



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

**TITULACIÓN DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**Rehabilitación de un banco de pruebas para estudio de bombas centrífugas
y adecuación del banco para el estudio de turbinas tipo turgo**

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTOR: Uchuay Jiménez, Ángel Daniel.

DIRECTOR: Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, Ing.

LOJA – ECUADOR

2013

CERTIFICACIÓN

Ingeniero.

Jorge Luis Jaramillo Pacheco

DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

C E R T I F I C A:

Que el presente trabajo, denominado: "Rehabilitación de un banco de pruebas para estudio de bombas centrífugas y adecuación del banco para el estudio de turbinas tipo turgo" realizado por el profesional en formación: Ángel Daniel Uchuay Jiménez; cumple con los requisitos establecidos en las normas generales para la Graduación en la Universidad Técnica Particular de Loja, tanto en el aspecto de forma como de contenido, por lo cual me permito autorizar su presentación para los fines pertinentes.

Loja, Octubre de 2013

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo, Ángel Daniel Uchuay Jiménez, declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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: Uchuay Jiménez, Ángel Daniel
Cédula: 1104279813

DEDICATORIA

Éste logro se lo dedico con todo mi afecto a mi madre, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor; A mi padre, por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre y por el valor mostrado para salir adelante; A mis hermanos mayores por ser el ejemplo de mi vida y de la cual aprendí de aciertos y de momentos difíciles; a mi hermano Carlos que me ha acompañado por toda la etapa de mi vida universitaria y por ser siempre la persona que me ha apoyado; a mis familiares por ser una bendición en mi vida; a mis amigos y compañeros que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otros en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde estén o si alguna vez llegan a leer esto quiero darles gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

El mayor agradecimiento a mis padres, por el esfuerzo que hicieron para darme una profesión y formar en mí, una persona de bien, gracias por todos los sacrificios y la paciencia que demostraron todos estos años de mi vida universitaria.

De manera especial al Ing. Jorge Luis Jaramillo por ser un gran mentor y guía durante el desarrollo de esta tesis. A mi grupo de amigos por haber compartido conmigo estos últimos 6 años, de amistad y camaradería, gracias por las horas de compañía. Nombrar sería muy extenso y podría cometer algún olvido injusto, por ello, ¡Gracias, amigos, por estar ahí!

Daniel

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARATULA	i
CERTIFICACIÓN.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	II
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	xi
RESUMEN EJECUTIVO	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 1	6
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LAS TURBINAS UTILIZADAS EN PROYECTOS DE HIDROGENERACIÓN.....	6
1.1 Introducción.....	7
1.2 Turbinas hidráulicas.....	7
1.2.1 Generalidades.....	7
1.2.2 Clasificación.	9
1.2.2.1 Por la variación de presión del agua en el rodete.....	9
1.2.2.2 Por la dirección de entrada del agua en la turbina.	10
1.2.2.3 Por la disposición del eje de giro.....	11
1.2.3 Turbinas hidráulicas de uso frecuente.	11
1.2.3.1Turbinas pelton.....	11
1.2.3.2Turbinas turgo.....	12
1.2.3.3Turbinas francis.....	13
1.2.3.4Turbinas kaplan.....	13
1.3 Operación de las turbinas hidráulicas en sistemas de generación de energía eléctrica	14
1.3.1 Movimiento del agua en las turbinas.....	14
1.3.2 Velocidad de sincronía en la hidrogenación de energía eléctrica.....	15
1.3.3 Velocidad de embalamiento del grupo turbina – generador.....	15
1.3.4 Rendimiento de las turbinas hidráulicas	16
1.3.5 Multiplicadores de velocidad.....	17
1.3.6 Particularidades de la turbina tipo turgo para la hidrogenación	18

CAPÍTULO 2	20
PROPUESTA DE ADECUACIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS	20
2.1 Introducción	21
2.2 Generalidades de las bombas hidráulicas	21
2.2.1 Sobre las bombas centrífugas.....	21
2.2.2 Parámetros básicos de las bombas centrífugas.....	23
2.2.3 Curvas características de las bombas centrífugas.	23
2.3 Generalidades del banco de pruebas Armfield.....	24
2.4 Adecuación y actualización del banco de pruebas	26
2.4.1 Propuesta de adecuación del banco de pruebas para incluir la variabilidad del ángulo de inyección.....	26
CAPÍTULO 3	29
REHABILITACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	29
3.1 Introducción	30
3.2 Rehabilitación del banco de pruebas de bombas centrífugas	30
3.2.1 Características generales del banco a rehabilitar.	30
3.2.2 Evaluación inicial del estado del banco.	31
3.2.3 Plan general de rehabilitación del banco.....	34
3.2.3.1 Tuberías.....	35
3.2.3.2 Válvula de pie.	36
3.2.3.3 Bomba centrífuga.....	37
3.2.3.4 Motor eléctrico	38
3.2.3.5 Variador de frecuencia	39
CAPÍTULO 4	45
ADECUACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS PARA EL ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE TURBINAS TIPO TURGO.....	45
4.1 Introducción.....	46
4.2 Modificación del banco de pruebas para el estudio del desempeño de turbinas tipo turgo.....	46
4.2.1 Variación del ángulo de inyección.	46
4.2.2 Diferenciación de la forma y disposición de álabes	48
CONCLUSIONES.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXO 1	60

PAPER: Rehabilitación de un banco de pruebas para estudio de bombas centrífugas y adecuación del banco para el estudio de turbinas tipo turgo		60
I.	INTRODUCCIÓN	61
II.	TURBINAS HIDRÁULICAS	61
A.	Generalidades	61
B.	Turbinas hidráulicas de uso frecuente	62
III.	PARTICULARIDADES DE LA TURBINA TIPO TURGO PARA LA HIDROGENERACIÓN	63
IV.	GENERALIDADES DE LAS BOMBAS HIDRÁULICAS	63
A.	Sobre las bombas centrífugas	63
B.	Curvas características de las bombas centrífugas.....	63
V.	GENERALIDADES DEL BANCO DE PRUEBAS ARMFIELD	64
VI.	REHABILITACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	65
A.	Evaluación inicial del estado del banco.....	65
B.	Plan general de rehabilitación del banco.....	66
VII.	MODIFICACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE TURBINAS TIPO TURGO.....	69
A.	Variación del ángulo de inyección	69
B.	Diferenciación de la forma y disposición de álabes	70
VIII.	CONCLUSIONES	72
IX.	REFERENCIAS.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema general de una turbina hidráulica.....	8
Figura 1.2. Turbinas de acción y reacción.....	9
Figura 1.3. Turbina axial.....	10
Figura 1.4. Turbina radial.....	10
Figura 1.5. Turbina tangencial.....	11
Figura 1.6. Turbina pelton.....	12
Figura 1.7. Turbina pelton.....	12
Figura 1.8. Turbina francis.....	13
Figura 1.9. Turbina kaplan.....	13
Figura 1.10. Nomenclatura de los triángulos de velocidades para describir el movimiento del agua en las turbinas hidráulicas.....	14
Figura 1.11. Velocidad de embalamiento del grupo turbina - generador.....	16
Figura 1.12. Multiplicador de correa.....	18
Figura 2.1. Elementos constituyentes de una bomba centrífuga.....	22
Figura 2.2. Curva característica de una bomba centrífuga.....	23
Figura 2.3. Comportamiento de un conjunto sistema - bomba, enfatizando en el punto de operación de la bomba.....	24
Figura 2.4. Banco de pruebas de bombas centrífugas fabricado por Armfield.....	24
Figura 2.5. Curvas características de la bomba en el banco de pruebas de Armfield.....	25
Figura 2.6. Esquema de los elementos del banco de prueba de la bomba centrífuga.....	25
Figura 2.7. Estructura del bloque para experimentación de la turbina tipo Pelton, instalado en el banco de pruebas. Fotografía de autores.....	26
Figura 2.8. (a) Vista frontal del inyector, (b) Vista lateral del inyector. Ubicación del inyector en el banco de pruebas. Fotografías de autores.....	27
Figura 2.9. Tuberías de alimentación al inyector. Fotografía de autores.....	27
Figura 2.10. Vista superior del diseño del riel en el módulo.....	28
Figura 3.1. Esquema de elementos del banco de prueba de la bomba centrífuga.	31
Figura 3.2. Vista general del banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas, al momento de la inspección inicial. Fotografía de autores.....	31
Figura 3.3. Estado inicial de la válvula de pie, a la entrada de la bomba. Fotografía de autores.....	32
Figura 3.4. Vista frontal de la tubería durante la inspección inicial. Fotografía de autores.....	32
Figura 3.5. Vista frontal de la tubería durante la inspección inicial. Fotografía de autores.....	32
Figura 3.6. Estado de la cámara de la bomba centrífuga con oxido en su interior. Fotografía de autores.....	33
Figura 3.7. Vista general del motor del banco de pruebas, durante la inspección inicial. Fotografía de autores.....	33

