida, debido a la presencia de pérdidas por rozamiento, y, se liga a ella a través de las expresiones (4) y (5).

$$\eta_B = \frac{P_H}{P} \quad (4)$$

$$\eta_B = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{P} \quad (5)$$

En dónde,

η_B , es la eficiencia de la bomba, %

A partir de la expresión (5) se construye la curva de eficiencia, o curva η - Q (ver Fig.1.5).

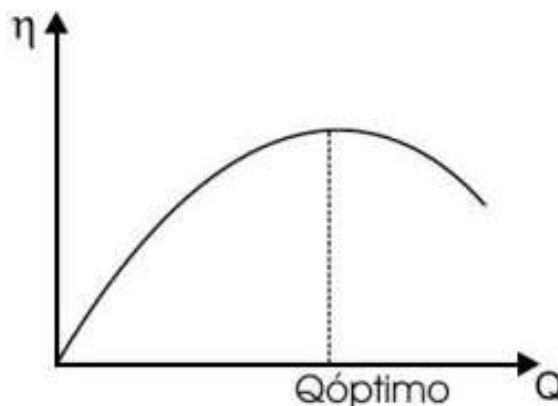


Figura 1.5 Eficiencia del sistema en función del caudal.

Fuente: <http://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-i/>

1.3.5 Curva Net Positive Suction Head (NPSHr)

La curva NPSHr, o, altura neta positiva de aspiración requerida en función del caudal, representa la energía mínima requerida por el líquido bombeado, medida en la brida de aspiración de la bomba como altura absoluta de líquido, para garantizar el funcionamiento de la bomba [2].

Esta es una característica propia de la bomba, que puede ser obtenida sólo en forma experimental en bancos de prueba de los fabricantes. Su fin práctico, es el mantener en la entrada del rodete, la presión de aspiración por encima de la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (ver Fig.1.6).



Figura 1.6 Altura neta positiva de aspiración requerida en función del caudal.

Fuente: <http://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-i/>

1.3.6 Curvas de iso-rendimiento de una bomba

Las curvas de iso-rendimiento asociadas a una bomba, o bien se grafican individualmente para cada diámetro, o bien se muestran trazadas sobre curvas H-Q para diversos diámetros del rodete, integrando todas las curvas anteriores (ver Fig.1.7).

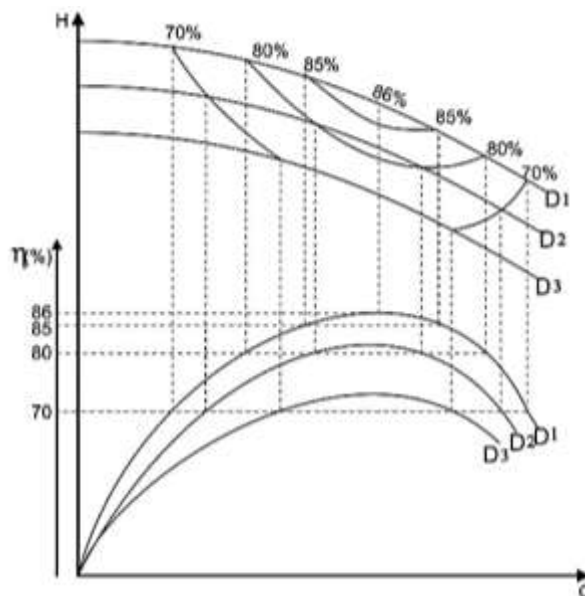


Figura 1.7 Curvas de iso-rendimiento de una bomba centrífuga.

Fuente: http://www.unioviedo.es/Areas/Mecanica.Fluidos/docencia/_asignaturas/ingenieria_de_fluidos/GuionCurvasBomba.pdf

1.3.7 Posibilidades técnicas del banco de pruebas para obtención de las curvas características de las bombas centrífugas

El esquema del circuito hidráulico del banco de pruebas (ver Fig.1.8), muestra la existencia de un vacuómetro en la brida de aspiración, y, un manómetro en la brida de impulsión, con 5 puntos de medición (4 en la bomba centrífuga, y, 1 en la salida de la misma).

Además, el banco cuenta con 7 válvulas, 5 para activar los puntos de medición del manómetro, 1 antes del vacuómetro para permitir la aspiración de líquido desde el tanque reservorio, y, una última después del manómetro para regular el caudal a aforar.

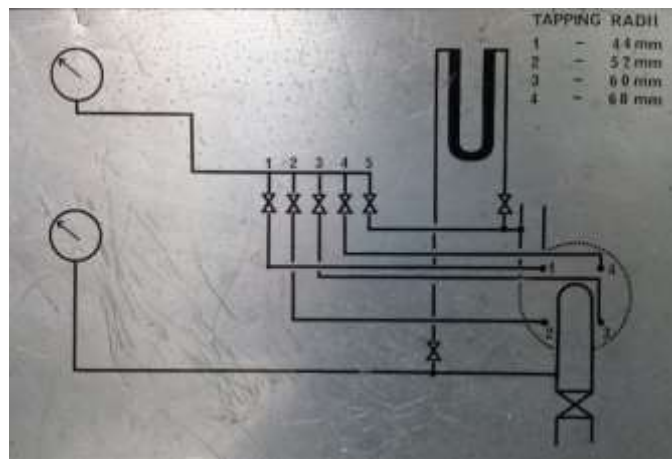


Figura 1.8 Circuito hidráulico del banco de pruebas armfield.

Fuente: Fotografía por el autor.

El caudal se aproxima con un tubo de Venturi, incorporado en la tubería conectada a la brida de impulsión de la bomba. En esencia, en un tubo Venturi se produce una pérdida de presión, al paso de un fluido a través de él. El dispositivo consta de una tubería recta y corta, o garganta, ubicada entre dos tramos cónicos [3] (ver Fig. 9).

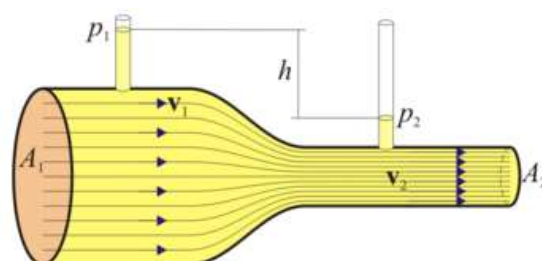


Figura 1.9 Tubo de Venturi.

Fuente: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Tubo_de_Venturi.

A partir de la ley de conservación de la masa, se puede demostrar que el flujo volumétrico en el tubo está definido por la expresión (6) [3].

$$Q = A_2 A_1 \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho (A_1^2 - A_2^2)}} \quad (6)$$

En dónde,

A1, es el área transversal de la tubería en su diámetro más amplio, m²

A2, es el área transversal de la tubería en su diámetro más estrecho, m²

p1, es la presión del fluido dentro de la tubería en su diámetro más amplio, m/s

p2, es la presión del fluido dentro de la tubería en su diámetro más estrecho, m/s

ρ, es la densidad del fluido, kg/m³

Q, es el caudal, m³/s

La expresión (6) permite aproximar el caudal en la tubería, conociendo las dimensiones del tubo de Venturi y la presión medida en los sensores.

Durante la readecuación del banco de pruebas, se pudo establecer el deterioro de la instrumentación original, por lo que se propone reutilizar el tubo Venturi, y, montar un nodo que automatice el proceso de adquisición y construcción de las curvas características de la bomba.

1.4. Características de trabajo de las turbinas tipo Pelton y Turgo

1.4.1 Características generales de las turbinas Pelton y Turgo

En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución, que gira alrededor de su eje de simetría. Este mecanismo lleva una o varias ruedas, rodets o rotores, provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua [4].

El estudio del movimiento del agua en las turbinas hidráulicas, emplea una nomenclatura universal que define triángulos de velocidad, a la entrada y salida del rodete. La Fig. 1.10 muestra los triángulos de velocidad en la entrada y en la salida de una turbina hidráulica.

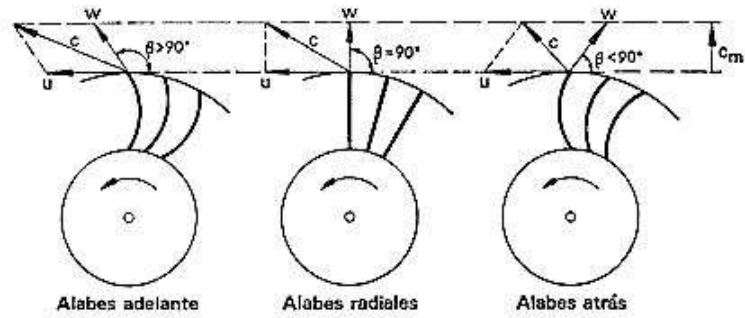


Figura 1.10 Triángulos de velocidad de una turbina hidráulica.

Fuente:

<http://www.extractores.com.mx/centrifugos.htm#sthash.mYIveXPQ.dpbs>

El triángulo de velocidad a la entrada de una turbina Pelton, se expresa a través de la ecuación (7):

$$\vec{c}_1 = \vec{u}_1 + \vec{w}_1 \quad (7)$$

En dónde,

\vec{c}_1 , es la velocidad absoluta del agua a la salida del inyector, m/s

u_1 , es la velocidad tangencial a la entrada del rodete, m/s

w_1 , es la velocidad relativa del agua en la entrada, m/s

En una turbina Pelton, el ángulo formado por u_1 y w_1 , es de aproximadamente 0° ($\alpha_1 \cong 0^\circ$), y, el ángulo formado por u_1 y c_1 es de aproximadamente 180° ($\beta_1 \cong 180^\circ$), por lo que las velocidades pueden ser sumadas algebraicamente [4].

Al aplicar la ecuación de Bernoulli, entre el punto de entrada de la turbina y el punto de salida del inyector, en términos de altura, se obtiene la expresión (8):

$$H = \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + H_{rE-1} \quad (8)$$

En dónde,

g , es la aceleración de la gravedad, 9.8 m/s^2 .

H_{rE-1} , es la pérdida de carga por rozamiento, mca

c_1 , es la velocidad absoluta del agua a la salida inyector, m/s

H , es la carga total antes del inyector, mca

A partir de esta expresión, se puede encontrar una fórmula para la velocidad absoluta del agua a la salida del inyector, a través del rendimiento de la tubería forzada, tal como se muestra en (9):

$$c_1 = \sqrt{\eta_{iny}} \sqrt{2 * g * H} \quad (9)$$

Al término $\sqrt{\eta_{iny}}$ se conoce como factor de velocidad absoluta de entrada C1, por lo que (9) puede reescribirse como (10):

$$c_1 = C_1 \sqrt{2 * g * H} \quad (10)$$

En las turbinas Pelton y Turgo, la dirección y sentido del vector c_1 coinciden con las del vector u_1 [5]. El vector u_1 se define en función del diámetro del rodete a través de la expresión (11):

$$u = u_1 = u_2 = \frac{\pi * D * n}{60} \quad (11)$$

En dónde,

u , es la velocidad tangencial del rodete, rad/s

D , es el diámetro del rodete, m

n , es el número de revoluciones del rodete, rpm

El triángulo de velocidades en la salida de una turbina tipo Pelton, tiene la forma mostrada en (12) (ver Fig.1.11):

$$\vec{c}_2 = \vec{w}_2 + \vec{u} \quad (12)$$

En dónde,

\vec{c}_2 , es la velocidad del agua a la salida del rodete, m/s

u_2 , es la velocidad tangencial a la salida del rodete, m/s

w_2 , es la velocidad relativa del agua en la salida, m/s

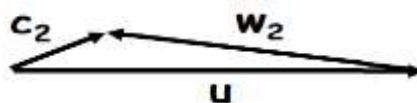


Figura 1.11 Triángulo de velocidad a la salida del rodete.

Fuente:

<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/turbinas/turbinas.html>.

Ante la ausencia de pérdidas de energía por rozamiento en la cuchara, w_2 es igual a w_1 [6]. Al resolver el triángulo de velocidades a la salida de la turbina, se obtiene (13):

$$c_2 * \cos \alpha_2 = u - w_2 * \cos \beta_2 \quad (13)$$

En dónde,

β_2 , es el ángulo formado por u y w_2 .

α_2 , es el ángulo formado por u y c_2 .

Para una turbina concreta: β_2 es constante ya que depende del diseño de la cuchara; c_1 es prácticamente independiente de la carga; y, u está determinada por la velocidad de giro del rodete n y por el diámetro del rodete. Por lo tanto, el triángulo de salida en las turbinas Pelton y Turgo no depende de la carga [6].

1.4.2 Construcción de las curvas características de las turbinas tipo Pelton y Turgo

En la bibliografía se identifica 4 curvas características de las turbinas Pelton y Turgo: rendimiento hidráulico (η_H) vs la razón entre la velocidad tangencial del rodete y la velocidad absoluta a la salida del distribuidor (u/c_1), potencia de entrada (PE) vs caudal (Q), potencia al freno (PT) vs número de revoluciones por minuto de la turbina (n), y, rendimiento global de la turbina (η_T) vs caudal (Q).

1.4.2.1 Construcción de la curva η_H vs u/c_1

El rendimiento hidráulico de una turbina está dado por la relación entre la altura de propulsión (H_t) y la carga del fluido (H):

$$\eta_h = \frac{H_t}{H} = 2 * (1 + \cos \beta_2) * \frac{u}{c_1} * \left(1 - \frac{u}{c_1}\right) \quad (14)$$

Por su parte, la altura de propulsión de las turbinas tipo Pelton y Turgo, expresada en unidades de altura de fluido mca, se determina en la expresión (15):

$$H_t = \frac{u}{g} * (c_1 - u) * (1 + \cos \beta_2) \quad (15)$$

La gráfica de rendimiento hidráulico de una turbina, tiene la forma de una campana de Gauss, registrando el máximo rendimiento para la relación $u/c_1 = 0.5$ [6] (Fig. 1.12).

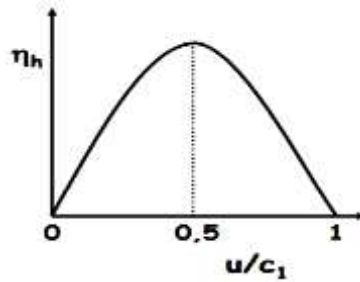


Figura 1.12 Curva de rendimiento hidráulico en función de u/c_1 .

Fuente:

http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf.

1.4.2.2 Construcción de la curva P_E vs Q

Se denomina potencia de entrada a la potencia del flujo a la entrada de la turbina. Es la potencia disponible en el fluido para transferir a la turbomáquina (ver expresión 16) [6].

$$P_E = \rho * g * Q * H \quad (16)$$

1.4.2.3 Construcción de la curva P_T vs n

La potencia al freno corresponde a la potencia exterior al eje [7]. Originalmente, en el banco de pruebas Armfield, se determinaba la potencia al freno mediante un freno Prony, el mismo que se encuentra en óptimas condiciones para su reutilización en la rehabilitación del stand. En este contexto, la expresión (17) se utilizará para la construcción de la curva.

$$P_T = F * r * n \quad (17)$$

En dónde,

P_T , es la potencia al freno, W

F , es la fuerza ejercida por la correa del freno, N

r , es la distancia desde el eje de la turbina a la correa de freno, m

1.4.2.4 Rendimiento global de la turbina

El rendimiento global de la turbina es directamente proporcional a la potencia al freno, e indirectamente proporcional a la potencia de entrada:

$$\eta = \frac{P_e}{P_E} = \frac{M * \omega}{\rho * g * Q * H} \quad (18)$$

En dónde,

ω , es la velocidad angular del rodete, rad/s.

Una vez que la turbina Pelton está diseñada, opera siempre a la misma velocidad angular constante y sincrónica, por lo que n y u se mantienen constantes. En estas condiciones, el comportamiento del rendimiento se estudia en función del caudal incidente en el rodete, dado que la variación de demanda de energía eléctrica exigirá modificar el caudal [7] (ver Fig.1.13).

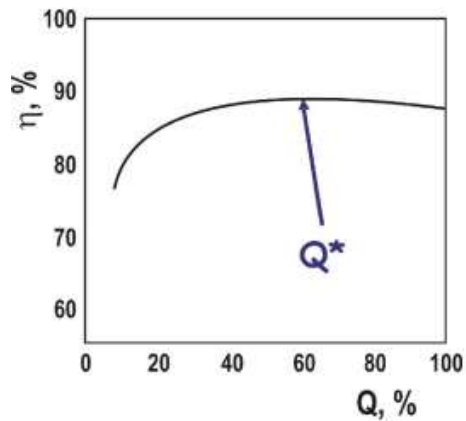


Figura 1.13 Rendimiento total de la turbina en función del caudal.

Fuente:

http://cvb.ehu.es/open_course_ware/castellano/tecnicas/maquinas_fluidos/tema-6-turbinas-pelton.pdf.

. INSTRUMENTACIÓN PARA EL ESTUDIO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

2.1. Introducción

Como parte del proceso de rehabilitación del banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas, ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil de la UTPL, se decidió reemplazar la instrumentación inoperativa.

En este documento se describe la selección de instrumentación requerida, compatible con el diseño del banco de pruebas en términos de rango de medición, acople mecánico, y, salida en voltaje o corriente.

2.2. Requerimientos generales sobre la instrumentación

Originalmente, en el banco de pruebas Armfield (ver Fig.2.1) existía instrumentación analógica suficiente para apoyar en la construcción de las curvas características de las bombas centrífugas. La instrumentación original, a excepción del tubo de Venturi, ha perdido su capacidad de trabajo, razón por la cual se ha propuesto reemplazarla, observando, en lo posible, la compatibilidad con el banco en cuanto a rango de medición, acople mecánico, y, salida en voltaje o corriente.

El rango de medición se aproximará en función del rango de los visualizadores, mientras que el acople mecánico en los nodos de medición conservará el diámetro original de 0,5 pulgadas. Por otra parte, con la intención de reducir los costos de implementación se decidió recomendar la utilización de sensores con salidas en voltaje.



Figura 2.1 Banco de pruebas Armfield.

Fuente: Centrifugal Pump Test.

2.3. Instrumentación de la curva H vs Q

2.3.1 Medición de la altura manométrica (H)

Se conoce como altura manométrica de una bomba, al incremento de energía adquirida por 1 kg de líquido, entre la sección de entrada y de salida de la bomba [9]. Otra acepción se refiere a la altura, presión diferencial, o, resistencia, que tiene que vencer la bomba centrífuga para lograr que el líquido llegue a su destino [10]. Normalmente, la altura manométrica se mide en metros por columna de agua (mca).

La altura manométrica se aproxima a través de la expresión (19), (ver Fig.2.2).

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} \quad (19)$$

En dónde,

H, es la altura manométrica, mca

P_d, es la presión en la brida de impulsión, mca

P_s, es la presión en la brida de aspiración, mca

γ, es el peso específico del fluido, kgf/m³

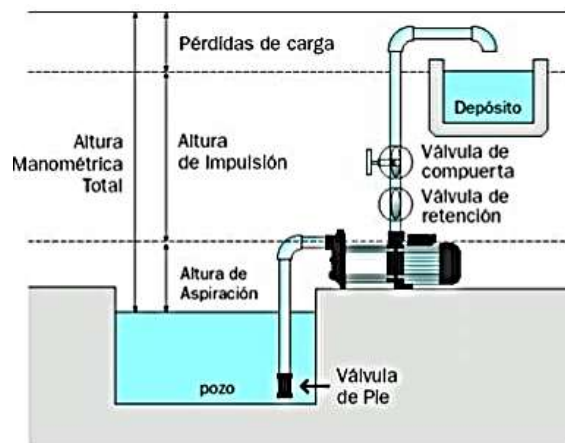


Figura 2.2 Altura manométrica de una bomba centrífuga.

Fuente: http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%207.%20Bombas/tutorial_02.htm

Originalmente, la presión en la brida de aspiración se obtenía a través de un vacuómetro operando en el rango de 0 a -5 mca. En este proyecto se decidió reemplazar el vacuómetro por sensores de presión de vacío calibrados en psi, muy frecuentes en el mercado. Para

conversión, se utilizará la razón de transformación 1 mca/ 1,422 psi [12]. La búsqueda bibliográfica permitió identificar al menos 2 sensores de presión de vacío utilizables: con célula cerámica de medición IFM (ver Tabla 2.1), y, de presión de vacío PX409 de Omega (ver Tabla 2.2). La salida de voltaje del segundo sensor influyó en que la decisión final recayera sobre él.

Tabla 2.1 Características técnicas del sensor de presión de vacío con célula cerámica de medición IFM.

Salida	0 a 4 mA
Rango de medición	0 a -15 psi
Requerimientos de alimentación	5 a 10V, 2mA
Puerto	½" NPT macho
Resolución	0,1 psi

Fuente: <http://www.heattracing.co.uk/upload/ifm-PA3029-Pressure-Transmitter-Pressure-Sensor-Highly-Stable-Pressure-Transmitter-High-Accuracy-Pressure-Transmitter-ifm-PA3029.pdf>

Tabla 2.2 Características principales del sensor PX409.

Salida	0 a 10 mV
Rango de medición	0 a -15psi
Requerimientos de alimentación	5 a 10V, 2mA
Puerto	½" NPT macho
Resolución	0,1 psi

Fuente: http://www.omega.com/pptst/PX409_VAC.html

La presión en la brida de impulsión es una presión manométrica. Originalmente, esta variable se obtenía por medio de un manómetro analógico, operando en el rango de 0 a 25 mca. Para el proyecto, se decidió adquirir un sensor de presión manométrica. La búsqueda bibliográfica permitió identificar al menos 2 opciones de sensores utilizables: el sensor PX309 de Omega (ver Tabla 2.3), y, el sensor SCX15DNC de WIKA (ver Tabla 2.4). Considerando la baja resolución requerida y el bajo costo, se decidió utilizar la primera opción.

Tabla 2.3 Características principales de los sensores de la gama PX3X9.

Salida	0 a 5 V
Rango de medición	0 a 50 psi
Requerimientos de alimentación	9 a 30Vdc, 2mA
Puerto	½" NPT macho
Resolución	0,25 PSI

Fuente: <http://www.omega.com/pptst/PX309-100mv.html>

Tabla 2.4 Características principales del sensor WIKA de la serie SCX15DNC.

Salida	0 a 5 V,
Rango de medición	0 a 50 psi
Requerimientos de alimentación	5 a 10Vdc, 2mA
Puerto	½" DIN
Resolución	0,1 PSI

Fuente:
<http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/000/SCX15DNC-pdf.php>

Salvo excepciones expresas, el peso específico del agua se considerará de 1000 Kgf/m³ [17].

2.3.2 Medición del caudal (Q)

Se conoce como caudal a la cantidad de una determinada sustancia que, pasa por un lugar establecido durante un periodo de tiempo dado [18]. Normalmente, el caudal se mide en m³/s.

En el banco de pruebas Armfield, para medir el caudal se utiliza un tubo de Venturi, dispositivo capaz de originar una pérdida de presión cuando es atravesado por un fluido. En esencia, un tubo de Venturi consta de una tubería recta corta (garganta) entre dos tramos cónicos. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha, de tal forma que al colocar un manómetro en la garganta, se mide la caída de presión [19]. Entonces, el caudal se aproxima por medio de la expresión (6):

En este proyecto, se propuso medir la diferencia de presión en el tubo, por medio de un sensor de presión diferencial, cuyo rango de medición se aproximará al rango del manómetro analógico conectado en la brida de impulsión originalmente. La búsqueda bibliográfica identificó 2 posibles opciones: el sensor PX137-015DV de Omega (ver Tabla 2.5), y, el sensor SDP1108 de SENSIRION (ver Tabla 2.6). Considerando el rango del sensor y su menor costo, se decidió utilizar el primer sensor.

Tabla 2.5 Características principales del sensor PX137-015DV.

Salida	0 a 5 V
Rango de medición	0 a 15 psi
Requerimientos de alimentación	9 a 30Vdc, 2mA
Resolución	0,25 PSI

Fuente: <http://www.omega.com/pptst/PX137.html>

Tabla 2.6 Características principales del sensor SDP1108.

Salida	0 a 4 V
Rango de medición	0 a 25 psi
Requerimientos de alimentación	12 Vcc, max 16 Vcc
Resolución	0,25 PSI

Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/sensirion/sensores-presion-diferencial-salida-analogica-15453-492931.html>

Por cuanto se reutilizará el tubo de Venturi existente, se determinó los valores de A_1 y A_2 , en 0,031 y 0,015 m², respectivamente

2.4. Instrumentación de la curva P_H vs Q

Se conoce como potencia hidráulica, a la potencia que la bomba centrífuga transmite al fluido [20]. Normalmente, la potencia hidráulica se mide en W.

La potencia hidráulica se aproxima por medio de la expresión (3). Considerando el peso específico del agua y la altura constantes, la potencia hidráulica se representa como función del caudal (ver Fig.2.3).

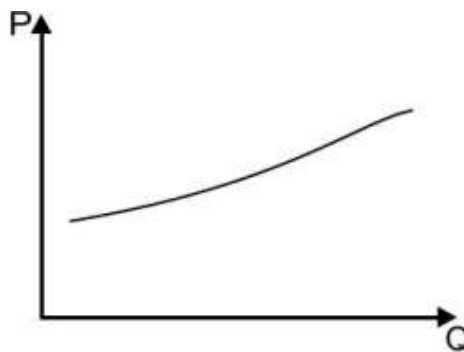


Figura 2.3 Potencia hidráulica del sistema en función del caudal.

Fuente:

<http://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-i/>.

2.5. Instrumentación de la curva de rendimiento

Se denomina rendimiento de una bomba centrífuga, al cociente entre la potencia eléctrica total suministrada y la potencia hidráulica, tal como lo muestran las expresiones (4) y (5) [21]. La Fig.2.4 muestra la representación gráfica de la curva.

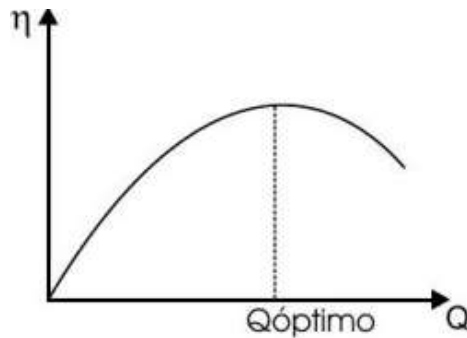


Figura 2.4 Eficiencia del sistema en función del caudal.

Fuente: <http://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-i/>.

Originalmente, en el banco de pruebas Armfield la potencia eléctrica se determinaba a través de la expresión (21):

$$P = T * n \quad (21)$$

En dónde,

T, es el torque o par resistente a la bomba, N*m

n, es la velocidad de rotación de la bomba, rev/min

Actualmente, debido al cambio del motor de la bomba centrifuga, el brazo para medir el torque está fuera de servicio, por lo que se requiere determinar la potencia eléctrica total suministrada, por medio de la expresión (2):

Recientemente, en el banco de pruebas se instaló un motor trifásico SIEMENS tipo 1LA7 083-2YA60 (ver Fig. 2.5), conectado a la red eléctrica de 220V, mediante una conexión Y-Y (ver Fig. 2.6). Las características técnicas del motor, se presentan en la Tabla 2.7.



Figura 2.5 Motor Trifásico SIEMENS 1LA7 083-2YA60.

Fuente: Fotografía realizada por el autor.

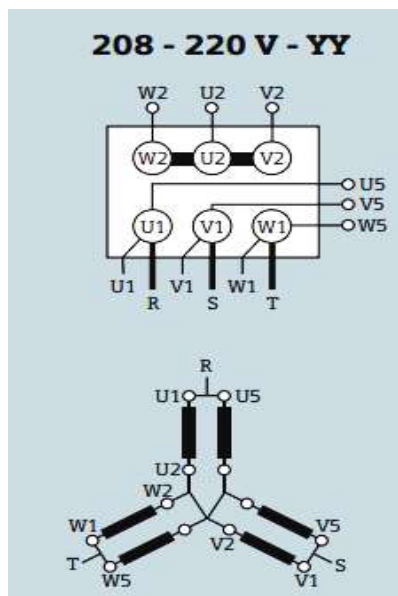


Figura 2.6 Conexión Y-Y de un motor trifásico.

Fuente:

http://prof.usb.ve/jaller/Guia_Maq_pdf/cat_motores_ind.pdf.

Tabla 2.7 Características técnicas del motor SIEMENS 1LA7 083-2YA60.

Marca	SIEMENS
Modelo	1LA7 083-2YA60
Número de fases	3
Potencia	2.0 HP
Temperatura de funcionamiento	-15/40°C
Tipos de conexión	220 YY / 440 Y V 6.2 / 3.1 A
Frecuencia	60 Hz
Rendimiento	73.4
Factor de Potencia	0.86
Peso	10 Kg
Revoluciones por minuto	3410 rpm

Fuente: Datos de placa

Como voltaje de operación de la bomba se adoptará el voltaje del motor accionante. Para registrar la corriente se empleará un resistor tipo shunt, conectado en serie en una de la fases (ver Fig.2.7). Y, como factor de potencia se tomará el $\cos(\phi)$ de placa.

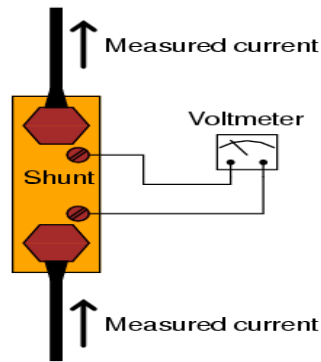


Figura 2.7 Conexión de un resistor tipo shunt para registro de la corriente en una de las fases.

Fuente:
<http://www.amperis.com/productos/ohmímetros/>.

2.6. Presupuesto

La Tabla 2.8 resume la inversión requerida para la instrumentación.

Tabla 2.8 Presupuesto para la instrumentación de la bomba centrífuga.

Nombre	Detalle	Valor en USA	Valor en Ecuador
PX409-015VV	Sensor de presión de vacío	\$ 550,00	\$ 730,00
PX309-100mv	Sensor de presión manométrica	\$ 175,00	\$ 255,50
PX137-015DV	Sensor de presión diferencial	\$ 175,00	\$ 135,80
Resistencia SHUNT	Resistencia		\$ 25,00
SUBTOTAL			\$ 1146,30
IVA 12%			\$ 134,56
TOTAL			\$ 1280,86

Fuente: Diseño de los autores

. INSTRUMENTACIÓN PARA EL ESTUDIO DE TURBINAS TIPO PELTON Y TURGO

3.1 Introducción

Como parte del proceso de rehabilitación del banco de pruebas Armfield, ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil de la UTPL, se propuso adecuar el banco para permitir el estudio de turbinas tipo Pelton y Turgo.

En este documento, se describe la selección de la instrumentación requerida para la obtención de data que posibilite la construcción de las curvas características de las turbinas estudiadas, instrumentación que deberá ser compatible con el diseño del banco de pruebas en términos de acople mecánico, y, salida en voltaje o corriente.

3.2 Una breve referencia sobre las turbinas hidráulicas

Una turbina hidráulica es una turbo máquina motora, que se identifica con una bomba roto-dinámica que trabaja a la inversa. Mientras que una bomba absorbe energía mecánica y restituye energía al fluido, una turbina absorbe energía del fluido y restituye energía mecánica [22].

Una turbina hidráulica se compone de tres elementos: el distribuidor, el rodete, y, el difusor (ver Fig. 3.1). El distribuidor y el difusor, conforman el estator de la máquina y por lo tanto son elementos inmóviles. En determinadas turbinas, estos elementos pueden no existir. El distribuidor tiene como misión dirigir el agua, desde la entrada de la máquina hacia la entrada del rodete, distribuyendo el agua alrededor de éste. El distribuidor regula el agua que entra en la turbina, desde un valor nulo hasta un valor máximo de caudal. En el distribuidor, la energía de presión del agua se transforma en energía de velocidad [23].

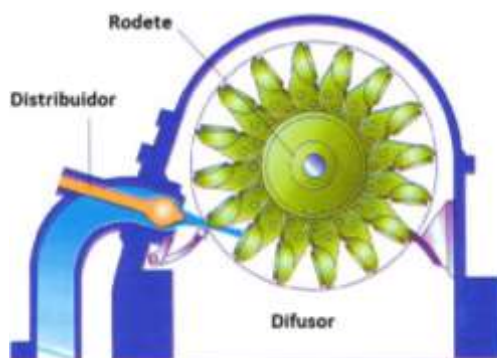


Figura 3.1 Esquema general de una turbina hidráulica.

Fuente:<http://ucvvirtual.edu.pe/campus/HDVirtual/700439399/TURBINAS%20HIDRAULICAS/7000000269/Ejemplo%20de%20calculo%20de%20Turb%20Pelton%20ecuaciones.pdf>.

El difusor o tubo de aspiración, es un conducto por el que se evacúa el agua de la máquina. Generalmente, el difusor tiene un ensanchamiento progresivo, recto o acodado,

que sale del rodete y que conduce el agua hasta el canal de fuga, permitiendo recuperar parte de la energía cinética a la salida del rodete. Si por razones de explotación, el rodete está instalado a cierta altura por encima del canal de fuga, un simple difusor cilíndrico permite la recuperación de energía. Si la turbina no posee tubo de aspiración, se llama de escape libre [24].

El rodete es el elemento esencial de la turbina. El rodete está provisto de álabes, en los que se produce el intercambio de energía entre el agua y la máquina.

El estudio del movimiento del agua en las turbinas hidráulicas, emplea una nomenclatura universal que define triángulos de velocidad, a la entrada y salida del rodete. La Fig. 3.2 muestra los triángulos de velocidad en la entrada y en la salida de una turbina hidráulica. En la gráfica, U corresponde a la velocidad tangencial, C corresponde a la velocidad absoluta, y, W corresponde a la velocidad relativa del agua respecto del rodete. Los numerales 1 y 2, se emplean para distinguir los valores de las variables, a la entrada y salida del rodete.

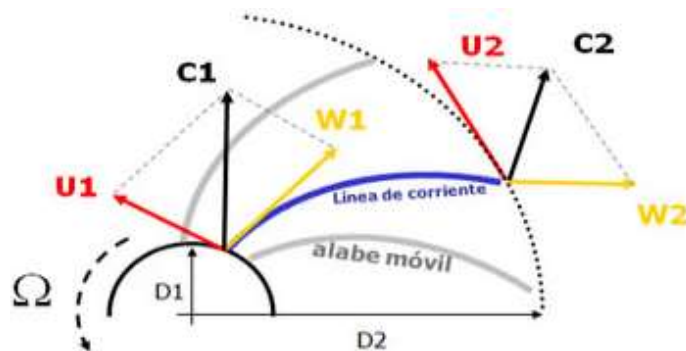


Figura 3.2 Triángulos de velocidad de una turbina hidráulica.

Fuente:

<http://www.extractores.com.mx/centrifugos.htm#sthash.mYlveXPQ.dpbs>.

3.3 Selección de la instrumentación

3.3.1 Requerimientos generales para la instrumentación

En el banco de pruebas, la tubería que conduce al tanque de afore tiene en su camino, una campana en la que se coloca una turbina. La carga del banco se complementa con un freno Prony (ver Fig.3.3). Luego de la rehabilitación, se dispone de 3 turbinas, una Pelton y 2 Turgo, de 0,30m de diámetro.



Figura 3.3 Banco de pruebas Armfield adecuado para el estudio de turbinas tipo Pelton y Turgo.

Fuente: Fotografía realizada por los autores.

3.3.2 Instrumentación de la curva η_H vs u/c_1

El rendimiento hidráulico es una característica de desempeño que se describe como la razón entre la altura de propulsión en el distribuidor, y la carga del fluido o altura manométrica a la entrada del distribuidor [25]. Normalmente, se expresa en tanto por ciento (%).

Como se muestra en la expresión (14), para respaldar la construcción de la curva de rendimiento hidráulico, es necesario adquirir 2 variables: velocidad absoluta a la entrada del rodete (c_1) y velocidad tangencial del rodete (u).

El factor β_2 es una constante de diseño de la cuchara de la turbina, y su valor es de aproximadamente 180° . Para turbinas Pelton y Turgo reales, el factor se estima en 170° .

3.3.2.1 Registro de la velocidad absoluta a la entrada del rodete (c_1)

Si se estima que las pérdidas son mínimas en la tubería que conecta la brida de impulsión de la bomba centrífuga con el distribuidor de la turbina, entonces se puede utilizar el valor mostrado por el sensor de presión manométrica colocado en la brida de impulsión de la bomba, para reemplazar el valor de H en la expresión (10). El factor de velocidad absoluta se considerará de 0.98.

3.3.2.2 Registro de la velocidad tangencial del rodete (u)

La velocidad tangencial del rodete se mide en m/s, y se aproxima por medio de la expresión (11).

En capítulo anterior se justificó que, para calcular la velocidad tangencial del rodete (u) se necesita: determinar el diámetro de la turbina (D) y el número de revoluciones por minuto (n). Las tres turbinas con las que cuenta el stand tienen un diámetro de 0,30m.

Para registrar la velocidad de rotación de la turbina, se propuso utilizar un módulo de medición de doble velocidad tipo HC-020K (ver Fig.3.4 y Tabla 3.1), acoplado al eje de la turbina.

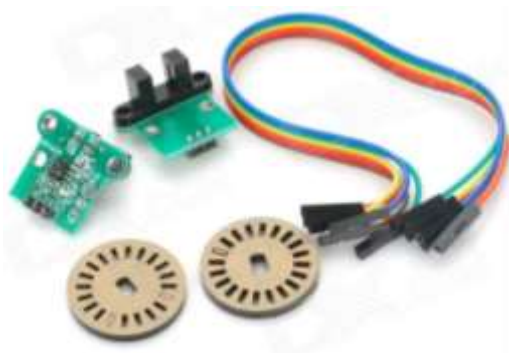


Figura 3.4 Módulo de velocidad HC-020K.

Fuente: http://www.dx.com/es/p/hc-020k-double-speed-measuring-module-w-photoelectric-encoders-black-green-2-pcs-219416#.U_x-No1RXX8.

Tabla 3.1 Características del módulo de medición.