Figura 3.8. Vista interior del variador de frecuencia al momento de la inspección inicial. Fotografía de autores.	34
Figura 3.9. Vista interior del transformador al momento de la inspección inicial. Fotografía de autores.	34
Figura 3.10. Flujograma de trabajo. Diseño de autores.	35
Figura 3.11. Tuberías con oxido en las paredes. Fotografía de autores.	35
Figura 3.12. Tuberías luego del proceso de limpieza. Fotografía de autores.	36
Figura 3.13. Válvulas de pie (antigua y nueva). Fotografía de autores.	36
Figura 3.14. Instalación de la válvula de pie en el circuito de aspiración de la bomba. Fotografía de autores.	36
Figura 3.15. Vista frontal de la cámara del rodete de la bomba centrífuga. Fotografía de autores.	37
Figura 3.16. Limpieza y remoción del empaque de la cámara del rodete. Fotografía de autores.	37
Figura 3.17. Cámara del rodete de la bomba centrífuga, abierta. Se observa los efectos de la acumulación de óxido. Fotografía de autores.	37
Figura 3.18. Instalación de la nueva cubierta de la cámara del rodete de la bomba centrífuga. Fotografía de autores.	38
Figura 3.19. Motor original del banco de pruebas con sistema de medición del torque. Fotografía de autores.	38
Figura 3.20. Variación de la geometría de los motores original y de reemplazo. Fotografía de autores.	39
Figura 3.21. Instalación del nuevo motor en el banco de pruebas. Fotografía de autores.	39
Figura 3.22. Vista lateral del variador de frecuencia original. Fotografía de autores.	40
Figura 3.23. (a) Esquema de conexión y bornes de variador (b) Diagrama de conexión Motor-variador.	41
Figura 3.24. Instalación del variador de frecuencia en el banco de pruebas. a) Vista interior de la caja metálica del variador, b) Vista lateral del variador instalado. Fotografía de autores.	42
Figura 3.25. Vista frontal del banco de pruebas de bombas centrífugas rehabilitado. Fotografía de autores.	44
Figura 4.1. Vista general del banco de pruebas de bombas centrífugas. En la parte superior se aprecia la posición del inyector y de la campana. Fotografía de autores.	47
Figura 4.2. Propuesta de adecuación requerida para variar la posición de la campana respecto al inyector. (a) Vista inferior de la campana, (b) Vista superior del módulo. Fotografía de autores.	47
Figura 4.3. Adecuación realizada para variar la posición de la campana respecto al inyector. (a) Vista inferior de la campana, (b) Vista superior del módulo. Fotografía de autores.	48
Figura 4.4. Alabes de turbinas de acción. (a) Para turbinas Pelton, (b) para turbinas turgo.	49

Figura 4.5. Turbina tipo Pelton, instalada en la campana del banco de pruebas.	49
Figura 4.6. Turbina tipo Pelton existente en el banco de pruebas.	49
Figura 4.7. Moldes de madera de los elementos de la turbina tipo Pelton existente en el banco de pruebas. (a) Álabe, (b) Disco.	50
Figura 4.8. Elementos de la turbina tipo turgo listos para ensamblaje.	51
Figura 4.9. División del disco de la turbina turgo.	51
Figura 4.10. Ensamblaje de los álabes al disco.	51
Figura 4.11. Turbinas turgo construidas.	52
Figura 4.12. Turbinas Pelton y turgo a operar en el banco de pruebas.	52
Figura 4.13. Turbina turgo montada en la campana del banco de pruebas.	53
Figura 4.14. Turbina turgo montada en la campana del banco de pruebas y lista para experimentación.	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Relación entre la velocidad embalamiento (n_{max}) y la velocidad nominal (n).....	16
Tabla 1.2 Rendimientos típicos de pequeñas turbinas.....	17
Tabla 3.1. Características técnicas del variador G110 Siemens.....	40
Tabla 3.2. Interface de programación del variador G110 Siemens	42
Tabla 3.3. Parámetros y características de programación del variador G110 Siemens.....	43
Tabla 3.4. Parámetros introducidos en el variador G110 Siemens	43

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente trabajo se describe el proceso de rehabilitación de un banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas, existente en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL; y, la adecuación del mismo banco para la experimentación de turbinas tipo turgo.

PALABRAS CLAVES: estudio de bombas centrífugas, estudio de turbinas tipo turgo.

ABSTRACT

This document describes the process of rehabilitation of a testing bench for the study of centrifugal pumps that exist at the Hydraulics Laboratory of the Department of Geology, Mines, and Civil Engineering of the UTPL, and the adequacy of the same testing bench for the experimentation of turgo turbines.

KEYWORDS: centrifugal pumps study, turgo turbines study.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la iniciativa de incorporar fuentes renovables, en forma experimental, al sistema de provisión de energía del campus universitario San Cayetano de la UTPL, un papel importante juegan las aplicaciones de hidrogenación.

El diseño de estas aplicaciones, 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 del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil; y, posteriormente modificarlo para posibilitar el estudio del desempeño de turbinas tipo turgo.

Para atender los requerimientos planteados para la rehabilitación y adecuación del banco de pruebas, se conformó un equipo de trabajo entre técnicos de la Sección de Energía y Electricidad SEE del Departamento de Ciencias de la Computación DCCE, del Departamento de Infraestructura de la UTPL, y, un tesista de la titulación de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones.

En las instalaciones hidroeléctricas habituales, las turbinas hidráulicas aprovechan la energía potencial y cinética del agua. En estas instalaciones, en uso extensivo se encuentran turbinas tipo Pelton, Kaplan, o, Francis, “especializadas” para determinadas combinaciones de salto y caudal. Por su parte, una turbina turgo aprovecha la energía cinética proveniente de un inyector, cuyo ángulo de incidencia varía entre 15° a 22° , respecto al plano diametral del rodete.

Desde esta perspectiva, se requiere entonces modificar el banco de pruebas para lograr incluir la variabilidad del ángulo de incidencia del chorro proveniente del inyector. Adicionalmente, se necesita diseñar y construir una turbina tipo turgo experimental, inexistente en el banco.

Este trabajo se estructuró en cuatro capítulos. Los tres primeros se enfocan en el análisis comparativo de las turbinas, propuesta de adecuación y actualización, y en la rehabilitación de un banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas respectivamente, mientras que en el último capítulo se detalla la adecuación de un banco de pruebas de bombas centrífugas para el estudio del desempeño de turbinas tipo turgo.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Rehabilitar un banco de pruebas para estudio de bombas centrífugas, y adecuar el banco para el estudio de turbinas tipo turgo.

Objetivos específicos

- Analizar y comparar el desempeño de las turbinas que se utilizan en los diferentes proyectos de hidrogenación.
- Realizar una propuesta de adecuación y actualización de un banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas
- Rehabilitar un banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas, existente en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL.
- Adecuar un banco de pruebas de bombas centrífugas para el estudio del desempeño de turbinas tipo turgo

CAPÍTULO 1
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LAS TURBINAS UTILIZADAS
EN PROYECTOS DE HIDROGENERACIÓN

1.1 Introducción

En un intento constante por disminuir la emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera durante la generación de energía, un papel importante juega el aprovechamiento de fuentes renovables, como el agua.

Como un primer paso para abordar la hidrogenación de energía, se requiere entender el principio de funcionamiento y las características principales de las turbinas empleadas para “atrapar” la energía del agua.

Como parte de una amplia iniciativa para el aprovechamiento de energía de fuentes renovables en el Campus San Cayetano de la Universidad Técnica Particular de Loja, en este trabajo se aborda el análisis comparativo de los distintos tipos de turbina empleados en sistemas de hidrogenación, con énfasis en las turbinas tipo turgo, sobre las que ha planteado montar un banco de pruebas demostrativo.

1.2 Turbinas hidráulicas

A partir del siglo XIX, en plena revolución industrial, el incremento de la demanda energética de la industria, llevó a la implementación de un número cada vez mayor de centrales de hidrogenación, por lo que las turbinas hidráulicas se convirtieron en una solución de ingeniería de uso masivo [1].

La competencia entre las compañías dedicadas al diseño y construcción de turbinas, permitió acumular experiencia, optimizar diseños, y dictar la desaparición de modelos de bajo performance (como sucedió con las turbinas centrífugas). Por lo tanto, las turbinas hidráulicas de uso en la actualidad, son el resultado de un largo proceso de selección histórica, en el que se ha demostrado que las turbinas de una particular geometría, son óptimas por rendimiento para ciertas condiciones de operación [2].

1.2.1 Generalidades.

Una turbina hidráulica es una turbo máquina motora, y, se puede identificar 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.

Exceptuando las máquinas diseñadas especialmente para trabajar como bomba y como turbina, la reversibilidad de las bombas y las turbinas es poco real, y, suele conllevar rendimientos muy bajos, y, a veces nulos [3].

Una turbina hidráulica se compone de tres elementos que, el fluido atraviesa sucesivamente: el distribuidor, el rodete, y, el difusor (ver Fig. 1.1) [1].

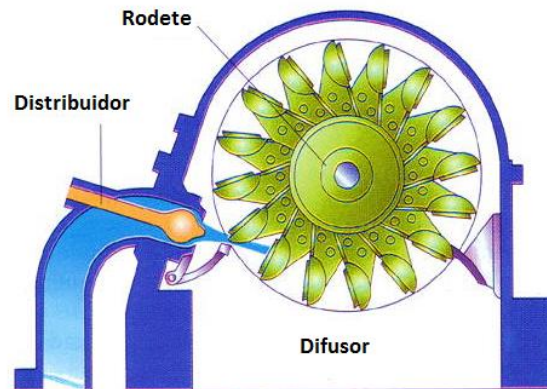


Figura 1.1 Esquema general de una turbina hidráulica.

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

El 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.

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 una 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 [1].

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.

1.2.2 Clasificación.

1.2.2.1 Por la variación de presión del agua en el rodete.

De acuerdo a que la presión del agua, varíe o no en el rodete, las turbinas se clasifican en [1]:

- Turbinas de acción o impulsión
- Turbinas de reacción o sobrepresión

En las **turbinas de acción**, el agua sale del distribuidor a presión atmosférica, y, llega al rodete con la misma presión. En estas turbinas toda la energía potencial del salto, se transmite al rodete, en forma de energía cinética.

En las **turbinas de reacción**, el agua sale del distribuidor con una cierta presión, que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa los álabes del rodete, de tal forma que, a la salida, la presión puede ser nula o incluso negativa. En estas turbinas, el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete, por lo que la energía potencial del salto se transforma en energía cinética, y, en energía de presión [1].

En las turbinas de acción, el empuje y la acción del agua coinciden, mientras que, en las turbinas de reacción, el empuje y la acción del agua son opuestos (ver Fig. 1.2). El empuje es consecuencia de la diferencia de velocidades del agua en la entrada y en la salida del rodete [4].

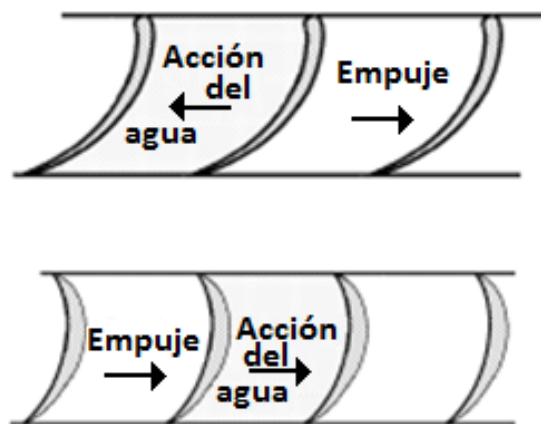


Figura 1.2. Turbinas de acción y reacción.

1.2.2.2 *Por la dirección de entrada del agua en la turbina.*

De acuerdo a este criterio, las turbinas se clasifican en [5]:

- Axiales
- Radiales (centrípetas y centrífugas)
- Mixtas
- Tangenciales

En las **turbinas axiales** (tipo Kaplan, hélice, tipo bulbo), el agua entra paralelamente al eje de la turbina (ver Fig. 1.3).

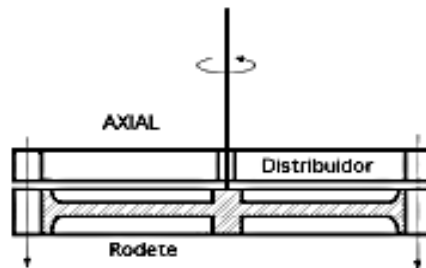


Figura 1.3. Turbina axial.

Fuente:http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/GUIDES/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_ES_02.pdf

En las **turbinas radiales**, el agua entra perpendicularmente al eje de la turbina (ver Fig.1.4). Las turbinas radiales son centrífugas, si el agua fluye de adentro hacia afuera, y son centrípetas (Francis), si el agua fluye de afuera hacia adentro.

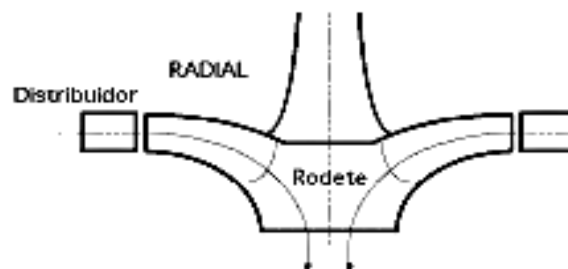


Figura 1.4. Turbina radial.

Fuente:http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/GUIDES/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_ES_02.pdf

Las turbinas **mixtas** combinan las axiales y radiales, mientras que en las **turbinas tangenciales**, el agua entra en forma lateral o tangencial (Pelton) contra las palas, cangilones, o, cucharas de la rueda (ver Fig.1.5).

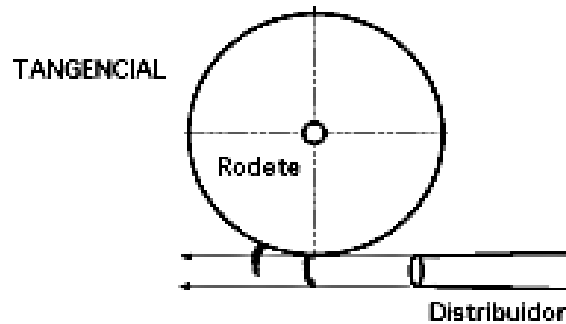


Figura 1.5. Turbina tangencial.

Fuente:http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/GUIDES/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_ES_02.pdf

1.2.2.3 Por la disposición del eje de giro.

Atendiendo a la disposición del eje de giro, las turbinas hidráulicas se clasifican en:

- Turbinas de eje horizontal
- Turbinas de eje vertical

1.2.3 Turbinas hidráulicas de uso frecuente.

1.2.3.1 Turbinas pelton.

Son turbinas de acción, donde el distribuidor transforma la energía de presión del agua en energía cinética. Cada distribuidor produce un chorro, cuyo caudal se regula mediante un inyector [6].

El distribuidor en este tipo de turbinas incide tangencialmente en el rodete, donde los álabes constan de un deflector cuya misión es desviar el chorro a los dos cangilones de cada álabe de la turbina, comúnmente se utilizan en saltos de agua entre 40 a 1200 m (ver Fig.1.6).



Figura 1.6. Turbina pelton.

Fuente: <http://www.cmchydro.es/turbina-pelton.php>

1.2.3.2 Turbinas turgo.

La turbina Turgo puede trabajar en saltos con alturas comprendidas entre 15 y 300 metros. Al igual que la turbina Pelton, se trata de una turbina de acción, pero a diferencia de esta sus álabes tienen una distinta forma y disposición (ver Fig.1.7).

La característica principal de la turbina turgo es que el chorro incide con un ángulo que varía de 15° - 22° respecto al plano diametral del rodete, además, el chorro incide sobre varios alabes, de forma semejante a como lo hace el fluido en una turbina de vapor [3].



Figura 1.7. Turbina pelton.

Fuente: <http://www.tuscanywind.com/Rotore%20Turbina%20Turgo%20in%20Acciaio%20inossidabile%2024%20pale>

1.2.3.3 *Turbinas francis.*

Son turbinas de reacción de flujo radial y admisión total, muy utilizadas en saltos de altura media comprendida entre 20 y 800 m, equipadas con un distribuidor de álabes regulables y un rodete de alabes fijos [6].

En las turbinas Francis, los álabes distribuidores que regulan el caudal de agua que entra al rodete giran accionados mediante bielas (ver Fig.1.8), que a su vez son accionadas por un anillo exterior que sincroniza su movimiento [1].



Figura 1.8. Turbina francis.

Fuente: <http://www.cmchydro.es/turbina-pelton.php>

1.2.3.4 *Turbinas kaplan.*

Las turbinas tipo Kaplan, se clasifican entre las de reacción de flujo axial (ver Fig.1.9). En una turbina “verdadera” tipo Kaplan, los álabes del distribuidor y del rodete son fijos, mientras que en una turbina semi_Kaplan, sólo son regulables los álabes del rodete [6].



Figura 1.9. Turbina kaplan

Fuente: <http://www.cmchydro.es/turbina-pelton.php>

1.3 Operación de las turbinas hidráulicas en sistemas de generación de energía eléctrica

1.3.1 Movimiento del agua en las turbinas

Para analizar el movimiento del agua en las turbinas, se utiliza una nomenclatura universal basada en triángulos de velocidad a la entrada y a la salida del rodete [1] (ver Fig.1.10). La nomenclatura incluye el uso de subíndices. El subíndice 0, se emplea para hacer referencia a la entrada del agua en la corona directriz o distribuidor. El subíndice 1, se refiere a la entrada del agua en el rodete. El subíndice 2, se emplea para señalar la salida del agua desde el rodete. El subíndice 3, puntualiza la salida del agua desde el tubo de aspiración.

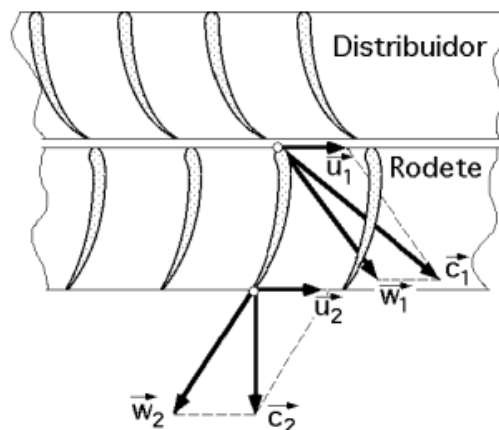


Figura 1.10. Nomenclatura de los triángulos de velocidades para describir el movimiento del agua en las turbinas hidráulicas.

Fuente: <http://libros.redsauce.net/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/01Turb.Hidr.pd>

\vec{u} , velocidad tangencial o periférica de la rueda

\vec{c} , velocidad absoluta del agua

\vec{w} , velocidad relativa del agua

α , ángulo formado por las velocidades \vec{u} y \vec{c}

β , ángulo formado por las velocidades \vec{u} y \vec{w}

El agua entra en el distribuidor con una velocidad \vec{c}_0 , y, sale del mismo con una velocidad \vec{c}_1 ; encontrándose con el rodete que se mueve ante ella con una velocidad tangencial \vec{u}_1 (para condiciones normales de trabajo). El agua que sale del distribuidor, penetra en el rodete con una velocidad absoluta \vec{c}_1 , bajo un ángulo α_1 . La velocidad relativa del agua \vec{w}_1 , forma un ángulo β_1 (correspondiente al ángulo del álabe a la entrada) con la velocidad periférica \vec{u}_1 . La velocidad relativa del agua a lo largo del álabe es, en todo momento, tangente al mismo.