Modelo	HC-020K
Material	FR4
Características	Alta resolución, tiempo de respuesta corto, salida de conmutación.
Voltaje de funcionamiento	4.5 a 5.5
Salida de señal	A, B dos líneas
Resolución	0,01mm
Frecuencia de medición	100KHz
Diámetro del disco	24 mm
Resolución del codificador	20 líneas

Fuente: http://www.dx.com/es/p/hc-020k-double-speed-measuring-module-w-photoelectric-encoders-black-green-2-pcs-219416#.U_x-No1RXX8

3.3.3 Instrumentación de la curva P_H vs Q

Para registrar la potencia de entrada en el banco, se requiere registrar las variables H y Q . Tal como se describió antes, el valor H se obtiene por medio de un sensor de presión manométrica colocado en la brida de impulsión de la bomba. El valor Q es constante en todo el sistema, por lo que se aproxima en función del registro del tubo de Venturi.

Salvo expresas excepciones, la densidad del fluido se considerará de 1000 kg/m^3 .

3.3.4 Instrumentación de la curva P_T vs n

La potencia exterior al eje corresponde a la fuerza que debe emplear un freno para detener la turbina. Normalmente se mide en HP.

El freno Prony existente en el banco (ver Fig.3.5) facilita la medición de la potencia al freno de la turbina. El freno Prony es un dispositivo compuesto por un freno mecánico y un dinamómetro, que mide el par de torsión producido. La medición se realiza envolviendo un cordón o correa alrededor del eje de salida de la turbina. La fricción se incrementa apretando el cinturón, hasta que se reduzca la frecuencia de rotación del eje.



Figura 3.5 Freno Prony instalado en el banco de pruebas Armfield.

Fuente: fotografía realizada por los autores.

3.3.5 Instrumentación de la curva η_T vs Q

El rendimiento global de la turbina es directamente proporcional a la potencia al freno, e inversamente proporcional a la potencia de entrada. El rendimiento global se mide en tanto por ciento (%).

En el marco de este proyecto, el caudal del sistema se regulará utilizando la válvula de aforo. La Fig. 3.6 muestra una gráfica típica del rendimiento global de la turbina en función del caudal.

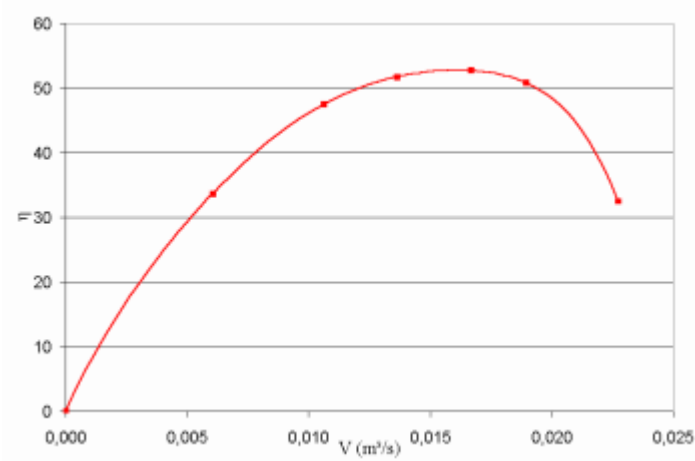


Figura 3.6 Gráfica del rendimiento de una turbina.

Fuente: http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%207.%20Bombas/tutorial_07.htm.

3.4 Inversión requerida

En función de que la mayor parte de instrumentación requerida ya fue presupuestada en la fase de rehabilitación del banco de pruebas, la inversión requerida para esta etapa incluye exclusivamente la compra del módulo de velocidad HC 020K, que en el mercado local alcanza un valor de USD 40.

. INGENIERÍA DE DETALLE DE LA ETAPA DE INSTRUMENTACIÓN

4.1 Introducción

Como parte del proceso de rehabilitación del banco de pruebas Armfield, ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil de la UTPL, se propuso instalar instrumentación suficiente para el estudio de bombas centrífugas, y, turbinas Pelton y Turgo.

En este documento se describe los resultados obtenidos en la etapa de ingeniería de detalle de la instalación de la instrumentación requerida, incluyendo esquemas eléctricos, electrónicos y mecánicos.

4.2 Sobre la instrumentación suficiente para el estudio de bombas centrífugas

El banco de pruebas Armfield rehabilitado, cuenta con la instrumentación suficiente para respaldar la construcción de las curvas características de las bombas centrífugas: altura manométrica (H) en función del caudal (Q), potencia eléctrica consumida (P) en función del caudal, y, rendimiento global de la bomba centrífuga (η) en función del caudal.

4.2.1 Construcción de la curva H vs Q

En la investigación se determinó que, para obtener los datos suficientes para la construcción de la curva H vs Q , se necesita adquirir tres variables: presión en la brida de impulsión (P_d), presión en la brida de aspiración (P_s), y presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$. El formato de adquisición de esas variables se detalla en la Tabla 4.1

Tabla 2 Formato de adquisición de datos para la construcción de la curva H vs Q .

Variable	P_d	P_s	$P_{Venturi}$
Unidad	psi	psi	psi
Rango de medición	0 a 15 psi	0 a -5 psi	0 a 15 psi
Resolución	0,5 psi	0,5 psi	0,5 psi

Fuente: Diseño de autores

En la etapa de selección de la instrumentación, se decidió registrar la variable P_d por medio del sensor PX309, la variable P_s con el sensor PX409 y, la variable $P_{Venturi}$ con el sensor PX137-015DV. La Tabla 4.2 muestra las características técnicas principales de los sensores seleccionados.

Tabla 3 Características técnicas principales de los sensores PX309, PX409 y PX137-015DV de OMEGA.

Sensor	PX309	PX409	PX137-015DV
Salida	0 a 5 V	0 a 10 mV	0 a 5 V
Rango de medición	0 a 50 psi	0 a -15psi	0 a 15 psi
Requerimientos de alimentación	10 Vdc, 2mA	5 a 10V, 2mA	9 a 30Vdc, 2mA
Puerto	1/2" NPT macho	1/2" NPT macho	
Resolución	0,25 psi	0,1 psi	0,25 psi

Fuente: Diseño de autores

Los sensores se instalarán en la tubería del banco de pruebas, empleando el acople mecánico existente utilizado originalmente para instrumentación analógica. La Fig.4.1 muestra el esquema de ubicación de los sensores.

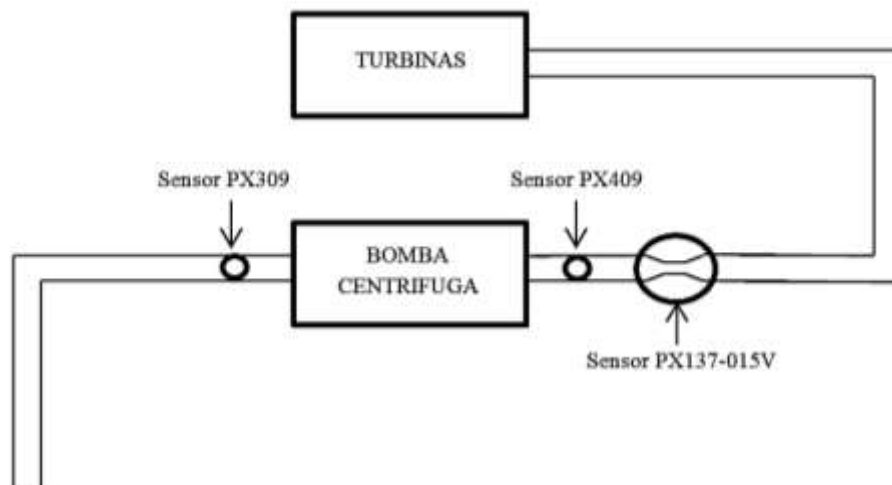


Figura 4.1 Esquema de ubicación de los sensores PX309, PX409 y PX137-015DV, en el banco de prueba

Fuente: Gráfico elaborado por los autores

La lectura de cada uno de los sensores, será enviada a una tarjeta Arduino Mega 2560, sobre la cual se montará el nodo de procesamiento

4.2.2 Construcción de la curva P_H vs Q

La data suficiente para la construcción de la curva P_H vs Q , proviene del monitoreo de 3 variables: presión en la brida de impulsión (P_d), presión en la brida de aspiración (P_s), y presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$.

En el apartado anterior se explicó los detalles de la instalación de la instrumentación para adquirir la data relacionada a estas variables.

4.2.3 Construcción de la curva η vs Q

Las variables necesarias para la construcción de la curva de rendimiento, son 4: presión en la brida de impulsión (P_d), presión en la brida de aspiración (P_s), presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$, y, la potencia eléctrica suministrada (P). Las primeras 3 variables fueron abordadas anteriormente.

En la etapa de selección de la instrumentación, se decidió que la variable potencia eléctrica suministrada se obtenga por medio de un resistor tipo shunt, conectado en serie a una de las fases del motor accionante (ver Fig. 4.2), de acuerdo a los formatos mostrados en la Tabla 4.3.

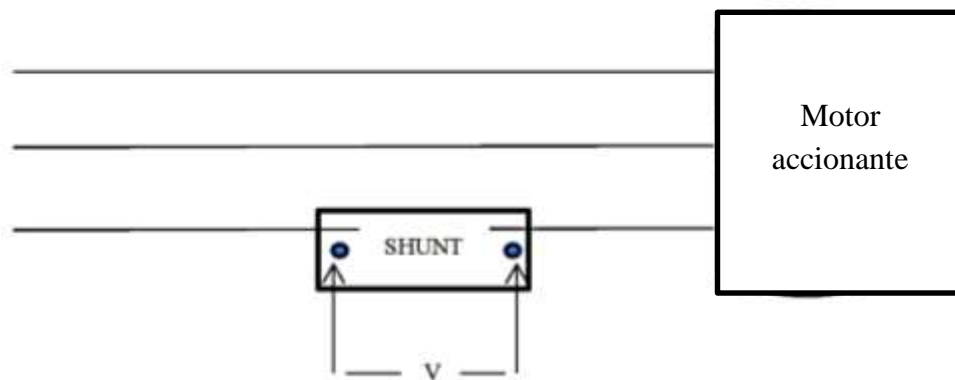


Figura 4.2 Esquema de ubicación del resistor shunt utilizado para medir la potencia eléctrica suministrada

Fuente: Gráfico elaborado por los autores.

Tabla 4 Formato de adquisición de datos de la variable potencia eléctrica suministrada

Variable	P
Unidad de manejo	W
Rango de medición	0 a 1500 W (\approx 2 HP)
Resolución	No se conoce

Fuente: Diseño de autores

La lectura de voltaje del shunt se registra manualmente, y, a través de la expresión (2) se convierte en potencia eléctrica. Como factor de potencia se considerará el valor de $\cos(\varnothing)$ en la placa del motor accionante (0,86).

4.3 Sobre la instrumentación suficiente para el estudio de turbinas tipo Pelton y Turgo

En la bibliografía, se identificó 4 curvas características de las turbinas Pelton y Turgo: rendimiento hidráulico (η_H) en función de la razón de la velocidad tangencial del rodete y de la velocidad absoluta del agua en la entrada del rodete (u/c_1), potencia de entrada (P_E) en función del caudal (Q), potencia al freno (P_T) en función del número de revoluciones por minuto del rodete (n), y, rendimiento global de la turbina (η_T) en función del caudal (Q).

4.3.1 Construcción de la curva de η_H vs u/c_1

Se determinó que, para respaldar la construcción de la curva de rendimiento hidráulico, se necesita adquirir 3 variables: presión en la brida de impulsión (P_d), presión en la brida de aspiración (P_s), y, número de revoluciones por minuto (n). Las primeras 2 variables fueron abordadas anteriormente.

En el capítulo anterior, se justificó que la variable n se adquiriera por medio de un módulo de medición de velocidad HC-020K, cuyas características técnicas se presentan en la Tabla 3.1, de acuerdo al formato mostrado en la Tabla 4.5. El módulo de velocidad se colocará junto al eje de la turbina, tal como se muestra en la Fig. 4.3.

Tabla 5 Formato de adquisición de datos de la variable velocidad del rodete n

Variable	n
Unidad de manejo	rpm
Rango de medición	0 a 500 rpm
Resolución	3 rev

Fuente: Diseño de autores

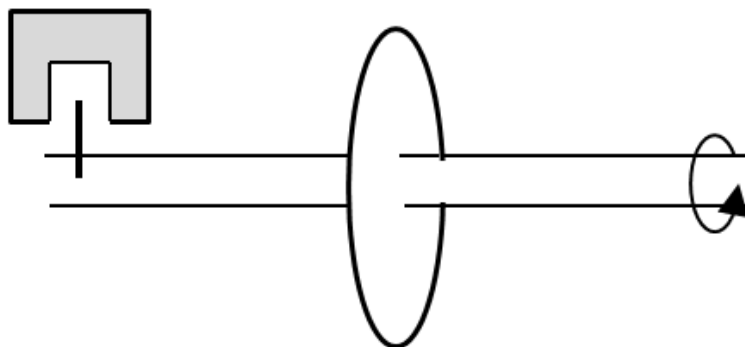


Figura 4.3 Esquema de ubicación del módulo de velocidad HC-020K

Fuente: Gráfico elaborado por los autores

La lectura del módulo de velocidad, será enviada al nodo de procesamiento montado sobre la tarjeta Arduino Mega 2560.

4.3.2 Construcción de la curva PE vs Q

Se determinó que las variables necesarias para respaldar la construcción de la curva P_E vs Q son 3: presión en la brida de impulsión (P_d), presión en la brida de aspiración (P_s) y presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$. Los detalles de la instalación de la instrumentación para adquirir la data relacionada a estas variables, han sido abordados anteriormente.

4.3.3 Construcción de la curva PT vs n

Se demostró que, las variables necesarias para la construcción de la curva par motor son 2: número de revoluciones por minuto (n), y fuerza de freno (F).

En el capítulo anterior se justificó la reutilización del freno Prony, existente en el banco de pruebas Armfield, para el registro de la fuerza de freno (ver Fig.4.4), y, la utilización del formato de adquisición de datos de la variable F como el descrito en la Tabla 4.6.



Figura 4.4 Freno Prony instalado en el banco de pruebas Armfield

Fuente: Fotografía realizada por los autores

Tabla 6 Formato de adquisición de datos de la variable fuerza del freno F .

Variable	F
Unidad de manejo	N
Rango de medición	0-20 N
Resolución	0,5 N

Fuente: Diseño de autores

La lectura del dinamómetro integrado en el freno Prony, se registra manualmente, y, a través de la expresión (17) se convierte en potencia de freno.

La distancia desde el eje de la turbina al freno (r) es igual al radio de la circunferencia adaptada a la correa de freno, en este caso 0,1 m.

4.3.4 Construcción de la curva η_T vs Q

Se determinó que para construir la curva de rendimiento de la turbina se necesita adquirir 5 variables: presión en la brida de impulsión (P_d), presión en la brida de aspiración (P_s), presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$, número de revoluciones por minuto (n), y, fuerza de freno (F). Los detalles de la instalación de la instrumentación para adquirir la data relacionada a estas variables, han sido abordados anteriormente.

4.4 Detalles generales de la instalación de la instrumentación

4.4.1 Sobre la fuente de voltaje regulado

De acuerdo a la bibliografía, se requiere de una fuente de voltaje regulado de corriente directa para alimentación de los sensores a utilizar (ver Fig.4.5). La fuente a implementar tendrá una relación de transformación de 220/15, con una corriente máxima de 500 mA. Como regulador de voltaje se empleará un integrado 7810.

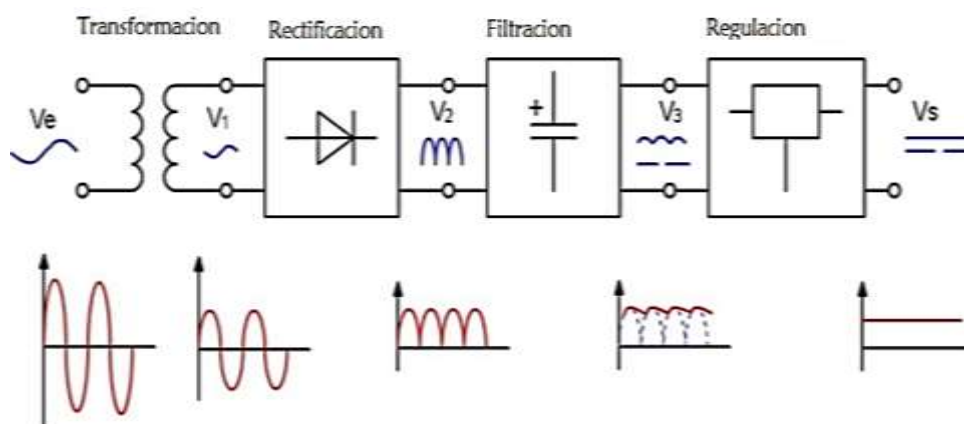


Figura 4.5 Arquitectura de la fuente de voltaje regulado requerida para alimentar a los sensores a instalar en el banco de pruebas.

Fuente: <http://mantenimientoali.weebly.com/fuente-de-poder.html>

4.4.2 Sobre la conexión de los sensores

El sensor PX309 (ver Fig.4.6) se conecta de acuerdo al detalle de pines mostrado en la Tabla 4.7. Para la transmisión de información, la bibliografía [25] recomienda la utilización de cable UTP con una extensión máxima de 1,5m.

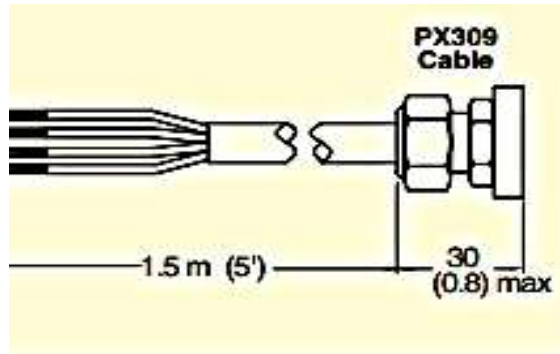


Figura 4.6 Sensor de presión manométrica PX309

Fuente: <http://www.omega.com/pptst/PX309-100mv.html>

Tabla 7 Pines de conexión del sensor PX309

Pines	Cable
Alimentación(+)	Rojo
Salida(+)	Blanco
Salida(-)	Verde
Alimentación(-)	Negro

Fuente: <http://www.omega.com/pptst/PX309-100mv.html>

El sensor PX409 (ver Fig.4.7) se conecta de acuerdo al detalle de pines mostrado en la Tabla 4.8.

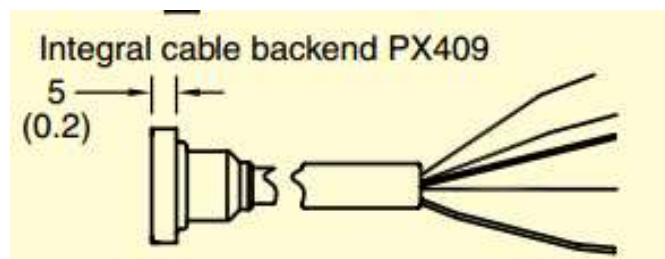


Figura 4. 7 Sensor de presión de vacío PX409

Fuente: http://www.omega.com/pptst/PX409_VAC.html

Tabla 8 Pines de conexión sensor PX409

Pines	Cable
Alimentación(+)	Rojo
Salida(+)	Blanco
Salida(-)	Verde
Alimentación(-)	Negro

Fuente:

http://www.omega.com/pptst/PX409_VAC.html

El sensor PX137-015DV se conecta de acuerdo al detalle de pines mostrado en la Fig.4.8

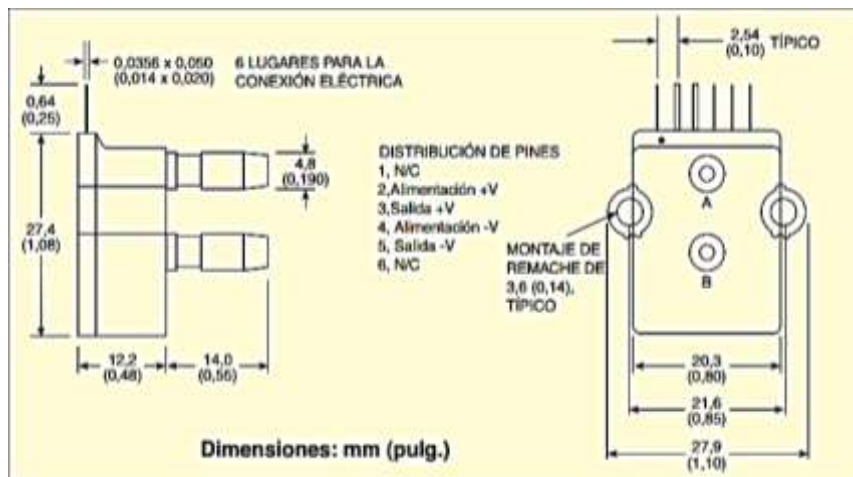


Figura 4.8 Sensor PX137-015DV

Fuente: <http://www.omega.com/pptst/PX137.html>

El módulo de velocidad HC-020K fue diseñado para trabajar con Arduino [26]. Su conexión se realiza por medio de cable UTP categoría 5 integrado, con una extensión de 20 cm como se presenta en la Fig.4.9.

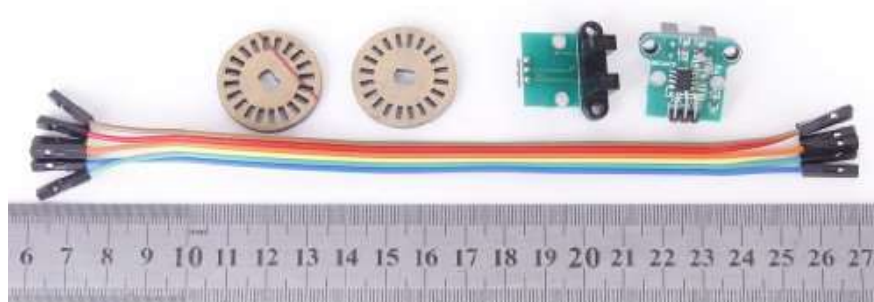


Figura 4.9 Módulo de velocidad HC-020K

Fuente: http://www.dx.com/es/p/hc-020k-double-speed-measuring-module-w-photoelectric-encoders-black-green-2-pcs-219416#.U_x-No1RXX8

4.4.3 Sobre el nodo de procesamiento de datos

El nodo de procesamiento de datos se montará sobre un Arduino Mega 2560 [26], cuyas características se presentan en la Tabla 4.9. Para la programación del nodo se utilizará los recursos de IDE de Arduino [27]. La Tabla 4.10 detalla las variables que se procesarán en el nodo.

Tabla 9 Características del Arduino Mega 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje operativo	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Pines digitales Entrada/Salida	54 15 proveen salida PWM
Pines análogos de entrada	16
Corriente DC por cada Pin in/out	40 mA
Memoria Flash	256 KB
SRAM	8 KB
Clock Speed	16 MHz

Fuente: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>

Tabla 10 Detalle de variables a considerar en el nodo de procesamiento.

Variables principales	Variables secundarias	Tipo	Procesamiento
H	P_d P_s	Analógica	Arduino Mega2560
Q	$P_{Venturi}$	Analógica	Arduino Mega2560
P	-	Analógica	Manual
n	-	Digital	Arduino Mega2560
P_T	F	Analógica	Manual

Fuente: Diseño de autores

4.5 Algoritmos para el cálculo de parámetros y construcción de curvas características

4.5.1 Cálculo de la altura manométrica

Para calcular el valor de la variable H, la presión en la brida de impulsión p_d , medida por el sensor PX309, se envía al pin A0 del Arduino. La presión en la brida de aspiración P_s , registrada por el sensor PX409, se envía a través de un acondicionador de señal no inversor [28] (con una ganancia de 500) al pin A1 del Arduino. Las señales obtenidas se procesan de acuerdo al algoritmo mostrado en la Fig.4.10. El código correspondiente en IDE, se muestra en la Fig.4.11.

4.5.2 Cálculo del caudal

Para calcular la variable caudal Q , es necesario conocer el área mayor y menor del tubo de Venturi (0,031 y 0,015 m²), y la presión diferencial adquirida el sensor PX137-015DV, conectado directamente al pin A2 del Arduino. La Fig. 4.12 muestra el algoritmo utilizado para calcular Q , mientras que el código correspondiente en IDE se muestra en la Fig.4.13.

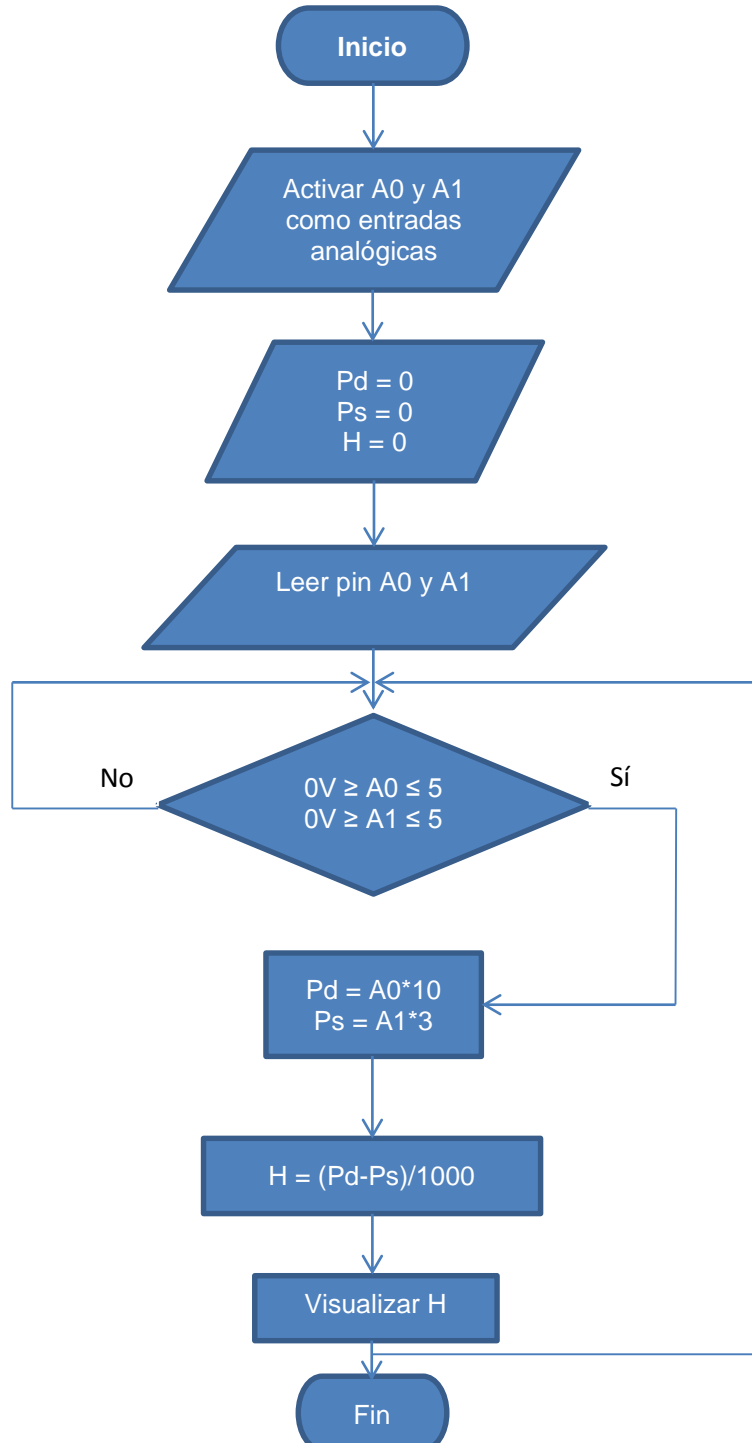


Figura 4.10 Algoritmo para el cálculo de la altura manométrica H .

Fuente: Gráfico elaborado por los autores

```
#include <glcd.h>
#include <font/allFonts.h>

float valorPd = A0;
float valorPs = A1;
float H
float Pd = 0;
float Ps = 0;
int valorAnterior = -1;
void loop()
Pd = analogRead(valorPd)*10;
Ps = analogRead(valorPs)*3;
H = (Pd+Ps)/1000;

Serial.println(H);
```

Figura 4. 11 Código IDE para cálculo de la altura manométrica H.

Fuente: Elaborado por los autores.

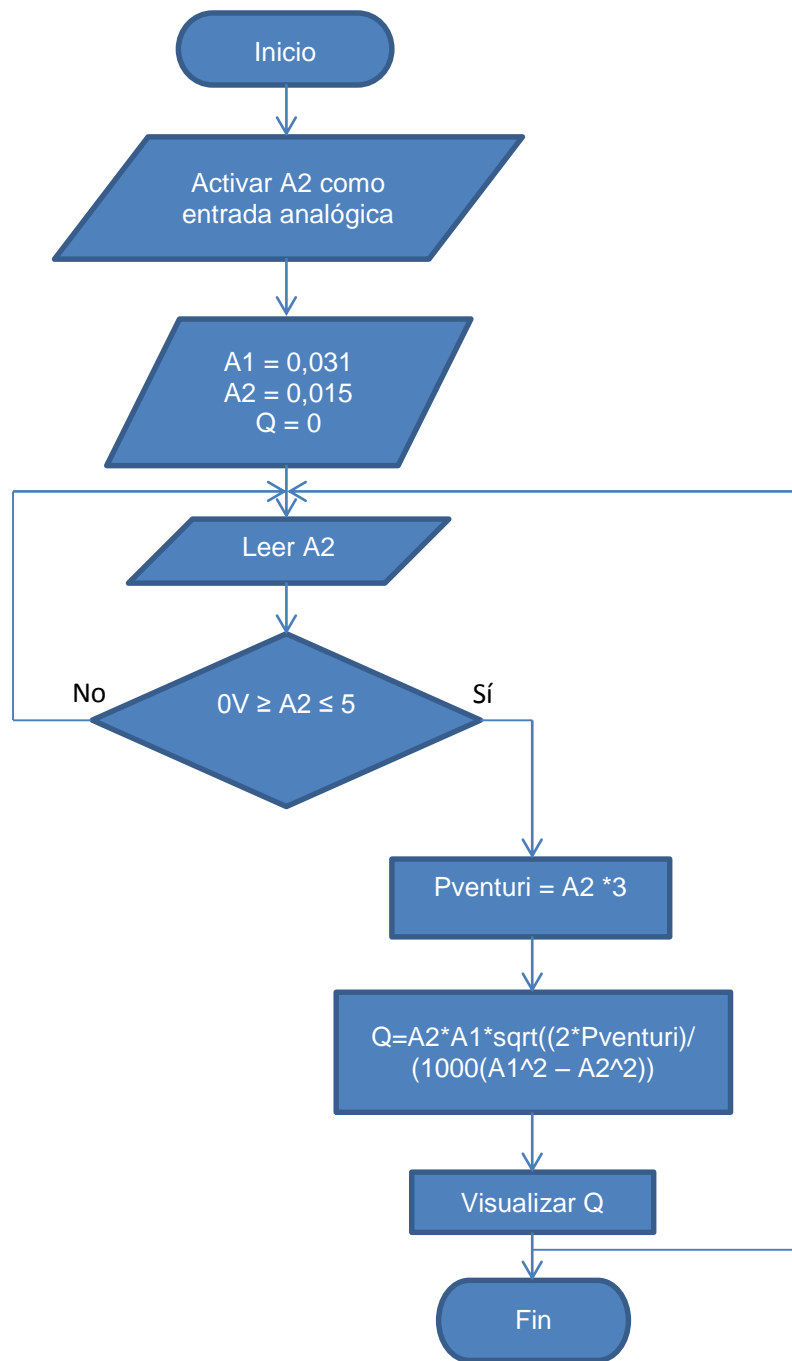


Figura 4.12 Algoritmo para el cálculo del caudal Q.

Fuente: Esquema elaborado por los autores.

```

#include <glcd.h>
#include <font/allFonts.h>

float valorPventuri = A2;
float Q
float A1 = 0,031;
float A2 = 0,015;
void loop()
{
Pventuri = analogRead(valorPventuri)*3;
Q = A1*A2*sqrt((2*Pventuri)/(1000*(A2^2-A1^2)));

Serial.println(Q);
}

```

Figura 4.13 Código IDE para cálculo del caudal Q.

Fuente: Elaborado por los autores.

4.5.3 Cálculo de la velocidad de rotación

El sensor utilizado para medir el número de revoluciones por minuto n es el HC-020K, que entrega la información en formato digital. La señal del sensor se envía al pin digital 13 del Arduino. La Fig. 4.14 muestra el algoritmo utilizado para el cálculo, mientras que en la Fig. 4.15 se muestra el correspondiente código IDE.

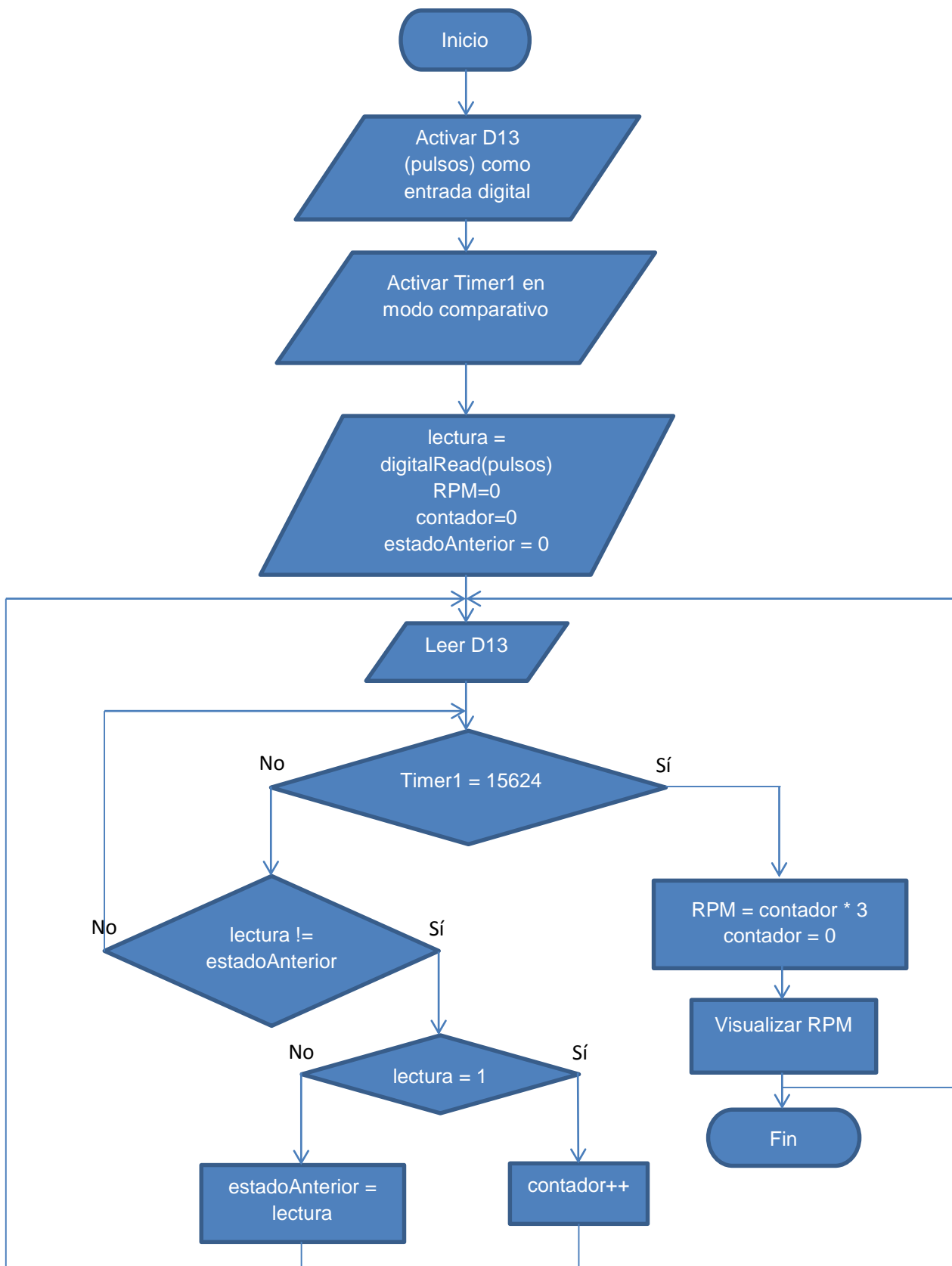


Figura 4.14 Algoritmo para el cálculo de la velocidad de rotación n.

Fuente: Elaborado por los autores.

```

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

int pulsos = 13;
int contador =0;
int estadoAnterior =0;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pulsos, INPUT);
  cli();
  TCCR1A=0;
  TCCR1B=0;

  OCR1A = 15624;
  TCCR1B |= (1<<WGM12);

  TCCR1B |= (1<<CS10);
  TCCR1B |= (1<<CS12);

  TIMSK1 =(1<<OCIE1A);
  sei();
}

void loop(){

int lectura = digitalRead(pulsos);
  if (lectura != estadoAnterior){
    if (lectura == HIGH){
      contador ++;
    }
  }
  estadoAnterior = lectura;
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect){
  float rpm = contador*3;
  Serial.println(rpm);
  contador =0;
}

```

Figura 4.15 Código IDE para cálculo de la velocidad de rotación n.

Fuente: Elaborado por los autores.

4.5.4 Cálculo de la potencia eléctrica suministrada y de la potencia de freno

La potencia eléctrica suministrada (P) y la potencia de freno de la turbina (PT), se obtienen manualmente utilizando las expresiones (17) y (18), descritas anteriormente.

4.5.5 Visualización de datos

El nodo de visualización contará con una pantalla LCD [29], en donde, se presentará las variables: H, Q y n.

4.5.6 Simulación del funcionamiento del nodo de procesamiento

Para validar el diseño del nodo de procesamiento de señales, se decidió simular el funcionamiento, utilizando los recursos de la aplicación de software ISIS Proteus 6.0.1. Se construyó un modelo constituido por 3 etapas: adquisición de datos, procesamiento, y, visualización (ver Fig.4.16). La etapa de adquisición de data se diseñó de forma tal que, los valores a adquirir por los sensores sean representados por valores aleatorios, obtenidos en los potenciómetros.