El agua sale del rodete con una velocidad absoluta \vec{c}_2 , siendo \vec{w}_2 y \vec{u}_2 las velocidades relativa y tangencial, respectivamente.

1.3.2 Velocidad de sincronía en la hidrogenación de energía eléctrica

En las centrales de hidrogenación, la turbina hidráulica va acoplada a un alternador (generador) que debe generar electricidad a una determinada frecuencia (60 Hz en Ecuador), por lo que la velocidad de la turbina debe ser tal que, conjugada con el número de pares de polos del alternador, produzca la frecuencia requerida [5].

La expresión (1) muestra la relación existente entre la velocidad n del alternador, el número de pares de polos z del alternador, y, la frecuencia f de la corriente generada [5].

$$f = \frac{z \cdot n}{60} \quad (1.1)$$

Para una frecuencia de 60 ciclos por segundo, el producto $z \cdot n$ tiene un valor de 3600. Las velocidades que, considerando el número de pares de polos, permiten cumplir con la condición planteada, se llaman **velocidades sincrónicas**.

Así, por ejemplo, una turbina acoplada directamente a un alternador, puede desarrollar un conjunto de velocidades sincrónicas. Para $z = 1$, la velocidad sincrónica es de $n = 3.600$ rpm. Para $z = 2$, $n = 1.800$ rpm. Para $z = 3$, $n = 1.200$ rpm. Y, para $z = 4$, $n = 900$ rpm.

1.3.3 Velocidad de embalamiento del grupo turbina – generador

La velocidad de embalamiento, es la máxima velocidad adquirida por el eje del grupo turbina - generador, al pasar rápidamente del estado de carga plena al de carga en vacío (ver Fig.1.11) [5]. Cuando la turbina adquiere la velocidad de embalamiento, posee un rendimiento nulo y no proporciona potencia.

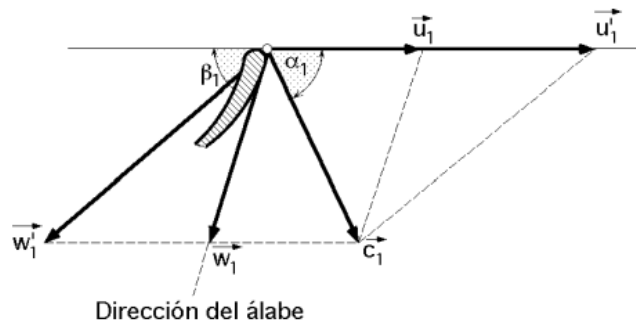


Figura 1.11. Velocidad de embalamiento del grupo turbina - generador

Fuente: <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/1480/1/Tesis%20-%20Respaldo1hidomecanica.pdf>

Esta velocidad de embalamiento varía en función del tipo de turbina, del ángulo de apertura del distribuidor, y, de la altura de salto. La Tabla 1.1, muestra la relación existente entre la velocidad de embalamiento y la velocidad nominal de rotación, para varios tipos de turbinas.

Tabla 1.1 Relación entre la velocidad embalamiento (n_{max}) y la velocidad nominal (n).

Tipo de turbina	n_{max}/n
Kaplan simple regulación	2,0-2,6
Kaplan doble regulación	2,8-3,2
Francis	1,6-2,2
Pelton	1,8-1,9
Turgo	1,8-1,9

Fuente: http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/GUIDE/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_ES_02.pdf.

Se debe considerar que al aumentar la velocidad de embalamiento, se encarecen el multiplicador y el generador, que habrán de diseñarse para resistir las fuerzas de aceleración centrífuga correspondientes [3].

1.3.4 Rendimiento de las turbinas hidráulicas

El rendimiento garantizado por los fabricantes de turbinas, se basa en el *international standard for the field acceptance tests of hydraulic turbines*, publicación IEC-60041, o, cuando es aplicable, en *el international standard for model acceptance tests*, publicación IEC-60193. La Tabla 1.2, muestra el rendimiento máximo garantizado para varios tipos de turbinas.

Tabla 1.2 Rendimientos típicos de pequeñas turbinas.

Tipo de turbina	Mejor rendimiento
Kaplan simple regulación	0,91
Kaplan doble regulación	0,93
Francis	0,94
Pelton 1 tobera	0,90
Pelton n toberas	0,89
Turgo	0,85

Fuente:http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/GUIDE/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_ES_02.pdf.

El rendimiento de una turbina hidráulica, se define como la relación entre la potencia mecánica transmitida al eje de la turbina, y, la potencia hidráulica correspondiente al caudal nominal y al salto nominal, tal como lo muestra la ecuación (1.2).

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_h} \quad (1.2)$$

En las turbinas de acción, tipo Pelton y Turgo, para evitar que el rodete quede sumergido, la altura del salto se mide hasta el punto de impacto del chorro, con lo que se pierde una cierta altura con respecto a las turbinas de reacción, en las que el plano de referencia es la propia lámina de agua.

Las pérdidas en las turbinas, son esencialmente por fricción y se presentan en la cámara espiral, en los álabes directores y del rodete, y, sobre todo, en el tubo difusor.

El rendimiento global del sistema de hidrogenación eléctrica, se obtiene al multiplicar el rendimiento de la turbina, el rendimiento del multiplicador, y, el rendimiento del generador.

1.3.5 Multiplicadores de velocidad

Si la turbina y el generador trabajan a la misma velocidad, y, pueden montarse coaxialmente, se recomienda el acoplamiento directo a fin de evitar pérdidas mecánicas y minimizar el mantenimiento interior [5]. Por otra parte, en las instalaciones de baja altura de salto, los rodetes giran por debajo de las 400 rpm, lo que obliga a utilizar multiplicadores mecánicos, para alcanzar las 1.000 o 1.500 rpm de los alternadores estándar [6].

En función del tipo de engranajes utilizados en su construcción, los multiplicadores se clasifican en paralelos, cónicos, epicicloidales, y, de correa [7].

Los multiplicadores paralelos utilizan engranajes helicoidales, especialmente atractivos para potencias medias. Los multiplicadores cónicos son generalmente limitados a pequeñas potencias, y, utilizan engranajes cónicos espirales para el reenvío a 90°. Los multiplicadores epicicloidales, utilizan engranajes epicicloidales de diseño muy compacto, especialmente adecuados para potencias de más de 2 MW. Los multiplicadores de correa plana o trapezoidal (ver Fig.1.12), son utilizados en bajas potencias, y, resultan de fácil mantenimiento.

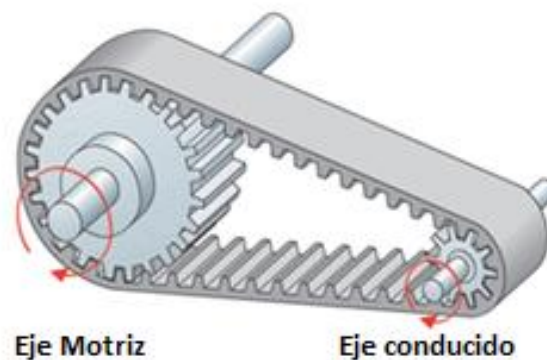


Figura 1.12. Multiplicador de correa

Fuente: <http://tecnoapostol.wordpress.com/2011/12/19/las-relaciones-de-transmision/>

1.3.6 Particularidades de la turbina tipo turgo para la hidrogenación

La sencillez, fácil instalación, y, mantenimiento mínimo, han vuelto populares a las turbinas tipo turgo, en microcentrales hidroeléctricas. Además, las turbinas turgo pueden ser utilizadas en amplios intervalos de caudal y altura, sin disminuir su eficiencia, de manera apreciable [8].

Entre las ventajas de la turbina tipo turgo, más apreciadas para la micro hidrogenación, se destaca:

- Debido a que la turbina tiene un diámetro pequeño, su velocidad angular es mayor, lo que facilita el acoplamiento directo al generador, mejorando el rendimiento al eliminar el multiplicador de velocidad [9].

- La forma de la incidencia del flujo en los álabes de esta turbina (en el mismo instante el fluido choca en 3 cangilones), distribuye el esfuerzo de mejor forma y reduce el desgaste.
- La relación entre el diámetro del inyector y el diámetro de la turbina, la convierte en una máquina hidráulica capaz de “pasar” grandes volúmenes de agua, sin sufrir daños en el rodete [10].
- Por cuanto la turbina funciona a una alta velocidad específica, es una máquina compacta, que se puede acomodar en espacios reducidos [11].

En el marco de este proyecto, se busca una turbina de mediana altura, con alta eficiencia comprobada, confiable, y, de mantenimiento simple [12], características que corresponden a una turbina tipo turgo.

CAPÍTULO 2
PROPUESTA DE ADECUACIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS
PARA EL ESTUDIO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

2.1 Introducción

Dentro la iniciativa de incorporar fuentes renovables, en forma experimental, al sistema de provisión de energía del campus universitario San Cayetano de la UTPL, un papel importante juegan las aplicaciones de hidrogenación.

El diseño de estas aplicaciones, 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 y adecuar un banco de pruebas para estudio de bombas centrífugas, existente en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL. El banco de pruebas referido, fuera de servicio al momento de empezar el trabajo, fue modificado respecto a la versión original fabricada por Armfield, para la experimentación de bombas centrífugas [13]. Este trabajo, describe la propuesta de adecuación y actualización del banco, para posibilitar el estudio de varios tipos de turbinas, incluyendo la denominada turbina turgo.