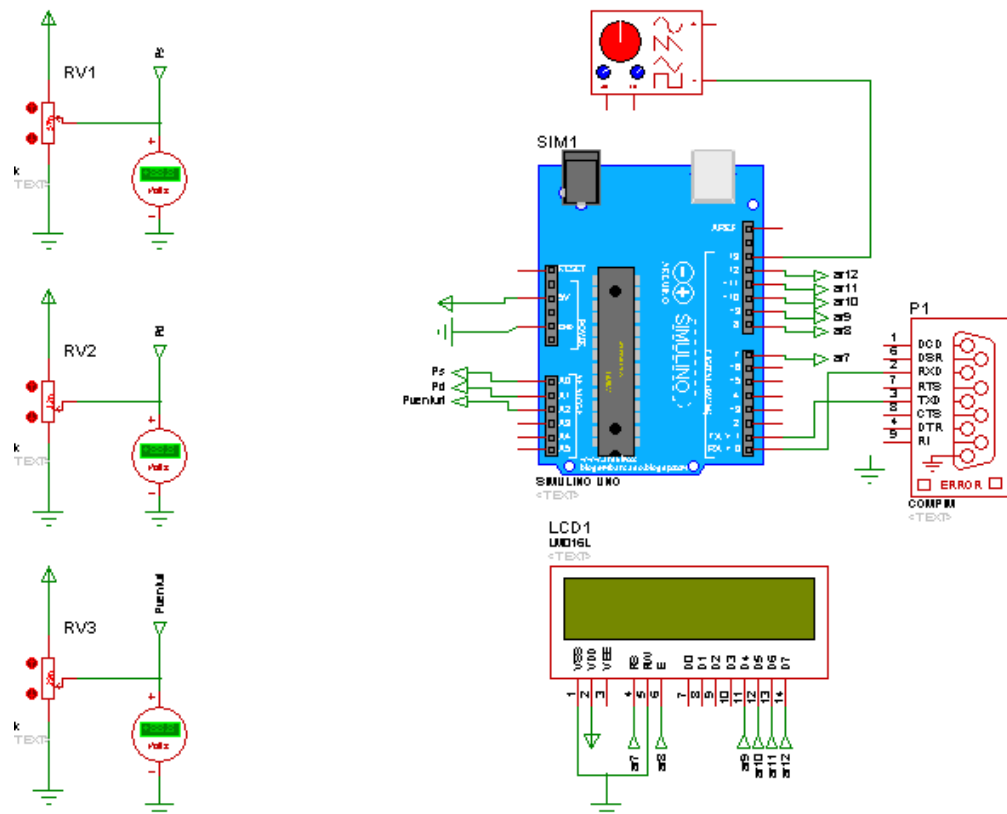


Figura 4.16 Esquema implementado en Proteus para la simulación del funcionamiento del nodo de procesamiento.

Fuente: Elaborado por los autores.

Los resultados de la simulación del funcionamiento del nodo de procesamiento demostraron su funcionalidad. Adicionalmente, se identificó la necesidad de expresar el caudal Q en l/s (en lugar de m³/s).

4.5.7 Construcción de las curvas características en un PC estándar

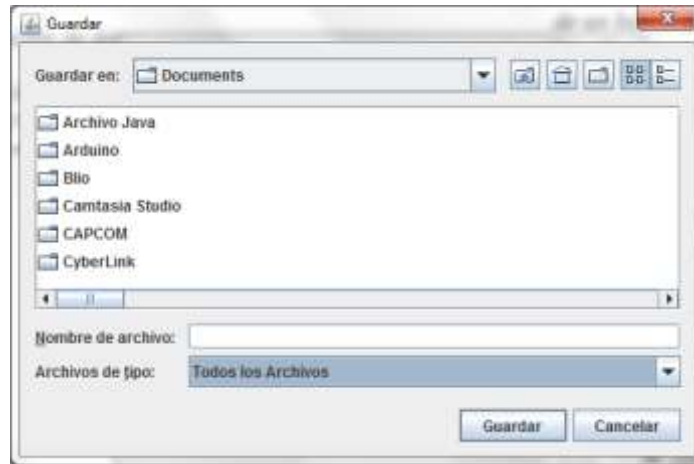
Una vez obtenidos los valores para cada una de las variables que intervienen en la construcción de las curvas características, estos podrán ser enviados a un computador vía comunicación serial, empleando una interfaz programada en Java (ver Fig.4.17) preparada con Netbeans 8.0.2 [30], desde dónde se exportará a Excel.



a)



b)



c)

Figura 4.17 a) Interfaz gráfica diseñada para exportar datos a Excel.
b) Proceso de adquisición de datos. c) Exportación de datos a Excel.

Fuente: Elaborado por los autores.

La funcionalidad de la interfaz se probó empleando los recursos del Virtual Serial Port Emulator. Las variables se enviaron con un espacio de 10 ms.

CONCLUSIONES

- Se ha determinado las características principales de la operación de bombas centrífugas y de turbinas tipo Pelton y Turgo.
- Se justificó el procedimiento para obtener las curvas características del desempeño de las bombas centrífugas y de las turbinas tipo Pelton y Turgo.
- La selección se ha fundamentado en la compatibilidad de la instrumentación con el diseño del banco de pruebas en términos de rango de medición, acople mecánico, y, salida en voltaje o corriente.
- Como resultado de la etapa de ingeniería de detalle, se ha complementado la rehabilitación y adecuación del banco de banco de pruebas Armfield, ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil de la UTPL, para el estudio de bombas centrífugas, y, turbinas Pelton y Turgo.
- En función de la no disponibilidad de recursos, las etapas de implementación y evaluación se posponen

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Jaramillo, A. Uchuari. (2013). Rehabilitación de un banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas. (Trabajo de Fin de Titulación), Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, UTPL.
- [2] Laplace, Departamento de Física Aplicada III, Universidad de Sevilla, “Tubo de Venturi” [Online]: Disponible en: <http://laplace.us.es/wiki/index.php/Tubo_de_Venturi> [Consultado el 28 de febrero de 2014]
- [3] Prácticas de turbinas hidráulicas, Laboratorio de mecánica de fluidos, “Curvas características de una turbina Pelton” [Online]: Disponible en: <https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/375/51418/1/Documento16.pdf> [Consultado el 1 de Marzo de 2014]
- [4] Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, Pedro Fernández Díez, “Turbinas Hidráulicas”, [Online]: Disponible en: <http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf> [Consultado el 1 de Marzo de 2014]
- [5] Máquina de fluidos, M. Pilar González Marcos, Febrero del 2009, “Turbinas Pelton”, [Online]: Disponible en: <http://cvb.ehu.es/open_course_ware/castellano/tecnicas/maquinas_fluidos/tema-6-turbinas-pelton.pdf> [Consultado el 5 de Marzo de 2014]
- [6] Máquinas hidráulicas, “Turbinas”; [Online]: Disponible en: <<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/turbinas/turbinas.html>> [Consultado el 5 de Marzo de 2014]
- [7] Centrales hidráulicas, Ismael Suescún Monsalve, “Turbinas Hidráulicas” [Online]: Disponible en: <<http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/files/capitulo%204.pdf>> [Consultado el 5 de Marzo de 2014]
- [8] Diseño hidráulico mecánico de la turbina, “Turbina Pelton”, [Online]: Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/263/6/Capitulo_4.pdf> [Consultado el 5 de Marzo de 2014]
- [9] Turbinas Turgo, Ed. Crewdson, [Online]: Disponible en: <<http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/turgo.htm>> [Consultado el 25 de Marzo de 2014]

- [10] R. S. y. R. F. I. Martin, «Mecánica de fluidos,» Universidad de Alicante, 2011. [En línea]. Available: http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/4/tema2_impulsion.pdf. [Último acceso: 12 Julio 2014].
- [11] R. Valdez, «Manual de hidráulica,» Slideshare, 4 Abril 2011. [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/laloktrin/manual-hidraulica>. [Último acceso: 18 Julio 2014].
- [12] «Metro de columna de agua, presión,» CONVERTWORLD.COM, [En línea]. Available: <http://www.convertworld.com/es/presion/Metro+de+agua.html>. [Último acceso: 5 Julio 2014].
- [13] IFM, [En línea]. Available: <http://www.heattracing.co.uk/upload/ifm-PA3029-Pressure-Transmitter-Pressure-Sensor-Highly-Stable-Pressure-Transmitter-High-Accuracy-Pressure-Transmitter-ifm-PA3029.pdf>. [Último acceso: 4 Agosto 2014].
- [14] OMEGA, [En línea]. Available: http://www.omega.com/pptst/PX409_VAC.html. [Último acceso: 4 Agosto 2014].
- [15] A. Uchuari, J. Jaramillo, «Rehabilitación de un banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas. (Trabajo de Fin de Titulación),» Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, UTPL., 2013.
- [16] «Rendimiento de turbinas hidráulicas,» ASIng, Servicios de ingeniería, [En línea]. Available: http://www.asing.es/rendimiento_turbinas_hidraulicas.php. [Último acceso: 15 Agosto 2014].
- [17] I. S. Monsalve, «Turbinas Hidráulicas,» Centrales Hidráulicas, [En línea]. Available: <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/files/capitulo%204.pdf>. [Último acceso: 15 Agosto 2014].
- [18] M. P. G. Marcos, «Turbinas Pelton,» Febrero 2009. [En línea]. Available: http://cvb.ehu.es/open_course_ware/castellano/tecnicas/maquinas_fluidos/tema-6-turbinas-pelton.pdf. [Último acceso: 25 Agosto 2014].
- [19] «Módulo de velocidad HC-020K,» Deal Extreme, 6 Agosto 2013. [En línea]. Available: http://www.dx.com/es/p/hc-020k-double-speed-measuring-module-w-photoelectric-encoders-black-green-2-pcs-219416#.U_x-No1RXX8. [Último acceso: 15 Agosto 2014].
- [20] «E-CENTRO,» 2012. [En línea]. Available: http://centrodeartigo.com/articulos-utiles/article_108621.html. [Último acceso: 2 11 2014].
- [21] I. d. I. M. d. F. e. I. Ambiental, «Bombas volumétricas,» IMFIA, 2009. [En línea]. Available: <http://www.fing.edu.uy/imfia/sites/default/files/6-%20volumetricas.pdf>. [Último acceso: 15 Agosto 2014].

- [22] Ohmímetros, resistor Shunt [En línea]: Disponible en: <<http://www.amperis.com/productos/ohmímetros/>> [Consulta Agosto 2014]
- [23] «Mecánica de fluidos,» Slideshare, 12 mayo 2011. [En línea]: Disponible en: <http://es.slideshare.net/mecanicadefluidos/bombas-centrifugas-7934169>. [Consulta Octubre 2014].
- [24] Módulo de velocidad HC-020K, Deal Extreme, Agosto 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.dx.com/es/p/hc-020k-double-speed-measuring-module-w-photoelectric-encoders-black-green-2-pcs-219416#.U_x-No1RXX8>. [Consulta Noviembre 2014].
- [25] Electrónica Básica, Fuentes de alimentación [En línea]: Disponible: <http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_electronica_3/electronica_indice.html> [Consulta Diciembre 2014]
- [26] «Arduino MEGA2560» Arduino, [En línea]. Disponible en: <<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>> [Consulta Diciembre 2014]
- [27] «IDE Software de Arduino» Arduino. [En línea]. Disponible en: <<http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=main/software>> [Consulta Diciembre 2014]
- [28] «OP AMP» Arquitectura no inversora. [En línea]. Disponible en: <<http://amplificadoroperacional.blogspot.com/2010/05/el-amplificador-operacional.html>> [Consulta Enero 2015]
- [29] LCD Conexión LCD y Arduino. [En línea]. Available: <http://glcd-arduino.googlecode.com/svn/trunk/glcd/build/doc> [Consulta Enero 2015]
- [30] NetBeans IDE [En línea]. Disponible en: <<https://netbeans.org/>> [Consulta Enero 2015]

ANEXO

PAPER: REHABILITACIÓN Y ADECUACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UTP

Rehabilitación y adecuación de un banco de pruebas Armfield en el Laboratorio de Hidráulica de la UTPL: selección de instrumentación requerida para el estudio de bombas centrífugas y turbinas Pelton y Turgo

V. Rojas^{#1}, J. Jaramillo^{#2}

^{#1}Profesional en formación de la EET, Universidad Técnica Particular de Loja

^{#2}Docente Investigador de la EET, Universidad Técnica Particular de Loja
Loja, Ecuador 2013

#1varojas2@utpl.edu.ec, #2jorgeluis@utpl.edu.ec

Abstract— Dentro del marco del proyecto de rehabilitación y adecuación del banco de pruebas Armfield, existente en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil de la UTPL, se describe los resultados obtenidos en la etapa de selección de la instrumentación requerida para el estudio de bombas centrífugas y de las turbinas Pelton y Turgo.

Keywords—banco de pruebas Armfield, bombas centrífugas, turbinas tipo Pelton y Turgo

I. INTRODUCCIÓN

En el marco de la iniciativa de incorporar fuentes renovables al sistema de provisión de energía del campus universitario de la UTPL, un papel importante juegan las aplicaciones de hidrogenación, cuyo diseño requiere de la utilización de un banco de pruebas para estudiar, en un ambiente controlado, el funcionamiento de varios tipos de turbinas, a fin de trasladar los resultados obtenidos a la implementación de las soluciones de hidrogenación en campo.

En este contexto, se decidió rehabilitar y adecuar el banco de pruebas Armfield, existente en el Laboratorio de Hidráulica de la UTPL, para el estudio de bombas centrífugas y turbinas tipo Pelton y Turgo. En la primera etapa del proyecto [1] se definió los requerimientos de intervención, identificando las acciones requeridas en 2 circuitos: hidráulico y de fuerza.

El análisis realizado al circuito hidráulico, reveló problemas en tuberías, bomba de pie defectuosa, bomba centrífuga inoperativa, y empaques envejecidos y obstruidos. En el circuito de fuerza, se encontró que el motor eléctrico estaba inoperativo, que el regulador de potencia era defectuoso, y, se encontró problemas en la alimentación eléctrica y en la instrumentación del banco. Adicionalmente, se determinó la necesidad de modificar el banco para permitir el estudio de turbinas tipo turgo.

Los problemas identificados, a excepción de los relacionados a la instrumentación fueron resueltos como resultado de las acciones realizadas en la primera etapa [1]. En esta etapa las acciones se han centrado en el reemplazo de la instrumentación inoperativa.

En este documento se describe las características generales de las bombas centrífugas y de las turbinas Pelton y Turgo, la selección de instrumentación para el respaldo de las curvas características, y, la ingeniería de detalle para la instalación de la instrumentación.

II. SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE TRABAJO DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Caracterizar una bomba centrífuga implica determinar sus curvas características: altura manométrica (H) vs caudal (Q), potencia eléctrica consumida (P) vs caudal (Q), potencia hidráulica (PH) vs caudal (Q) y eficiencia (η_B) vs caudal (Q).

Para la obtención de las curvas características de una bomba centrífuga se debe monitorear las presiones de aspiración e impulsión de la bomba, regular el caudal de salida, y, registrar el caudal que suministra la bomba (ver Fig.1) [2].

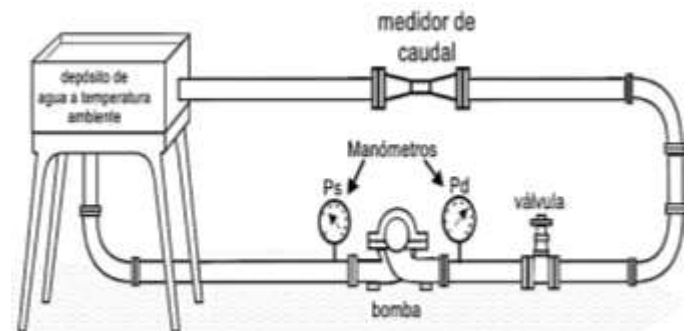


Fig.1 Esquema básico de un banco de pruebas de bombas centrífugas [2]

A. Construcción de la curva H vs Q

Considerando que P_s es la presión en la brida de aspiración de la bomba, y, que P_d es la presión en la brida de impulsión, se arranca la bomba con la válvula de descarga totalmente cerrada (para un caudal Q_0), obteniendo la presión diferencial de la bomba ($P_d - P_s$).

Conociendo la presión diferencial y el peso específico del líquido bombeado a temperatura ambiente (16°C), se obtiene la altura manométrica de la bomba a través de la expresión (1). La altura manométrica desarrollada por la bomba con caudal nulo Q_0 , se conoce como “shut-off” o H_0 .

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} \quad (1)$$

En dónde,

- H , es la altura manométrica, m
- P_d , es la presión en la brida de impulsión de la bomba, Kg/cm^2
- P_s , es la presión en la brida de aspiración de la bomba, Kg/cm^2
- γ , es el peso específico del líquido, Kg/m^3

Al abrir parcialmente la válvula reguladora, se obtiene un nuevo valor de caudal, y, nuevos valores de presión en la entrada y salida de la bomba. El proceso se repite varias veces, obteniendo la curva altura manométrica (H) vs caudal (Q), o, curva H - Q (ver Fig.2).

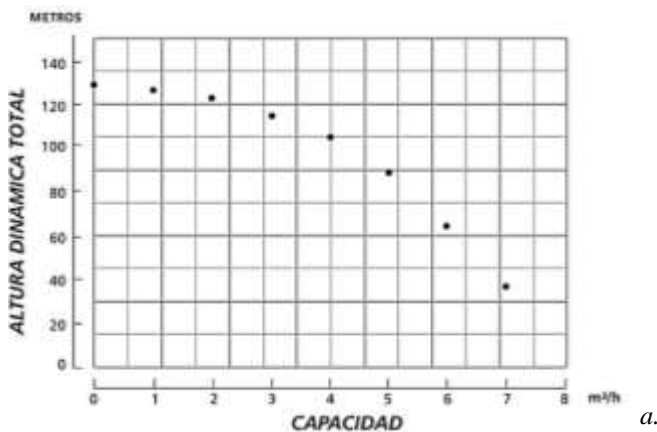


Fig.2 Altura manométrica de la bomba en función del caudal [2]

La curva así obtenida es válida para un determinado diámetro de impulsor. Al variar el diámetro, se obtiene una curva distinta, por lo que se habla de una familia de curvas (ver Fig.3).

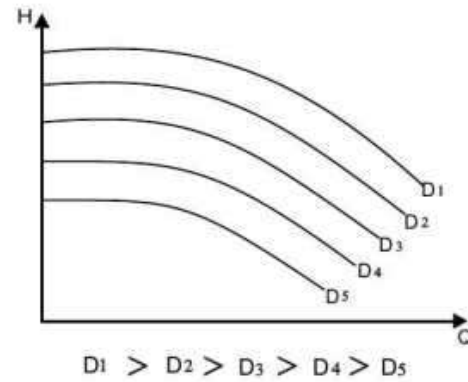


Fig.3 Altura manométrica en función del caudal con distintos diámetros [2]

B. Construcción de la curva P vs Q

La curva P - Q se construye monitoreando la potencia eléctrica consumida en el motor que impulsa la bomba (ver Fig.4). La potencia eléctrica se aproxima a través de la expresión (2).

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos(\phi) \quad (2)$$

En dónde,

- P , es la potencia consumida, W.
- V , es el voltaje de operación de la bomba, V.
- I , es la corriente eléctrica en la bomba, A.
- $\cos(\phi)$, es el factor de potencia en la bomba.

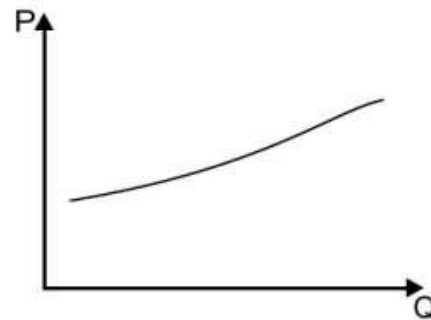


Fig.4 Potencia total del sistema en función del caudal [2]

C. Construcción de la curva P_H vs Q

La potencia hidráulica de la bomba (P_H), está ligada al caudal y a la altura manométrica a través de la expresión (3), a partir de la cual se construye la curva P_H vs Q .

$$P_H = \gamma * Q * H \quad (3)$$

D. Construcción de la curva η_B vs Q

La curva de rendimiento se construye por medio de la expresión (4). La potencia hidráulica difiere de la potencia eléctrica consumida, debido a la presencia de pérdidas por rozamiento [2]

$$\eta_B = \frac{P_H}{P} \quad (4)$$

$$\eta_B = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{P} \quad (5)$$

En dónde,

η_B , es la eficiencia de la bomba, %

A partir de la expresión (5) se construye la curva eficiencia (η) vs caudal (Q), o curva η - Q (ver Fig.5).

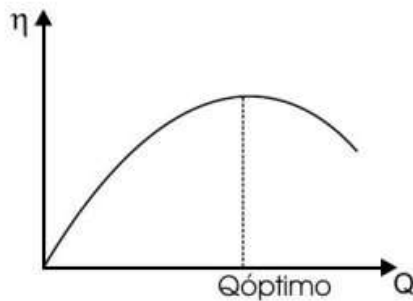


Fig.5. Eficiencia del sistema en función del caudal [2]

E. Posibilidades técnicas del banco de pruebas para la obtención de las curvas características de las bombas centrífugas

El esquema del circuito hidráulico del banco de pruebas (ver Fig.6), muestra la existencia de un vacuómetro en la brida de aspiración, y, un manómetro en la brida de impulsión, con 5 puntos de medición (4 en la bomba centrífuga, y, 1 en la salida de la misma).

Además, el stand cuenta con 7 válvulas, 5 para activar los puntos de medición del manómetro, 1 antes del vacuómetro para permitir la aspiración de líquido desde el tanque reservorio, y, una última después del manómetro para regular el caudal a aforar.

El caudal se aproxima con un tubo de Venturi, incorporado en la tubería conectada a la brida de impulsión de la bomba. En esencia, en un tubo Venturi se produce una pérdida de presión, al paso de un fluido a través de él. El dispositivo consta de una tubería recta y corta, o garganta, ubicada entre dos tramos cónicos (ver Fig. 7).

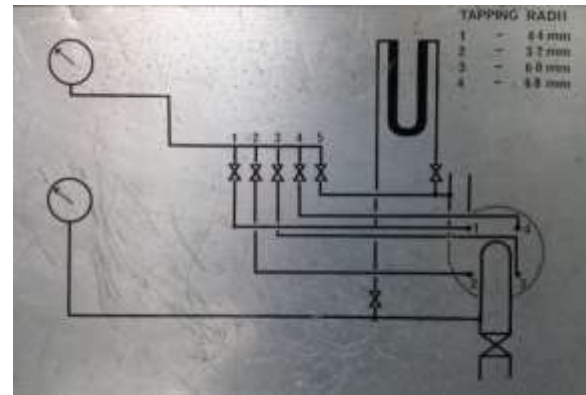


Fig.6. Circuito hidráulico del banco de pruebas armfield [Fotografía realizada por los autores]

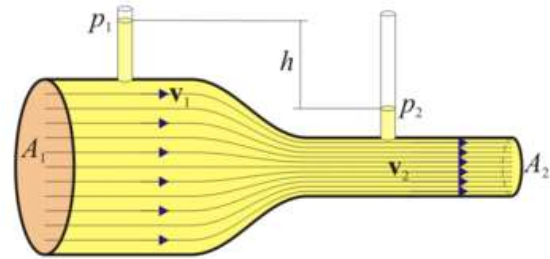


Fig.7 Tubo de Venturi [3]

A partir de la ley de conservación de la masa, se puede demostrar que el flujo volumétrico en el tubo está definido por la expresión (6) [3].

$$Q = A_2 A_1 \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho (A_1^2 - A_2^2)}} \quad (6)$$

En dónde,

- A_1 , es el área transversal de la tubería en su diámetro más amplio, m^2
- A_2 , es el área transversal de la tubería en su diámetro más estrecho, m^2
- p_1 , es la presión del fluido dentro de la tubería en su diámetro más amplio, m/s
- p_2 , es la presión del fluido dentro de la tubería en su diámetro más estrecho, m/s
- ρ , es la densidad del fluido, Kg/m^3
- Q , es el caudal, m^3/s

Durante la readecuación del banco de pruebas, se pudo establecer el deterioro de la instrumentación original, por lo que se propone reutilizar el tubo Venturi, y, montar un nodo que automatice el proceso de adquisición y construcción de las curvas características de la bomba.

III. SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE TRABAJO DE LAS TURBINAS PELTON Y TURGO

A. Características generales de las turbinas Pelton y Turgo

En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución, que gira alrededor de su eje de simetría. Este mecanismo lleva una o varias ruedas, rodetes o rotores, provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua [4].

El estudio del movimiento del agua en las turbinas hidráulicas, emplea una nomenclatura universal que define triángulos de velocidad, a la entrada y salida del rodete [5]. La Fig. 8 muestra los triángulos de velocidad en la entrada y en la salida de una turbina hidráulica.

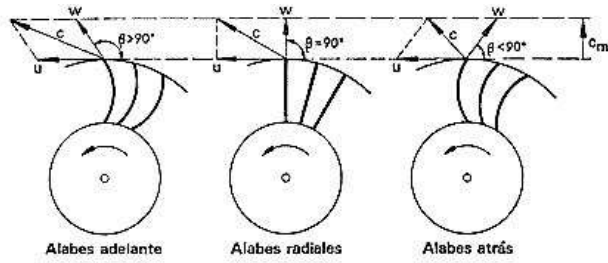


Fig.8 Triángulos de velocidad de una turbina hidráulica [6]

El triángulo de velocidad a la entrada de una turbina Pelton o Turgo, se expresa a través de la ecuación (7):

$$\vec{c}_1 = \vec{u}_1 + \vec{w}_1 \quad (7)$$

En dónde,

\vec{c}_1 , es la velocidad absoluta del agua a la salida del inyector, m/s

u_1 , es la velocidad tangencial a la entrada del rodete, m/s

w_1 , es la velocidad relativa del agua en la entrada, m/s

En las turbina Pelton y Turgo, el ángulo formado por u_1 y w_1 , es de aproximadamente 0° ($\alpha_1 \cong 0^\circ$), y, el ángulo formado por u_1 y c_1 es de aproximadamente 180° ($\beta_1 \cong 180^\circ$), por lo que las velocidades pueden ser sumadas algebraicamente [7].

Al aplicar la ecuación de Bernoulli, entre el punto de entrada de la turbina y el punto de salida del inyector, en términos de altura, se obtiene la expresión (8):

$$H = \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + H_{rE-1} \quad (8)$$

En dónde,

g , es la aceleración de la gravedad, 9.8 m/s^2 .

H_{rE-1} , es la pérdida de carga por rozamiento, mca

c_1 , es la velocidad absoluta del agua a la salida inyector, m/s

H , es la carga total antes del inyector, mca

A partir de esta expresión, se puede encontrar una fórmula para la velocidad absoluta del agua a la salida del inyector, a través del rendimiento de la tubería forzada, tal como se muestra en (9):

$$c_1 = \sqrt{\eta_{iny}} \sqrt{2 * g * H} \quad (9)$$

Al término $\sqrt{\eta_{iny}}$ se conoce como factor de velocidad absoluta de entrada C_1 , por lo que (9) puede reescribirse como (10):

$$c_1 = C_1 \sqrt{2 * g * H} \quad (10)$$

El vector u_1 se define en función del diámetro del rodete a través de la expresión (11).

$$u = u_1 = u_2 = \frac{\pi * D * n}{60} \quad (11)$$

En dónde,

u , es la velocidad tangencial del rodete, rad/s

D , es el diámetro del rodete, m

n , es el número de revoluciones del rodete, rpm

El triángulo de velocidades en la salida de las turbinas tipo Pelton y Turgo, tiene la forma mostrada en (12) (ver Fig.9):

$$\vec{c}_2 = \vec{w}_2 + \vec{u} \quad (12)$$

En dónde,

\vec{c}_2 , es la velocidad del agua a la salida del rodete, m/s

u_2 , es la velocidad tangencial a la salida del rodete, m/s

w_2 , es la velocidad relativa del agua en la salida, m/s

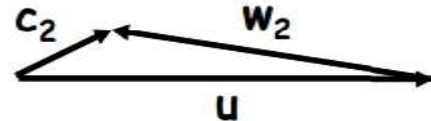


Fig.9. Triangulo de velocidad a la salida del rodete [7]

Ante la ausencia de pérdidas de energía por rozamiento en la cuchara, w_2 es igual a w_1 [8]. Al resolver el triángulo de velocidades a la salida de la turbina, se obtiene (13):

$$c_2 * \cos \alpha_2 = u * (1 + \cos \beta_2) - c_1 * \cos \beta_2 \quad (13)$$

En dónde,

β_2 , es el ángulo formado por u y w_2 .

α_2 , es el ángulo formado por u y c_2 .

B. Curvas características de las turbinas Pelton y Turgo

En la bibliografía se identifica 4 curvas características de las turbinas Pelton y Turgo: rendimiento hidráulico (η_H) vs la razón entre la velocidad tangencial del rodete y la velocidad absoluta a la salida del distribuidor (u/c_1), potencia de entrada (PE) vs caudal (Q), potencia al freno (PT) vs número de revoluciones por minuto de la turbina (n), y, rendimiento global de la turbina (η_T) vs caudal (Q).

Construcción de la curva η_H vs u/c_1

El rendimiento hidráulico de una turbina está dado por la relación entre la altura de propulsión (H_t) y la carga del fluido (H) (ver expresión 14).

$$\eta_h = \frac{H_t}{H} = 2 * (1 + \cos \beta_2) * \frac{u}{c_1} * \left(1 - \frac{u}{c_1}\right) \quad (14)$$

La gráfica de rendimiento hidráulico de una turbina, tiene la forma de una campana de Gauss, registrando el máximo rendimiento para la relación $u/c_1 = 0.5$ [7] (Fig. 10)

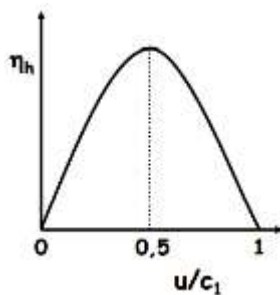


Fig.10. Curva de rendimiento hidráulico en función de u/c_1 [7]

Construcción de la curva P_E vs Q

Potencia de entrada es la potencia disponible en el fluido para transferir a la turbomáquina [8]. Se la obtiene por medio de la expresión (15). En la Fig.11 se presenta la variación de PE en función de Q

$$P_E = \rho * g * Q * H \quad (16)$$

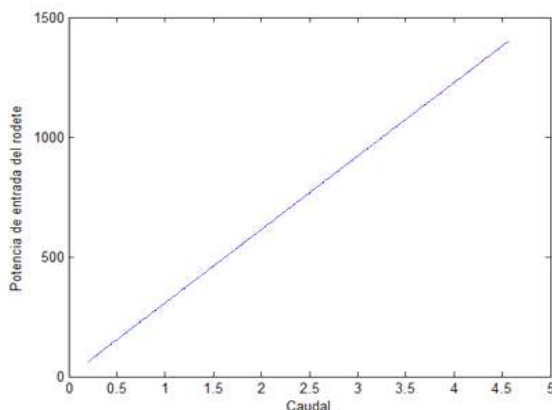


Fig.11 Variación de la potencia de entrada en función del caudal [Gráfico elaborado por los autores]

Construcción de la curva P_T vs n

La potencia al freno corresponde a la potencia exterior al eje [7]. Originalmente, en el banco de pruebas Armfield, se determinaba la potencia al freno mediante un freno Prony, el mismo que se encuentra en óptimas condiciones para su reutilización en la rehabilitación del stand. En este contexto, la expresión (17) se utilizará para la construcción de la curva

$$P_T = F * r * n \quad (17)$$

En dónde,

P_T , es la potencia al freno, HP
 F , es la fuerza ejercida por la correa del freno, N
 r , es la distancia desde la turbina al freno, m

Construcción de la curva η_T vs Q

El rendimiento global de la turbina es directamente proporcional a la potencia al freno, e indirectamente proporcional a la potencia de entrada, como se muestra en la expresión (18)

$$\eta_T = \frac{P_T}{P_E} \quad (18)$$

Una vez que la turbina Pelton o Turgo está diseñada, opera siempre a la misma velocidad angular constante y sincrónica, por lo que n y u se mantienen constantes. En estas condiciones, el comportamiento del rendimiento se estudia en función del caudal incidente en el rodete, dado que la variación de demanda de energía eléctrica exigirá modificar el caudal [9] (ver Fig.12).

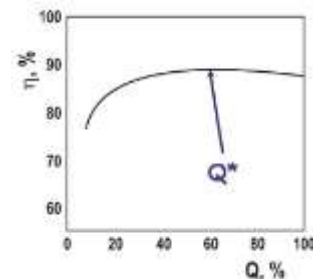


Fig.12 Rendimiento total de la turbina en función del caudal [9]

V. SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN REQUERIDA PARA EL ESTUDIO DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Originalmente, en el banco de pruebas Armfield (ver Fig.13), existía instrumentación analógica suficiente para apoyar la construcción de las curvas características de las bombas centrífugas, instrumentación, que ha excepción del tubo de Venturi, ha perdido su capacidad de trabajo, razón por la cual se ha propuesto reemplazarla, observando, en lo posible, la compatibilidad con el banco en cuanto a rango de medición, acople mecánico, y, salida en voltaje o corriente.



Fig.13 Banco de pruebas Armfield [3]

A. Instrumentación de la curva H vs Q

Medición de la altura manométrica (H)

Se conoce como altura manométrica de una bomba, al incremento de energía adquirida por 1 Kg de líquido, entre la sección de entrada y salida de la bomba [10] (ver Fig.14). Normalmente, la altura manométrica se mide en metros por columna de agua (mca).

En este proyecto se decidió reemplazar el vacuómetro, colocado originalmente en el stand, por sensores de presión de vacío calibrados en psi, muy frecuentes en el mercado. Para conversión, se utilizará la razón de transformación 1 mca/ 1,422 psi [12]. La búsqueda bibliográfica permitió identificar al menos 2 sensores de presión de vacío utilizables: con célula cerámica de medición IFM (ver Tabla 1), y, de presión de vacío PX409 de Omega (ver Tabla 2). La salida de voltaje del segundo sensor influyó en que la decisión final recayera sobre él.

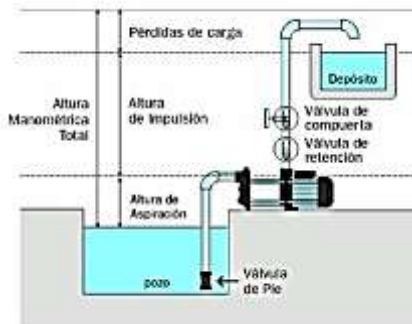


Fig.14 Altura manométrica de una bomba centrífuga [11]

Tabla 1

Características técnicas del sensor de presión de vacío con célula cerámica de medición IFM [13]

Salida	0 a 4 mA
Rango de medición	0 a -15 psi
Requerimientos de alimentación	5 a 10V, 2mA
Puerto	½" NPT macho
Resolución	0,1 PSI

Tabla 2

Características principales del sensor PX409 [14]

Salida	0 a 10 mV
Rango de medición	0 a -15psi
Requerimientos de alimentación	5 a 10V, 2mA
Puerto	½" NPT macho
Resolución	0,1 PSI

La presión en la brida de impulsión se obtenía por medio de un manómetro analógico, operando en el rango de 0 a 25 mca. Para el proyecto, se decidió adquirir un sensor de presión manométrica. La búsqueda bibliográfica permitió identificar al menos 2 opciones de sensores utilizables: el sensor PX309 de Omega (ver Tabla 3), y, el sensor SCX15DNC de WIKA (ver Tabla 4). Considerando la baja resolución requerida y el bajo costo, se decidió utilizar la primera opción.

Tabla 3

Características principales de los sensores de la gama PX309 [15]

Salida	0 a 5 V
Rango de medición	0 a 50 psi
Requerimientos de alimentación	9 a 30Vdc, 2mA
Puerto	½" NPT macho
Resolución	0,25 PSI

Tabla 4

Características principales del sensor WIKA de la serie SCX15DNC [16]

Salida	0 a 5 V,
Rango de medición	0 a 50 psi
Requerimientos de alimentación	5 a 10Vdc, 2mA
Puerto	½" DIN
Resolución	0,1 PSI

Salvo excepciones expresas, el peso específico del agua se considerará de 1000 Kg/m³ [17].

Medición del caudal (Q)

Se conoce como caudal a la cantidad de una determinada sustancia que, pasa por un lugar establecido durante un periodo de tiempo dado [18]. Normalmente, el caudal se mide en m³/s.

En este proyecto, se propuso medir la diferencia de presión en el tubo Venturi, por medio de un sensor de presión diferencial, cuyo rango de medición se aproximará al rango del manómetro analógico conectado en la brida de impulsión. La búsqueda bibliográfica identificó 2 posibles opciones: el sensor PX137-015DV de Omega (ver Tabla 5), y, el sensor SDP1108 de SENSIRION (ver Tabla 6). Considerando el rango del sensor y su menor costo, se decidió utilizar el primer sensor

Tabla 5

Características principales del sensor PX137-015DV [19]

Salida	0 a 5 V
Rango de medición	0 a 15 psi
Requerimientos de alimentación	9 a 30Vdc, 2mA
Resolución	0,25 PSI

Tabla 6

Características principales del sensor SDP1108 [20]

Salida	0 a 4 V
Rango de medición	0 a 25 psi
Requerimientos de alimentación	12 Vcc, max 16 Vcc
Resolución	0,25 PSI

Por cuanto se reutilizará el tubo de Venturi existente, se determinó los valores de A_1 y A_2 , en 0,031 y 0,015 m², respectivamente.

B. Instrumentación de la curva P vs Q

Medición de la Potencia eléctrica (P)

Recientemente en el banco de pruebas, se instaló un motor trifásico SIEMENS tipo 1LA7 083-2YA60 (ver Fig. 15), conectado a la red eléctrica de 220V, mediante una conexión Y-Y (ver Fig. 16). Las características técnicas del motor, se presentan en la Tabla 7.