2.2 Generalidades de las bombas hidráulicas

Los bancos de prueba para ensayos en bombas, permiten reproducir, en un ambiente controlado, las condiciones reales en las que operan las máquinas hidráulicas, tuberías, y, accesorios [14]. Como resultado, se obtienen curvas características de los sistemas hidráulicos, que permiten evaluar la desempeño en condiciones de campo.

2.2.1 Sobre las bombas centrífugas.

La finalidad básica de una bomba centrífuga, en cualquier sistema de fluidos, es agregar energía al fluido. En una bomba centrífuga, el líquido es forzado por la presión hacia el impulsor, que descarga el líquido a una presión más alta, y, a mayor velocidad. En el grupo de paletas de difusión estacionarias, que rodean la periferia del impulsor, la mayor parte de la energía de velocidad se convierte en energía de presión [15].

Estructuralmente, una bomba centrífuga está conformada por un impulsor o rodete, una voluta, y, una tubería de impulsión (ver Fig.2.1).

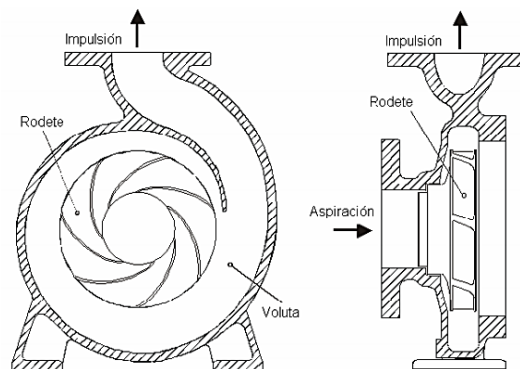


Figura 2.1. Elementos constituyentes de una bomba centrífuga.

Fuente: <http://fluidos.eia.edu.co/lhidraulica/guias/bombas/Bombas.html>

El impulsor o rodete es la parte móvil de la bomba, y, está formado por un conjunto de álabes que giran dentro de una carcasa circular, impulsados por un motor. Dado que una bomba centrífuga es una máquina dinámica, para producir la energía, la bomba depende por completo de los cambios de velocidad del rodete.

La voluta es un órgano fijo, dispuesto en forma de caracol alrededor del rodete. La voluta recoge el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambia la dirección de movimiento, y, encamina el líquido hacia la brida de impulsión de la bomba.

La tubería de impulsión, instalada a la salida de la voluta, permite evacuar el líquido con la presión y la velocidad creadas por la bomba [16].

Las bombas centrífugas se clasifican de acuerdo a varios criterios. En función del tipo de impulsor, las bombas centrífugas pueden ser de flujo radial, de flujo axial, y, de flujo mixto [15], según la dirección principal del flujo con respecto al eje de rotación del impulsor.

De acuerdo a la disposición del flujo, las bombas centrífugas pueden ser de succión sencilla (con una sola entrada en un lado), de succión doble (en que el agua fluye en forma simétrica hacia el impulsor desde ambos lados).

Si la carga o elevación de la bomba centrífuga, proviene de un impulsor sencillo, entonces la bomba se denomina de una etapa; y, se conoce como de etapas múltiples, cuando se emplea dos o más impulsores funcionando en serie.

2.2.2 Parámetros básicos de las bombas centrífugas.

Los parámetros básicos que definen el funcionamiento de una bomba centrífuga, son la descarga, la cabeza, la potencia y eficiencia [17].

La descarga o caudal, es el volumen de líquido bombeado por unidad de tiempo. Habitualmente, el caudal se determina midiendo la velocidad del fluido al pasar por una sección determinada de la conducción.

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

2.2.3 Curvas características de las bombas centrífugas.

La curva de bombeo o curva característica de la bomba, es la representación gráfica del rendimiento de la bomba. La curva característica se emplea para seleccionar una bomba para una aplicación específica, o, para determinar si la bomba instalada rinde al nivel de su capacidad nominal [16]. La Fig.2.2 muestra una característica típica en la cabeza, la eficiencia, y, la potencia de la bomba, se expresan en función del caudal manejado.

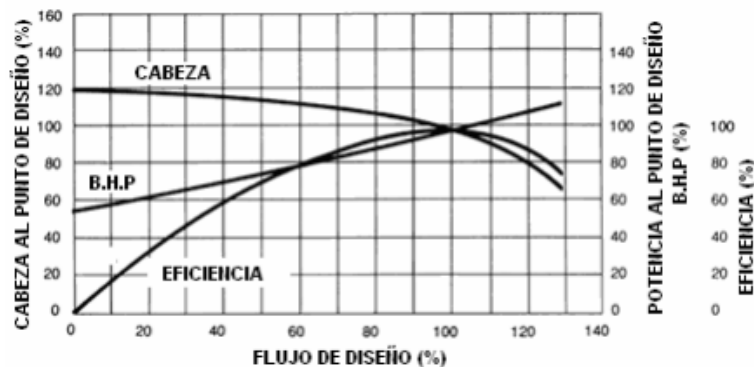


Figura 2.2. Curva característica de una bomba centrífuga.

Fuente: <http://facingyconst.blogspot.com/2008/07/bombas-centrifugas.html>

El punto de operación de una bomba, es aquel en el que su curva característica se intercepta con la curva característica del sistema [16]. La curva característica del sistema, representa el comportamiento del sistema hidráulico al que se encuentra instalada la bomba (ver Fig.2.3).

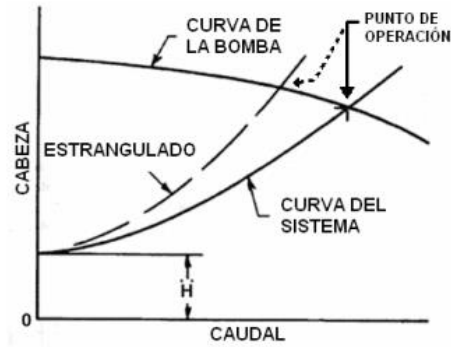


Figura 2.3. Comportamiento de un conjunto sistema - bomba, enfatizando en el punto de operación de la bomba.

Fuente: <http://facingyconst.blogspot.com/2008/07/bombas-centrifugas.html>

2.3 Generalidades del banco de pruebas Armfield

El banco de pruebas disponible en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTP, fue construido por la firma Armfield Limited en el año 1990 (ver Fig.2.4)

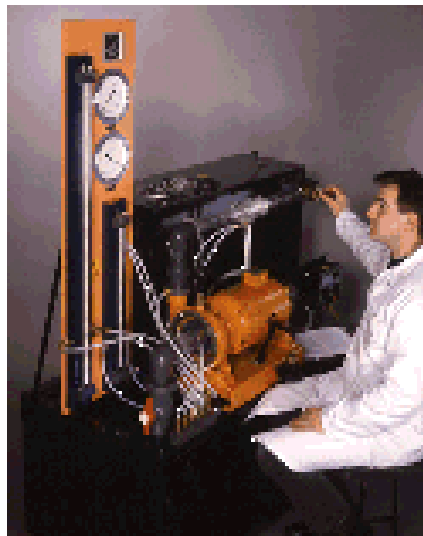


Figura 2.4. Banco de pruebas de bombas centrífugas fabricado por Armfield.

Fuente: <http://www.consultexim.hu/katalogus/armfield/dshtml/rseries/r2.html>

El banco de prueba incluye una bomba centrífuga, de impulsor abierto de hierro fundido, con placa transparente de plexiglás, y, 4 puntos de muestreo de presión en diferentes radios. El impulsor es activado por un motor de 1.6 kW de 2900 rpm, de velocidad variable controlada por tiristores [18]. Las curvas de rendimiento de la bomba centrífuga del banco, se muestran en la Fig. 2.5.

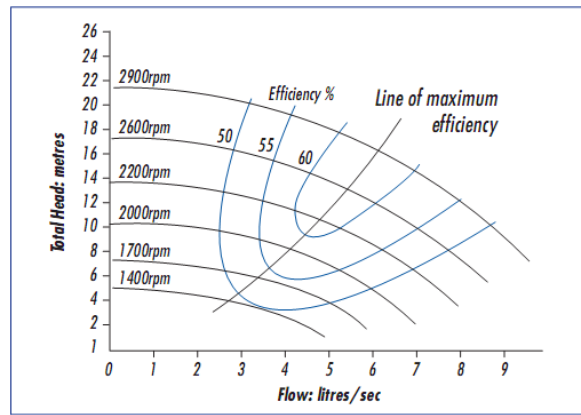


Figura 2.5. Curvas características de la bomba en el banco de pruebas de Armfield.

Fuente: <http://www.consultexim.hu/katalogus/armfield/pdf/r/r2.pdf>

El banco de pruebas tiene una capacidad volumétrica de 140 litros, sostenida por un depósito de 420 litros. En la versión original, se incluyen [19] un venturímetro, manómetros de mercurio de 0.5m, 1m, y, 25m; un vacuómetro de 0 a 5m para un flujo de hasta 5 l/s, y, un motor shunt de 2.1 HP. El esquema de conexión del banco de pruebas se muestra en la Fig. 2.6.