Fig. 15 Motor Trifásico SIEMENS 1LA7 083-2YA60 [Fotografía realizada por el autor]

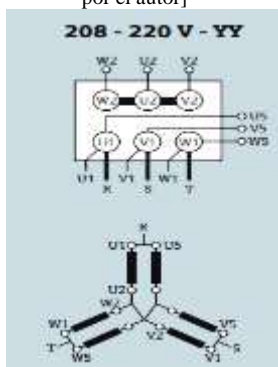


Fig.16 Conexión Y-Y de un motor trifásico [21]

Tabla 7

Características técnicas del motor SIEMENS 1LA7 083-2YA60 [Datos de placa]

Marca	SIEMENS
Modelo	1LA7 083-2YA60
Número de fases	3
Potencia	2.0 HP
Temperatura de funcionamiento	-15/40°C
Tipos de conexión	220 YY / 440 Y V
	6.2 / 3.1 A
Frecuencia	60 Hz
Rendimiento	73.4
Factor de Potencia	0.86
Peso	10 Kg
Revoluciones por minuto	3410 rpm

Como voltaje de operación de la bomba se adoptará el voltaje del motor accionante. Para registrar la corriente se empleará un resistor tipo shunt, conectado en serie en una de las fases (ver Fig.17). Y, como factor de potencia se tomará el $\cos(\phi)$ de placa (0,86).

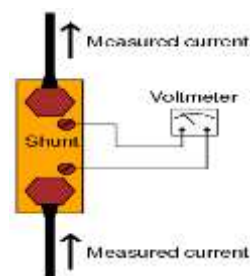


Fig.17 Conexión de un resistor tipo shunt para registro de la corriente en una de las fases. [22]

C. Instrumentación de la curva P_H vs Q

Se conoce como potencia hidráulica, a la potencia que la bomba centrífuga transmite al fluido [23]. Normalmente, la potencia hidráulica se mide en W.

La potencia hidráulica está ligada, por medio de la expresión (3), a la altura manométrica (H) y al caudal (Q), variables que han sido abordadas anteriormente.

D. Instrumentación de la curva η vs Q

Se denomina rendimiento de una bomba centrífuga, al cociente entre la potencia hidráulica y la potencia eléctrica total suministrada [2]. Su unidad es adimensional, normalmente se mide en tanto por ciento (%).

A partir de la expresión (5) se construye la curva de rendimiento. Las variables necesarias para respaldar esta curva son 3: altura manométrica (H), caudal (Q) y potencia eléctrica (P), las cuales han sido abordadas anteriormente.

VI. SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN REQUERIDA PARA EL ESTUDIO DE TURBINAS TIPO PELTON Y TURGO

En el banco de pruebas, la tubería que conduce al tanque de afore, tiene en su camino una campana en la que se coloca una turbina Pelton o Turgo. La carga del banco se complementa con un freno Prony (ver Fig.20). Luego de la rehabilitación, se dispone de 3 turbinas, una Pelton y 2 Turgo, de 0,30m de diámetro.



Fig.18 Banco de pruebas Armfield adecuado para el estudio de turbinas tipo Pelton y Turgo [Fotografía realizada por los autores].

A. Instrumentación de la curva η vs $u/c1$

El rendimiento hidráulico es una característica de desempeño que se describe como la razón entre la altura de propulsión en el distribuidor, y la carga del fluido o altura manométrica a la entrada del distribuidor [2]. Normalmente, se expresa en tanto por ciento (%).

Como se muestra en la expresión (14), para respaldar la construcción de la curva de rendimiento hidráulico, es necesario adquirir 2 variables: velocidad absoluta a la entrada del rodete (c_1) y velocidad tangencial del rodete (u).

El factor β_2 es una constante de diseño de la cuchara de la turbina, y su valor es de aproximadamente 180° . Para turbinas Pelton y Turgo reales, el factor se estima en 170° [3].

Medición de la velocidad absoluta a la entrada del rodete (c_1)

Se conoce como velocidad absoluta a la entrada del rodete, a la velocidad del agua a la salida del distribuidor, medida en m/s [5]. La velocidad absoluta a la entrada del rodete se aproxima por medio de la expresión (10).

Si se estima que las pérdidas son mínimas en la tubería que conecta la brida de impulsión de la bomba centrífuga con el distribuidor de la turbina, entonces se puede utilizar el valor adquirido por medio del sensor PX309, para reemplazar el valor de H en la expresión (10)

El factor de velocidad absoluta se considerará de 0.98

Medición de la velocidad tangencial del rodete (u)

Para registrar el número de revoluciones por minuto de la turbina (n), se propuso utilizar un módulo de velocidad HC-020K (ver Fig.19), acoplado al eje de la turbina. Las especificaciones técnicas del módulo de velocidad se detallan en la Tabla 8



Fig.19 Módulo de velocidad HC-020K [24]

Tabla 8

Especificaciones técnicas del módulo de velocidad [24]

Modelo	HC-020K
Material	FR4
Características	Alta resolución, tiempo de respuesta corto, salida de conmutación.
Voltaje de funcionamiento	4.5 a 5.5
Salida de señal	A, B dos líneas
Resolución	0,01mm
Frecuencia de medición	100KHz
Diámetro del disco	24 mm
Resolución del codificador	20 líneas

B. Instrumentación de la curva P_E vs Q

Para registrar la potencia de entrada en el banco, se requiere adquirir 2 variables: altura manométrica (H) y caudal (Q), variables abordadas anteriormente

Salvo expresas excepciones, la densidad del fluido se considerará de 1000 Kg/m^3

C. Instrumentación de la curva P_T vs Q

La potencia exterior al eje o potencia al freno corresponde a la fuerza que debe emplear un freno para detener la turbina en función del número de revoluciones por minuto (n). Normalmente se mide en HP.

El freno Prony existente en el banco (ver Fig.20) facilita la medición de la potencia al freno de la turbina. El freno Prony es un dispositivo compuesto por un freno mecánico y un dinamómetro, que mide el par de torsión producido.. Entonces, la potencia de la turbina se aproxima por medio de la expresión (17).



Fig. 20 Freno Prony instalado en el banco de pruebas Armfield [fotografía realizada por los autores]

D. Instrumentación de la curva de rendimiento

El rendimiento global de la turbina es directamente proporcional a la potencia al freno (P_T), e inversamente proporcional a la potencia de entrada (P_E) (ver expresión (18)), variables que han sido abordadas anteriormente. El rendimiento global se mide en tanto por ciento (%).

VII. IDENTIFICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN SUFICIENTE PARA EL ESTUDIO DE BOMBAS CENTRIFUGAS

A. Construcción de la curva H vs Q

Para obtener los datos suficientes para la construcción de la curva H vs Q, se necesita adquirir tres variables: presión en la brida de impulsión (p_d), presión en la brida de aspiración (p_s), y presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$. El formato de adquisición de datos de estas variables se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9

Formato de adquisición de datos. Elaborado por los autores.

Variable	P_d	P_s	$P_{Venturi}$
Unidad	psi	psi	psi
Rango de medición	0 a 15 psi	0 a -5 psi	0 a 15 psi
Resolución	0,5 psi	0,5 psi	0,5 psi

En la etapa de selección de la instrumentación, se decidió registrar la variable P_d por medio del sensor PX309, la variable P_s con el sensor PX409 y, la variable $P_{Venturi}$ con el sensor PX137-015DV. La Tabla 10 muestra las características técnicas principales de los sensores seleccionados.

Tabla 10

Características técnicas principales de los sensores PX309, PX409 y PX137-015DV de OMEGA. Elaborado por autores.

Sensor	PX309	PX409	PX137-015DV
Salida	0 a 5 V	0 a 10 mV	0 a 5 V
Rango de medición	0 a 50 psi	0 a -15psi	0 a 15 psi
Requerimientos de alimentación	10 Vdc, 2mA	5 a 10V, 2mA	9 a 30Vdc, 2mA
Puerto	1/2" NPT macho	1/2" NPT macho	
Resolución	0,25 PSI	0,1 PSI	0,25 PSI

Los sensores se acoplarán con la tubería del banco de pruebas, por medio de un acople mecánico existente, diseñado para la instrumentación analógica original. La Fig. 21 muestra un esquema de ubicación de los sensores.

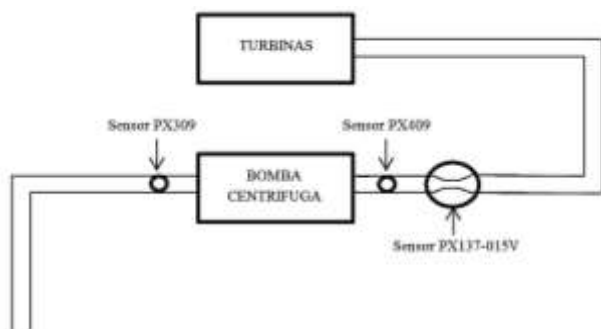


Fig.21 Esquema de ubicación de los sensores en el banco de prueba [Realizado por los autores]

La lectura de cada uno de los sensores será enviada a una tarjeta Arduino Mega 2560, sobre la cual se montará el nodo de procesamiento.

B. Construcción de la curva P vs Q

Para respaldar la construcción de la curva, se determinó necesario el monitoreo de dos variables: potencia eléctrica suministrada al motor accionante (P) y presión diferencial en el tubo de Venturi ($P_{Venturi}$). El formato de adquisición de data de la variable P , se muestra en la Tabla 11.

En la etapa de selección de la instrumentación, se decidió que la variable P se obtenga por medio de un resistor tipo Shunt, conectado en serie a una de las fases del motor accionante. En la Fig. 22 se muestra el diagrama de ubicación del resistor.

Tabla 11

Formato de adquisición de datos de la variable P . Elaborado por los autores

Variable	P
Unidad de manejo	W
Rango de medición	0 a 1500 W (\approx 2 HP)
Resolución	No se conoce

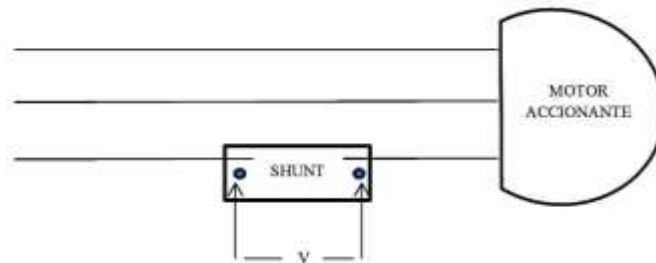


Fig.22 Esquema de ubicación resistor Shunt [Realizado por los autores]

La lectura de voltaje del Shunt se registra manualmente, y, a través de la expresión (2) se convierte en potencia eléctrica. Como factor de potencia se considerará el valor de $\cos(\phi)$ en la placa del motor accionante (0,86).

B. Construcción de la curva P_H vs Q

Anteriormente se determinó que, los datos suficientes para la construcción de la curva P_H vs Q , provienen del monitoreo de 3 variables: presión en la brida de impulsión (p_d), presión en la brida de aspiración (p_s), y presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$.

En el apartado anterior se explicó los detalles de la instalación de la instrumentación para adquirir la data relacionada a estas variables.

C. Construcción de la curva η_B vs Q

Las variables necesarias para la construcción de la curva de rendimiento son 4: presión en la brida de impulsión (p_d), presión en la brida de aspiración (p_s), presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$, y, la potencia eléctrica suministrada (P).

La forma en que la instrumentación se conecta para adquirir las variables necesarias, y respaldar la curva de rendimiento, fueron abordadas anteriormente

VIII. IDENTIFICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN SUFICIENTE PARA EL ESTUDIO DE TURBINAS TIPO PELTON Y TURGO

A. Construcción de la curva η_H vs u/c_1

Anteriormente se determinó que, para respaldar la construcción de la curva de rendimiento hidráulico, se necesita adquirir 3 variables: presión en la brida de impulsión (p_d), presión en la brida de aspiración (p_s), y, número de revoluciones por minuto (n). Las primeras 2 variables fueron abordadas anteriormente. La Tabla 12 muestra el formato de adquisición de la variable n .

Tabla 12

Formato de adquisición de datos de la variable n . Elaborado por los autores

Variable	n
Unidad de manejo	rpm
Rango de medición	0 a 500 rpm
Resolución	1 rev

En la etapa de selección de la instrumentación, se decidió que la variable n se adquiriera por medio del módulo de medición de velocidad HC-020K, cuyas características técnicas se presentan en la Tabla 8.

El módulo de velocidad se colocará junto al eje de la turbina, tal como se muestra en la Fig. 23.

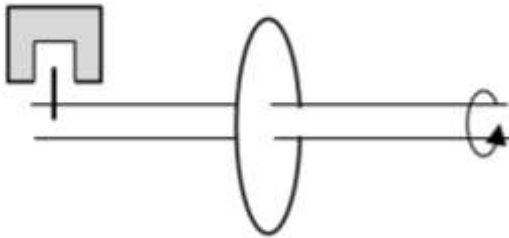


Fig.23 Esquema de ubicación del módulo de velocidad HC-020K [Realizado por los autores]

La lectura del módulo de velocidad será enviada a una tarjeta Arduino Mega 2560, sobre la cual se montará el nodo de procesamiento.

B. Construcción de la curva P_E vs Q

Las variables necesarias para respaldar la construcción de la curva P_E vs Q son 3: presión en la brida de impulsión (p_d), presión en la brida de aspiración (p_s) y presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$, variables que han sido abordadas anteriormente.

C. Construcción de la curva PT vs n

Las variables necesarias para la construcción de la curva par motor son 2: número de revoluciones por minuto (n) y fuerza de freno (F). El formato de adquisición de datos de la variable F se describe en la Tabla 13

Tabla 13

Formato de adquisición de datos de la variable F . Elaborado por los autores

Variable	F
Unidad de manejo	N
Rango de medición	0-20 N
Resolución	0,5 N

Anteriormente se determinó la reutilización del freno Prony existente en el banco de pruebas Armfield. En la Fig.24 se detalla su ubicación en el stand.



Fig. 24 Freno Prony instalado en el banco de pruebas Armfield [fotografía realizada por los autores]

La lectura de fuerza medida en el dinamómetro integrado en el freno Prony, se registra manualmente, y, a través de la expresión (17), se convierte en potencia de freno.

La distancia desde el eje de la turbina al freno (r) es igual al radio de la circunferencia adaptada a la correa de freno (0,1 m).

D. Construcción de la curva ηT vs Q

Para respaldar la curva de rendimiento se necesita adquirir 5 variables: presión en la brida de impulsión (p_d), presión en la brida de aspiración (p_s), presión diferencial en el tubo Venturi $P_{Venturi}$, número de revoluciones por minuto (n) y fuerza de freno (F). Las cuales han sido abordadas anteriormente.

IX. DETALLES GENERALES DE LA INSTALACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

A. Sobre la fuente de voltaje regulado

De acuerdo a la bibliografía [2], se requiere de una fuente de voltaje regulado en corriente directa para alimentación de los sensores a utilizar, cuya arquitectura corresponda a la mostrada en la Fig.25. La fuente a implementar tendrá una relación de transformación de 220/15, con una corriente máxima de 500 mA. Como regulador de voltaje se empleará un integrado 7810.

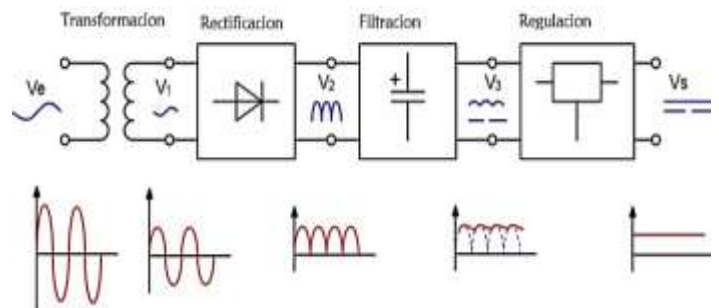


Fig.25 Fuente reguladora de voltaje [25]

B. Sobre la conexión de sensores

El sensor PX309 (ver Fig.26) se conecta de acuerdo al detalle de pines mostrado en la Tabla 14. Para la transmisión de información, la bibliografía [13] recomienda la utilización de cable UTP con una extensión máxima de 1,5m.

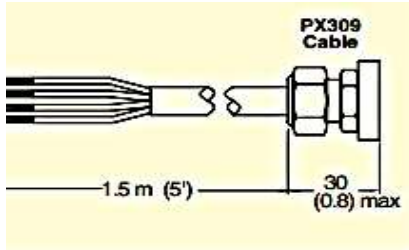


Fig. 26 Sensor de presión manométrica PX309 [15]

Tabla 14

Cables de conexión sensor PX309[15]

Pines	Cable
Alimentación(+)	Rojo
Salida(+)	Blanco
Salida(-)	Verde
Alimentación(-)	Negro

El sensor PX409 (ver Fig.27) se conecta de acuerdo al detalle de pines mostrado en la Tabla 15.

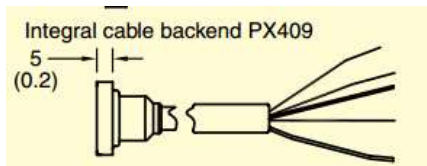


Fig.27 Sensor de presión de vacío PX409 [14]

Tabla 15

Cables de conexión sensor PX409[14]

Pines	Cable
Alimentación(+)	Rojo
Salida(+)	Blanco
Salida(-)	Verde
Alimentación(-)	Negro

El sensor PX137-015DV se conecta de acuerdo al detalle de pines mostrado en la Fig.28

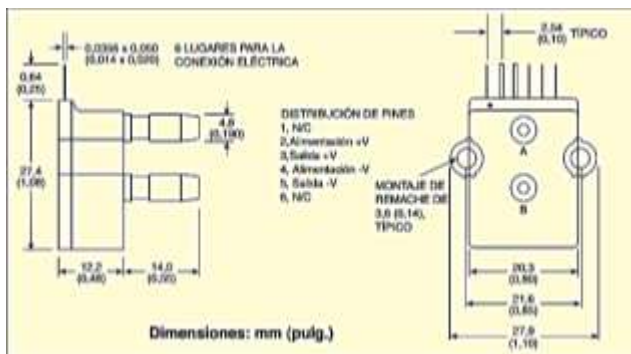


Fig. 28 Sensor PX137-015DV [19]

El módulo de velocidad HC-020K fue diseñado para trabajar con Arduino. Su conexión se realiza por medio de cable UTP categoría 5 integrado, con una extensión de 20 cm como se presenta en la Fig.29.

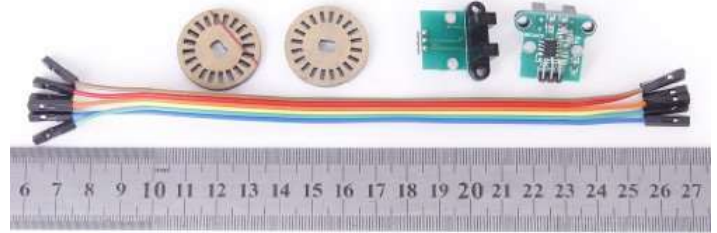


Fig.29 Módulo de velocidad HC-020K [24]

C. Sobre el nodo de procesamiento de datos

El nodo de procesamiento de datos se montará sobre un Arduino Mega 2560 [25], cuyas características se presentan en la Tabla 16. Para la programación del nodo se utilizará los recursos de IDE de Arduino [26].