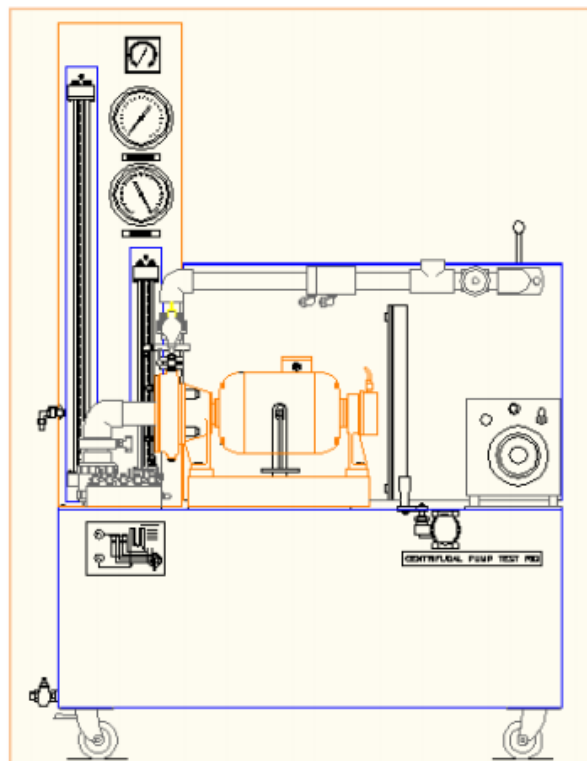


Figura 2.6. Esquema de los elementos del banco de prueba de la bomba centrífuga.

Fuente: <http://dspace.esoch.edu.ec/bitstream/123456789/896/1/15T00467.pdf>

2.4 Adecuación y actualización del banco de pruebas

El banco de pruebas instalado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL, contiene una bomba centrífuga que mueve el agua a presión, a través de las tuberías, hasta llegar a un inyector, que la envía a una turbina tipo Pelton. La Fig.2.7, muestra la campana que sostiene a la turbina, el inyector, el sistema de alimentación del inyector, y, el módulo de medición del par motor. En el marco de este proyecto, se decidió adecuar el banco de pruebas para experimentar también turbinas tipo turgo, a la vez que se actualizaba la instrumentación existente.



Figura 2.7. Estructura del bloque para experimentación de la turbina tipo Pelton, instalado en el banco de pruebas. Fotografía de autores

2.4.1 Propuesta de adecuación del banco de pruebas para incluir la variabilidad del ángulo de inyección.

Por cuanto las turbinas tipo pelton y tipo turgo, son turbinas de acción, las acciones requeridas para la adecuación del banco de pruebas son mínimas.

Los cambios requeridos, incluyen diferenciar la forma y disposición de los álabes [18], y, considerar la variabilidad del ángulo de inyección. En las turbinas de acción, el chorro de agua incide de forma tangencial a la turbina, pero en las turbinas turgo, el ángulo de incidencia varía entre 15° a 22° , respecto al plano diametral del rodete.

La Fig. 2.8, muestra la disposición actual del inyector en el banco de pruebas. Para incluir la variabilidad del ángulo de inyección, se analizó dos opciones potenciales:

proveer de movilidad al inyector, o proveer de movilidad a la campana que sostiene a la turbina.

La primera opción, presentó una serie de inconvenientes, relacionados principalmente con la naturaleza compacta de la estructura que sostiene al inyector, y, con la necesidad de proveer también de movilidad a las tuberías que alimentan al inyector (ver Fig. 2.9).



(a)



(b)

Figura 2.8. (a) Vista frontal del inyector, (b) Vista lateral del inyector. Ubicación del inyector en el banco de pruebas. Fotografías de autores



Figura 2.9. Tuberías de alimentación al inyector. Fotografía de autores

La ***adecuación de la campana***, se mostró como la solución más factible. Se planteó entonces, mantener la posición del inyector, y, facilitar el desplazamiento de la campana (consecuentemente la variación del ángulo de inyección), a través del fresado de un canal en la campana donde se apoya de la turbina, tal que la campana misma pueda girar respecto al inyector (ver Fig. 2.10).

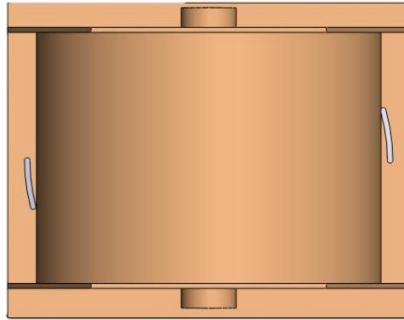


Figura 2.10. Vista superior del diseño del riel en el módulo.

Diseño de autores

CAPÍTULO 3
REHABILITACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS

3.1 Introducción

Como parte del conjunto de iniciativas para la incorporación de las fuentes renovables de energía a la matriz energética del Campus San Cayetano de la UTPL, se estableció la necesidad de diseñar y construir un banco de pruebas para el estudio, en un ambiente controlado, del funcionamiento de turbinas del tipo turgo, a fin de trasladar los resultados obtenidos a la implementación de soluciones de hidrogeneración 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 del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil; y, posteriormente modificarlo para posibilitar el estudio del desempeño de turbinas tipo turgo.

Para atender los requerimientos planteados para la rehabilitación y adecuación del banco de pruebas, se conformó un equipo de trabajo entre técnicos de la Sección de Energía y Electricidad SEE del Departamento de Ciencias de la Computación DCCE, del Departamento de Infraestructura de la UTPL, y, un tesista de la titulación de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones.

3.2 Rehabilitación del banco de pruebas de bombas centrífugas

3.2.1 Características generales del banco a rehabilitar.

El banco de pruebas Armfield para estudio de bombas centrífugas, tiene una capacidad volumétrica de 140 l, sostenida por un depósito de 420 l.

En la versión original [20], se incluyen un venturímetro, manómetros de mercurio de 0.5m, 1m, y, 25m; un vacuómetro de 0 a 5m para un flujo de hasta 5 l/s, y, un motor de 2.1 HP [21]. El esquema de elementos del banco de pruebas se muestra en la Fig. 3.1. La instrumentación permite adquirir:

- Cabeza de la bomba / caudal característico a velocidad constante.
- Característica de rendimiento de la bomba integrada.
- Determinación de la relación entre velocidad, caudal, altura, y, potencia absorbida por una bomba centrífuga.
- Potencia de válvula cerrada / cabeza característica.
- Impulsor de distribución de presión radial.

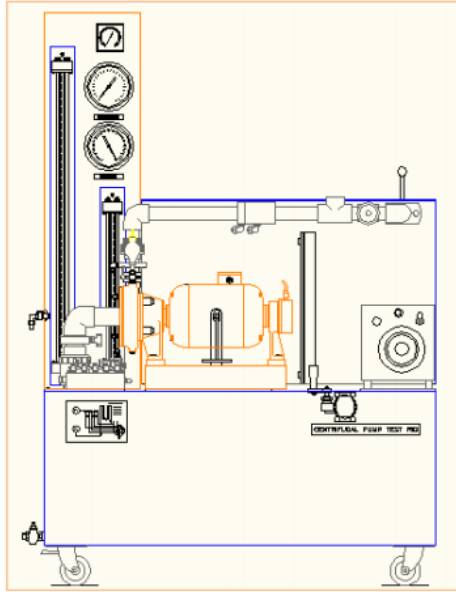


Figura 3.1. Esquema de elementos del banco de prueba de la bomba centrífuga.

Fuente: <http://dspace.espoeh.edu.ec/bitstream/123456789/896/1/15T00467.pdf>

3.2.2 Evaluación inicial del estado del banco.

En una primera fase, se efectuó una evaluación general del estado del banco de pruebas (ver Fig.3.2), identificando y priorizando los problemas existentes. Como resultado, se pudo establecer la necesidad de atender requerimientos en el circuito hidráulico (válvula de pie defectuosa, tuberías obstruidas por óxido, bomba centrífuga inoperativa, y, empaques envejecidos y destruidos), en el circuito de fuerza (motor eléctrico inoperativo, regulador de frecuencia inoperativo, y, problemas en la alimentación eléctrica); y, en la instrumentación del banco.



Figura 3.2. Vista general del banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas, al momento de la inspección inicial. Fotografía de autores

La gran cantidad de pátina en la superficie y los desperfectos en el resorte de la **válvula de pie** (ver Fig.3.3), ubicada a la entrada de la bomba, impedían que la presión en el circuito hidráulico se mantenga, volviendo el banco inoperativo.



Figura 3.3. Estado inicial de la válvula de pie, a la entrada de la bomba. Fotografía de autores.

Con el paso de los años, las piezas metálicas acopladas a las tuberías plásticas del banco, se cubrieron de óxido, el mismo que terminó por adherirse a las paredes de las **tuberías** (ver Fig.3.4 y 3.5).



Figura 3.4. Vista frontal de la tubería durante la inspección inicial. Fotografía de autores.



Figura 3.5. Vista frontal de la tubería durante la inspección inicial. Fotografía de autores.

La cámara del rodete de la **bomba centrífuga**, estaba cubierta de óxido, lo que trababa los retenes e impedía que los álabes giren (ver Fig. 3.6).



Figura 3.6. Estado de la cámara de la bomba centrífuga con óxido en su interior. Fotografía de autores.

Los retenes y el eje del **motor eléctrico** (ver Fig.3.7), se encontraban trabados, presumiblemente por la falta de mantenimiento y de uso.



Figura 3.7. Vista general del motor del banco de pruebas, durante la inspección inicial. Fotografía de autores.

Al intentar evaluar el estado de funcionamiento del **variador de frecuencia** (ver Fig.3.8), se registró la explosión de un capacitor interno, razón por la cual se decidió dar por inoperativo al dispositivo.



Figura 3.8. Vista interior del variador de frecuencia al momento de la inspección inicial.
Fotografía de autores.

Al revisar la acometida eléctrica hacia el motor, se detectó problemas en el embobinado del núcleo del **transformador de voltaje**, por lo cual se decidió evitar su utilización ante riesgo de cortocircuito (ver Fig.3.9).



Figura 3.9. Vista interior del transformador al momento de la inspección inicial. Fotografía de autores.

La **instrumentación** del banco, basada en el uso de manómetros operando por el principio de presión diferencial (ver Fig. 2), estaba considerablemente envejecida y poco operativa.

3.2.3 Plan general de rehabilitación del banco.

Para gestionar la rehabilitación del banco, se decidió seguir el flujograma de procesos mostrado en la Fig.3.10. En síntesis, se dividió las piezas en sujetas a limpieza y en reemplazables.

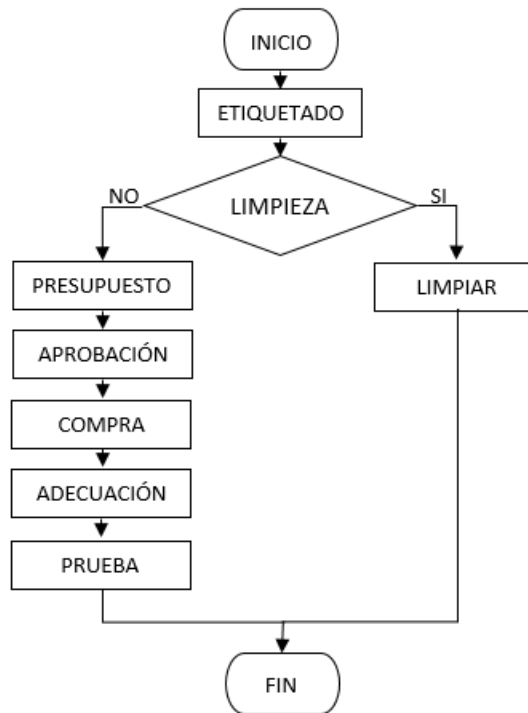


Figura 3.10. Flujograma de trabajo. Diseño de autores.

El proceso de rehabilitación se inició con los componentes que requerían un menor esfuerzo, pasando luego a los de mayores implicaciones.

3.2.3.1 *Tuberías.*

Al analizar el estado de las tuberías (ver Fig.3.11), se determinó que éstas se encontraban intactas, razón por la cual se decidió limpiarlas con un compuesto especial basado en cloro y detergente, para la remoción de óxido.



Figura 3.11. Tuberías con óxido en las paredes. Fotografía de autores.

Finalmente, se utilizó arena fina para la limpieza a detalle del interior de la tubería, obteniendo los resultados mostrados en la Fig. 3.12.



Figura 3.12. Tuberías luego del proceso de limpieza. Fotografía de autores.

3.2.3.2 Válvula de pie.

Dado el avanzado estado de deterioro de la válvula de pie, se decidió reemplazarla completamente. En el mercado local, no fue posible encontrar una válvula de idéntica geometría, por lo que fue necesario modificar el modelo más cercano (ver Fig.3.13). La Fig. 3.14 muestra la conexión de la nueva válvula de pie en el circuito de aspiración de la bomba.



Figura 3.13. Válvulas de pie (antigua y nueva). Fotografía de autores.



Figura 3.14. Instalación de la válvula de pie en el circuito de aspiración de la bomba. Fotografía de autores.

3.2.3.3 Bomba centrífuga.

La Fig.3.15 muestra el estado de la cámara del rodete de la bomba centrífuga al ser desmontada. Con ayuda de ácido diclorometano y de una sierra, se intentó remover la cubierta de acrílico transparente de la cámara (ver Fig. 3.16), sin resultados positivos, ya que la cubierta se quebró (ver Fig.3.17), razón por la cual fue necesario solicitar la fabricación local de una nueva (ver Fig.3.18).



Figura 3.15. Vista frontal de la cámara del rodete de la bomba centrífuga. Fotografía de autores.



Figura 3.16. Limpieza y remoción del empaque de la cámara del rodete. Fotografía de autores.



Figura 3.17. Cámara del rodete de la bomba centrífuga, abierta. Se observa los efectos de la acumulación de óxido. Fotografía de autores.



Figura 3.18. Instalación de la nueva cubierta de la cámara del rodete de la bomba centrífuga.
Fotografía de autores.

3.2.3.4 Motor eléctrico

El motor eléctrico original del banco de pruebas, de 2 HP de potencia, está diseñado y montado para permitir la medición del torque en el rodete, a través de un sistema de equilibrio con pesas (ver Fig.3.19).



Figura 3.19. Motor original del banco de pruebas con sistema de medición del torque.
Fotografía de autores.

Ante la falla completa del motor original, se requirió la adquisición local de otro de iguales prestaciones, aunque de dimensiones diferentes (ver Fig.3.20). Esta variación obligó a requerir la modificación del eje del rotor del nuevo motor, y, su acople con la bomba centrífuga (ver Fig.3.21).



Figura 3.20. Variación de la geometría de los motores original y de reemplazo. Fotografía de autores.

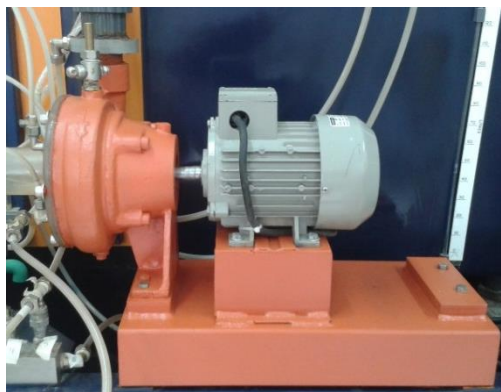


Figura 3.21. Instalación del nuevo motor en el banco de pruebas. Fotografía de autores.

Durante la instalación del nuevo motor en el banco de pruebas, no fue posible reproducir el sistema de medición del torque, por la cual se necesitará implementar un método diferente de medición.

3.2.3.5 Variador de frecuencia

Ante la imposibilidad de adquirir los componentes electrónicos requeridos para la rehabilitación del variador de frecuencia (ver Fig.3.22), y, con la intención de incorporar las opciones de telemetría al banco de pruebas, se decidió adquirir un nuevo variador de frecuencia tipo G110 de Siemens, cuyas principales características técnicas se muestran en la Tabla 3.1.



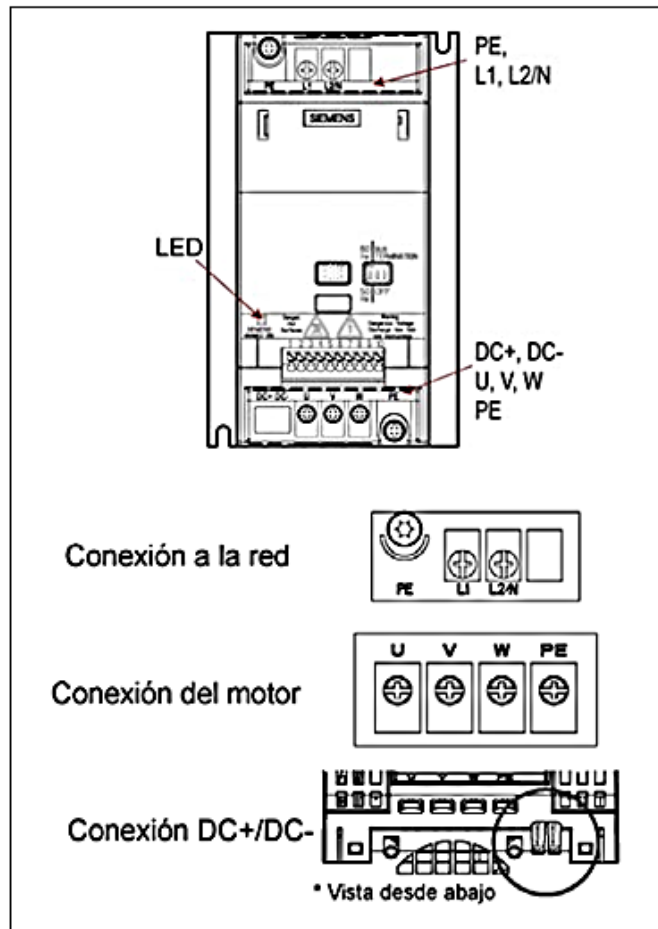
Figura 3.22. Vista lateral del variador de frecuencia original. Fotografía de autores.

Tabla 3.1. Características técnicas del variador G110 Siemens

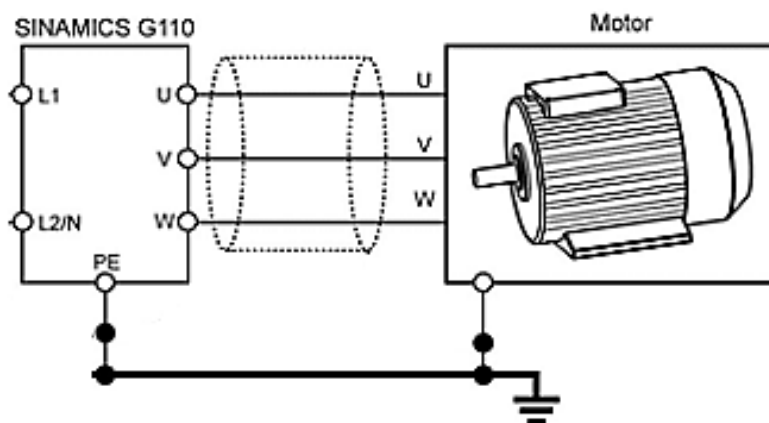
Dato	Valor
Potencia	2HP – 1,5KW
Fases	3
Alimentación	220Vac
Frecuencia de entrada	60Hz
Compatibilidad	DAQ
Control	Señal externa
	BOP
	Control por potenciómetro

Fuente:http://cache.automation.siemens.com/dnl/TI0NjkzOQAA_15347973_HB/g110_opi_15347973_0403_sp.pdf

El variador de frecuencia se conectó con el motor eléctrico de la bomba, de acuerdo al esquema mostrado en la Fig.3.23. Para la disposición del variador en el banco de prueba, se decidió reutilizar la caja metálica del variador original, realizando las adecuaciones requeridas para el funcionamiento del BOP (panel de operador) (ver Fig.3.24)



(a)



(b)

Figura 3.23. (a) Esquema de conexión y bornes de variador (b) Diagrama de conexión Motor-variador.