Tabla 16

Características del Arduino Mega 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje operativo	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Pines digitales Entrada/Salida	54
Pines analógicos de entrada	16
Corriente DC por cada Pin in/out	40 mA
Memoria Flash	256 KB
SRAM	8 KB
Clock Speed	16 MHz

X. ALGORITMOS DE CÁLCULO DE PARÁMETROS Y CONSTRUCCIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS

A. Cálculo de la altura manométrica H

Para calcular el valor de la variable H, la presión en la brida de impulsión p_d , medida por el sensor PX309, se envía al pin A0 del Arduino. La presión en la brida de aspiración p_s , registrada por el sensor PX409, se envía a través de un acondicionador de señal no inversor [9] (con una ganancia de 500), al pin A1 del Arduino. Las señales obtenidas se procedan de acuerdo al algoritmo mostrado en la Fig.30. El código correspondiente en IDE, se muestra en la Fig.31.

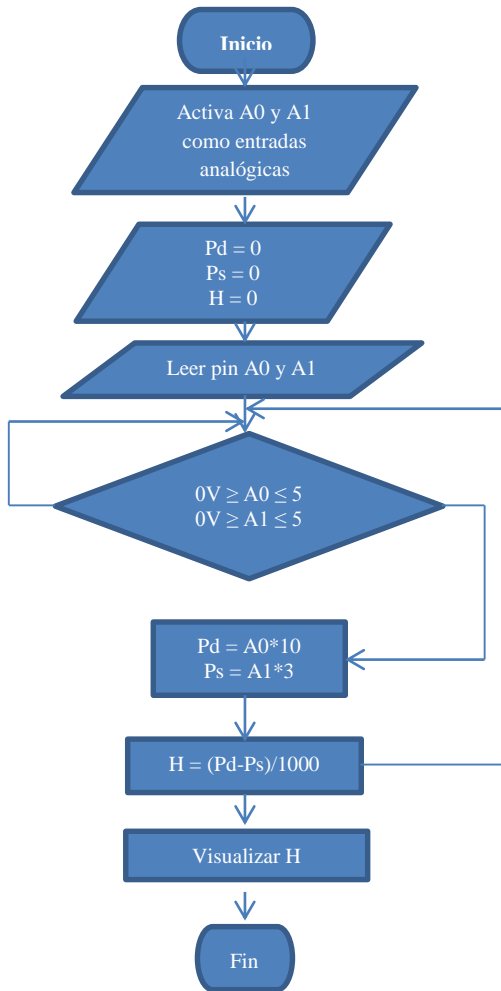


Fig.30 Algoritmo para el cálculo de la altura manométrica H. Diseño de autores

```

#include <glcd.h>
#include <font/allFonts.h>

float valorPd = A0;
float valorPs = A1;
float H;
float Pd = 0;
float Ps = 0;
int valorAnterior = -1;
void loop()
{
  Pd = analogRead(valorPd)*10;
  Ps = analogRead(valorPs)*3;
  H = (Pd+Ps)/1000;

  Serial.println(H);
  valorAnterior = H;
}
  
```

Fig.31 Algoritmo para calcular H

B. Cálculo del caudal Q

Para calcular la variable caudal Q, es necesario conocer el área mayor y menor del tubo de Venturi, (0,031 y 0,015 m²), y, la presión diferencial adquirida el sensor PX137-015DV, conectado directamente al pin A2 del Arduino. La Fig. 32 muestra el algoritmo utilizado para calcular Q, mientras que el código correspondiente en IDE, se muestra en la Fig.33

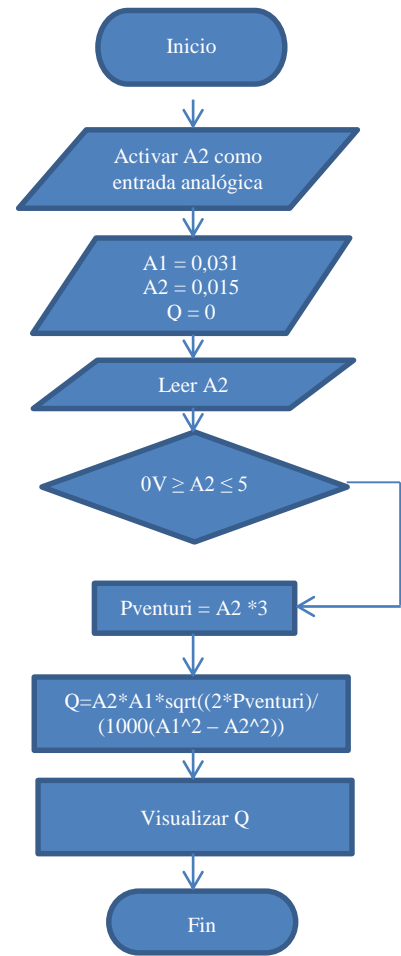


Fig.32 Flujograma del cálculo de Q

El algoritmo para calcular Q, que se instalará en el Arduino, se detalla en la Fig.36

```

#include <glcd.h>
#include <font/allFonts.h>

float valorPventuri = A2;
float Q;
float A1 = 0,031;
float A2 = 0,015;
void loop()
{
  Pventuri = analogRead(valorPventuri)*3;
  Q = A1*A2*sqrt((2*Pventuri)/(1000*(A2^2-A1^2)));

  Serial.println(Q);
}
  
```

Fig.33 Algoritmo para calcular Q

C. Cálculo de la velocidad de rotación n

El sensor utilizado para medir el número de revoluciones por minuto n es el HC-020K, que entrega la información en formato digital. La señal del sensor se envía al pin D1 del Arduino. La Fig. 34 muestra el algoritmo utilizado para el cálculo, mientras que en la Fig. 35 se muestra el correspondiente código IDE.

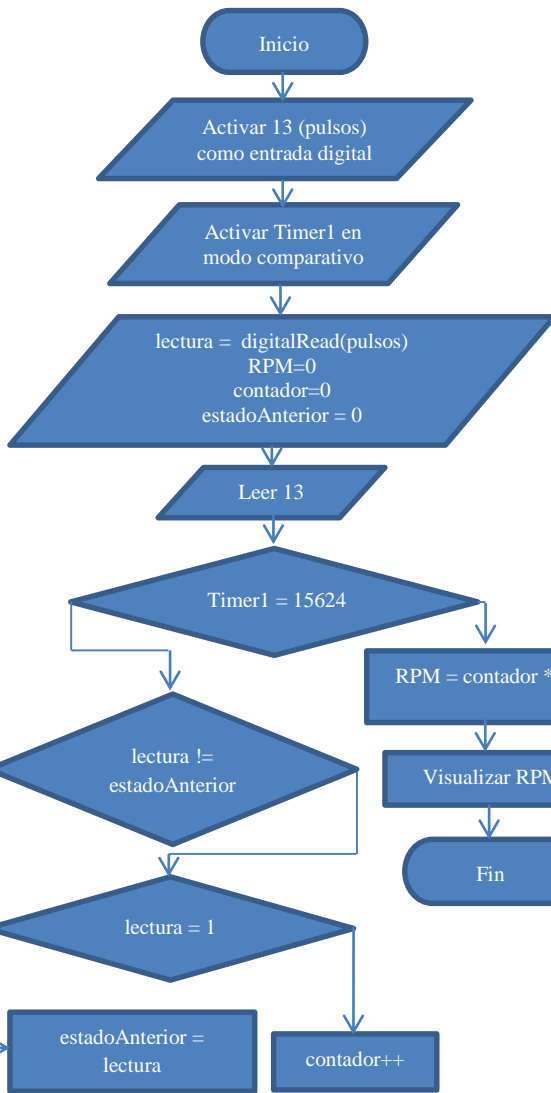


Fig.34 Algoritmo para el cálculo de la velocidad de rotación n. Diseño de autores

```
# include <avr/io.h>
# include <avr/interrupt.h>

int pulsos = 13;
int contador =0;
int estadoAnterior =0;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pulsos, INPUT);
  E1i();
  TCCR1A=0;
  TCCR1B=0;

  OCR1A = 15624;
  TCCR1B |= (1<<WGM12);

  TCCR1B |= (1<<CS10);
  TCCR1B |= (1<<CS12);

  TIMSK1 =(1<<OCIE1A);
  sei();
}

void loop(){
```

```
int lectura = digitalRead(pulsos);
if (lectura != estadoAnterior){
  if (lectura == HIGH){
    contador ++;
  }
}
estadoAnterior = lectura;
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect){
  float rpm = contador*3;
  Serial.println(rpm);
  contador =0;
}
}
```

Fig.35 Código IDE para cálculo de la velocidad de rotación n. Diseño de autores

D. Cálculo de la potencia eléctrica consumida P y la potencia de freno de la turbina P_T

La potencia eléctrica suministrada (P) y la potencia de freno de la turbina (PT), se obtienen manualmente utilizando las expresiones (1) y (2), descritas anteriormente.

E. Visualización de datos

El nodo de visualización contará con una pantalla LCD [29], en donde, se presentará las variables: H, Q y n.

F. Simulación del funcionamiento del nodo de procesamiento

Para validar el diseño del nodo de procesamiento de señales, se decidió simular el funcionamiento, utilizando los recursos de la aplicación de software ISIS Proteus 6.0.1. Se construyó un modelo constituido por 3 etapas: adquisición de datos, procesamiento, y, visualización (ver Fig.36). La etapa de adquisición de data se diseñó de forma tal que, los valores a adquirir por los sensores sean representados por valores aleatorios, obtenidos en los potenciómetros.

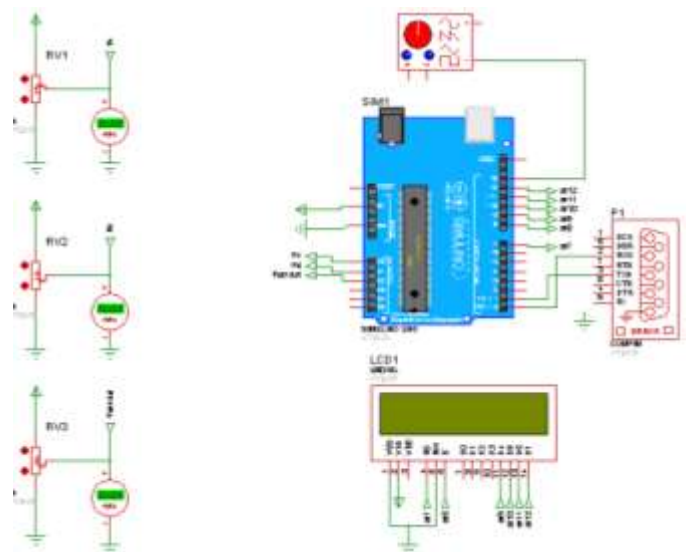


Fig.36 Esquema implementado en Proteus para la simulación del funcionamiento del nodo de procesamiento. [Elaborado por los autores].

Los resultados de la simulación del funcionamiento del nodo de procesamiento demostraron su funcionalidad. Adicionalmente, se identificó la necesidad de expresar el caudal Q en l/s (en lugar de m^3/s).

G. Construcción de las curvas características en un PC estándar

Una vez obtenidos los valores para cada una de las variables que intervienen en la construcción de las curvas características, estos podrán ser enviados a un computador vía comunicación serial, empleando una interfaz programada en Java (ver Fig.37) preparada con Netbeans 8.0.2 [30], desde dónde se exportará a Excel.

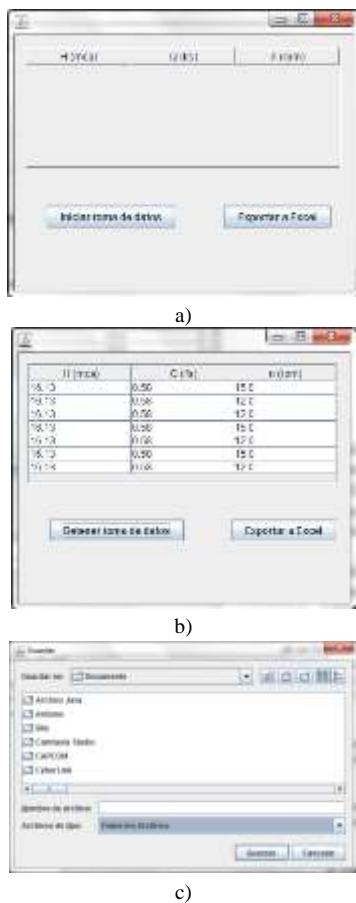


Fig.37 a) Interfaz gráfica diseñada para exportar datos a Excel. b) Proceso de adquisición de datos. c) Exportación de datos a Excel. [Elaborado por los autores].

La funcionalidad de la interfaz se probó empleando los recursos del Virtual Serial Port Emulator. Las variables se enviaron con un espacio de 10 ms.

XI. CONCLUSIONES

- Como resultado de la etapa de selección de instrumentación requerida para el estudio de bombas centrífugas y turbinas Pelton y Turgo, se ha complementado la rehabilitación y adecuación del banco

de banco de pruebas Armfield, ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil de la UTPL.

- En función de la no disponibilidad de recursos, las etapas de implementación y evaluación se posponen.

XII. REFERENCIAS

- [1] J. Jaramillo, A. Uchuari. (2013). “Rehabilitación de un banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas”. (Trabajo de Fin de Titulación), Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, UTPL.
- [2] Ingeniería mecánica (2011). “Curvas características de una bomba centrífuga” [En línea]: Disponible en: <<https://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-a-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-i/>> [Consultado el 28 de febrero de 2014]
- [3] Laplace, Departamento de Física Aplicada III, Universidad de Sevilla, “Tubo de Venturi” [En línea]: Disponible en: <http://laplace.us.es/wiki/index.php/Tubo_de_Venturi> [Consultado el 28 de febrero de 2014]
- [4] Prácticas de turbinas hidráulicas, Laboratorio de mecánica de fluidos, “Curvas características de una turbina Pelton” [En línea]: Disponible en: <https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/375/51418/1/Documento16.pdf> [Consultado el 1 de Marzo de 2014]
- [5] Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, Pedro Fernández Díez, “Turbinas Hidráulicas”, [En línea]: Disponible en: <http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf> [Consultado el 1 de Marzo de 2014]
- [6] Atmospheric Fan System. “Triángulos de velocidad a la entrada y salida de un rodete centrífugo”, [Online]: disponible en: <<http://www.extractores.com.mx/centrifugos.htm#sthash.Y1veXPQ.dpbs>> [Consultado el 5 de Marzo de 2014]
- [7] Máquina de fluidos, M. Pilar González Marcos, Febrero del 2009, “Turbinas Pelton”, [Online]: Disponible en: <http://cvb.ehu.es/open_course_ware/castellano/tecnicas/maquinas_fluidos/tema-6-turbinas-pelton.pdf> [Consultado el 5 de Marzo de 2014]
- [8] Máquinas hidráulicas, “Turbinas”; [En línea]: Disponible en: <<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/turbinas/turbinas.html>> [Consultado el 5 de Marzo de 2014]
- [9] Centrales hidráulicas, Ismael Suescún Monsalve, “Turbinas Hidráulicas” [En línea]: Disponible en: <<http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/files/capitulo%204.pdf>> [Consulta Marzo 2014]
- [10] R. Valdez, «Manual de hidráulica,» Slideshare, 4 Abril 2011. [En línea]: Disponible en: <http://es.slideshare.net/laloktrin/manual-hidraulica>. [Consulta Julio 2014].
- [11] Grupos de Bombeo. Universidad de Sevilla “Altura de elevación. Geométrica y manométrica” [En línea]: Disponible en: <<http://ocwus.us.es/ingenieria->

- agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%207.%20Bombas/tutorial_02.htm> [Consulta Julio 2014]
- [12] «Metro de columna de agua, presión,» CONVERTWORLD.COM, [En línea]. Available: <http://www.convertworld.com/es/presion/Metro+de+agua.html>. [Consulta Julio 2014].
- [13] IFM, Sensor de presión de vacío [En línea]: Disponible en: <<http://www.heattracing.co.uk/upload/ifm-PA3029-Pressure-Transmitter-Pressure-Sensor-Highly-Stable-Pressure-Transmitter-High-Accuracy-Pressure-Transmitter-ifm-PA3029.pdf>> [Consulta Agosto 2014].
- [14] OMEGA, Sensor presión de vacío [En línea]: Disponible en: http://www.omega.com/pptst/PX409_VAC.html. [Consulta Agosto 2014].
- [15] OMEGA, [En línea]: Disponible en: <http://www.omega.com/pptst/PX309-100mv.html>. [Consulta Agosto 2014].
- [16] WIKA, [En línea]: Disponible en: <http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/000/SCX15DNC-pdf.php>. [Consulta Agosto 2014].
- [17] R. Cabrera, «Densidad y peso específico,» [En línea]: Disponible en: http://neuro.qi.fcen.uba.ar/ricuti/No_me_salen/FLUIDOS/FT_densidad.html. [Consulta Julio 2014].
- [18] V. M. Izaguirre, «El tubo de Venturi,» Prezi, 9 Mayo 2014. [En línea]: Disponible en: <http://prezi.com/0fh5dr11up5l/el-tubo-de-venturi/>. [Consulta Julio 2014].
- [19] OMEGA, [En línea]: Disponible en: <http://www.omega.com/pptst/PX137.html>. [Consulta Agosto 2014].
- [20] SENSIRION, [En línea]: Disponible en:<<http://www.directindustry.es/prod/sensirion/sensores-presion-diferencial-salida-analogica-15453-492931.html>>. [Consulta Agosto 2014].
- [21] Motores Trifásicos de inducción, Generalidades [En línea]: Disponible en: <http://prof.usb.ve/jaller/Guia_Maq_pdf/cat_motores_ind.pdf> [Consulta Agosto 2014]
- [22] Ohmímetros, resistor Shunt [En línea]: Disponible en: <<http://www.amperis.com/productos/ohmímetros/>> [Consulta Agosto 2014]
- [23] «Mecánica de fluidos,» Slideshare, 12 mayo 2011. [En línea]: Disponible en: <http://es.slideshare.net/mecanicadefluidos/bombas-centrifugas-7934169>. [Consulta Octubre 2014].
- [24] Módulo de velocidad HC-020K, Deal Extreme, Agosto 2013. [En línea]. Disponible en:<http://www.dx.com/es/p/hc-020k-double-speed-measuring-module-w-photoelectric-encoders-black-green-2-pcs-219416#.U_x-No1RXX8>. [Consulta Noviembre 2014].
- [25] Electrónica Básica, Fuentes de alimentación [En línea]: Disponible: <http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_electronica_3/electronica_indice.html> [Consulta Diciembre 2014]
- [26] «Arduino MEGA2560» Arduino, [En línea]. Disponible en: <<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>> [Consulta Diciembre 2014]
- [27] «IDE Software de Arduino» Arduino. [En línea]. Disponible en: <<http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=main/software>> [Consulta Diciembre 2014]
- [28] «OP AMP» Arquitectura no inversora. [En línea]. Disponible en: <<http://amplificadoroperacional.blogspot.com/2010/05/el-amplificador-operacional.html>> [Consulta Enero 2015]
- [29] LCD Conexión LCD y Arduino. [En línea]. Available: <http://gld-arduino.googlecode.com/svn/trunk/gld/build/doc> [Consulta Enero 2015]
- [30] NetBeans IDE [En línea]. Disponible en: <<https://netbeans.org/>> [Consulta Enero 2015]