Fuente:http://cache.automation.siemens.com/dnl/T10NjkzOQAA_15347973_HB/g110_opi_15347973_0403_sp.pdf



(a)



(b)

Figura 3.24. Instalación del variador de frecuencia en el banco de pruebas. a) Vista interior de la caja metálica del variador, b) Vista lateral del variador instalado. Fotografía de autores.

Para regular la velocidad de giro del motor eléctrico desde el variador de frecuencia, se diseñó una rutina en step7, uno de los lenguajes que soportan los equipos Siemens. La rutina se programó empleando los recursos de la interface de programación (ver Tabla 3.2). Los parámetros de programación variados, se listan en la Tabla 3.3. La Tabla 3.4 muestra los valores introducidos al equipo, considerando las características eléctricas del motor.

Tabla 3.2. Interface de programación del variador G110 Siemens

Paso	Característica
1	Pulsar P para acceder a los parámetros.
2	Pulsar ▲ hasta visualizar el parámetro a modificar.
3	Pulsar P para acceder al nivel de valor del parámetro.
4	Pulsar ▲▼ hasta el valor requerido.
5	Pulsar P para confirmar y guardar el valor.

Fuente: http://cache.automation.siemens.com/dn/TI0NjkzOQAA_15347973_HB/g110_opi_15347973_0

Tabla 3.3. Parámetros y características de programación del variador G110 Siemens

Parámetro	Característica
P0100	Selección de la frecuencia: 0 = 50Hz Europa 1 = 60Hz Norteamérica (HP) 2 = 60Hz Norteamérica (kW)
P0305	Selección de la corriente nominal, A
P0307	Potencia nominal
P0308	CosPhi nominal del motor
P0310	Frecuencia nominal del motor, Hz
P0311	Velocidad nominal del motor, rpm
P0700	Selección de la fuente de ordenes: 0 = Ajuste por defecto de fábrica 1 = BOP (teclado) 2 = Terminal 5 = USS
P1000	Selección de consigna de frecuencia 0 = Sin consigna principal 1 = Consigna MOP 2 = Consigna analógica 3 = Frecuencia fija 5 = USS
P1080	Frecuencia mínima (Hz)
P1082	Frecuencia máxima (Hz)

Fuente:http://cache.automation.siemens.com/dnl/TI0NjkzOQAA_15347973_HB/g110_opi_15347973_0403_sp.pdf

Tabla 3.4. Parámetros introducidos en el variador G110 Siemens

Parámetro	Valor
P0100	1
P0305	6 A
P0307	2 HP
P0308	0,86
P0310	60 Hz
P0311	3600 rpm
P0700	1
P1000	1
P1080	0 Hz
P1082	60 Hz

La Fig.3.25 muestra una vista general del banco de pruebas rehabilitado.



Figura 3.25. Vista frontal del banco de pruebas de bombas centrífugas rehabilitado. Fotografía de autores.

CAPÍTULO 4
ADECUACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS PARA
EL ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE TURBINAS TIPO TURGO

4.1 Introducción

En las instalaciones hidroeléctricas habituales, las turbinas hidráulicas aprovechan la energía potencial y cinética del agua. En estas instalaciones, en uso extensivo se encuentran turbinas tipo Pelton, Kaplan, o, Francis, “especializadas” para determinadas combinaciones de salto y caudal [22]. Por su parte, una turbina turgo aprovecha la energía cinética proveniente de un inyector, cuyo ángulo de incidencia varía entre 15° a 22°, respecto al plano diametral del rodete.

Desde esta perspectiva, se requiere entonces modificar el banco de pruebas para lograr incluir la variabilidad del ángulo de incidencia del chorro proveniente del inyector. Adicionalmente, se necesita diseñar y construir una turbina tipo turgo experimental, inexistente en el banco. En este capítulo, se describe los resultados obtenidos.

4.2 Modificación del banco de pruebas para el estudio del desempeño de turbinas tipo turgo

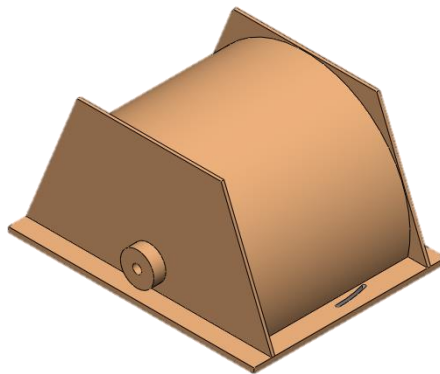
Por cuanto las turbinas tipo pelton y tipo turgo, son turbinas de acción, las acciones requeridas para la adecuación del banco de pruebas son mínimas: variar el ángulo de inyección, y, diferenciar la forma y disposición de los álabes [18].

4.2.1 Variación del ángulo de inyección.

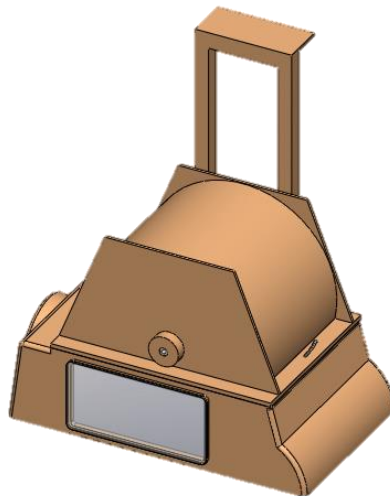
Considerando que en el banco de pruebas de bombas centrífugas existente, el inyector esta inmóvil, se decidió adaptar la campana que sostiene las turbinas (ver Fig.4.1), para facilitar su desplazamiento, y, consecuentemente variar el ángulo de inyección. La opción aceptada, fue la de fresar en la base de la campana, un canal que permita rotar la posición de la misma respecto al inyector (ver Fig. 4.2).



Figura 4.1. Vista general del banco de pruebas de bombas centrífugas. En la parte superior se aprecia la posición del inyector y de la campana. Fotografía de autores.



(a)



(b)

Figura 4.2. Propuesta de adecuación requerida para variar la posición de la campana respecto al inyector. (a) Vista inferior de la campana, (b) Vista superior del módulo. Fotografía de autores.

Con ayuda de un técnico mecánico, se fresó un canal tal, que la variación del ángulo de inyección sobre la turbina turgo varíe entre 0° y 20° . La Fig.4.3 muestra los resultados obtenidos.

4.2.2 Diferenciación de la forma y disposición de álabes

El diseño de la turbina turgo es muy similar a una turbina Pelton, ya que la forma de sus alabes es similar, con la diferencia de que en la turgo son la mitad de los de una Pelton (ver Fig.4.4). Para la misma potencia, el rodete turgo tiene la mitad del diámetro del requerido para una Pelton, y, dobla la velocidad específica [23].

Considerando que el banco de pruebas existente, contiene una turbina Pelton (ver Fig.4.5 y 4.6), se decidió tomar esta como base para el diseño de una turbina tipo turgo.

En el desempeño de una turbina tipo turgo, inciden 3 aspectos: diámetro, número de alabes, y, ángulo de incidencia del chorro de agua. En el marco de este proyecto, se acordó modificar el ángulo de inyección (entre 0° y 20°), y, el número de alabes (16 y 20), manteniendo el diámetro (31 cm) por razones de espacio en la campana.

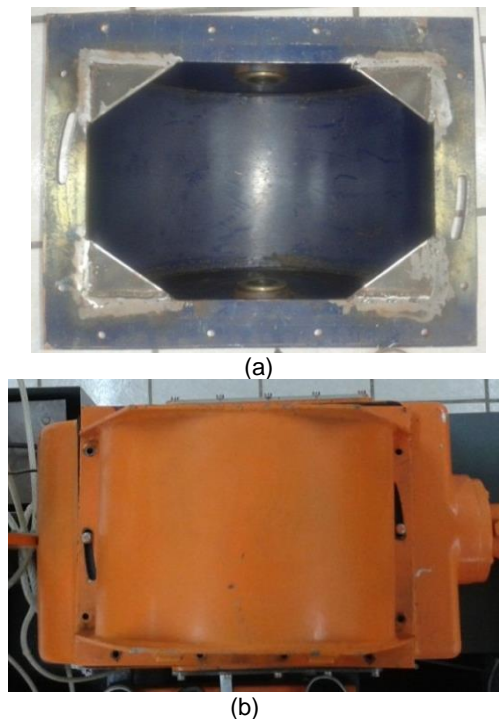


Figura 4.3. Adecuación realizada para variar la posición de la campana respecto al inyector. (a) Vista inferior de la campana, (b) Vista superior del módulo. Fotografía de autores.



(a)



(b)

Figura 4.4. Alabes de turbinas de acción. (a) Para turbinas Pelton, (b) para turbinas turgo.

Fuente:http://theotp1.physik.uniulm.de/~rein/Hauptseminare/SS11/Vortraege_Final/Vortrag8_Fabian_Drechsler/Wasserkraftwerke.pdf, <http://h-hydro.com>.

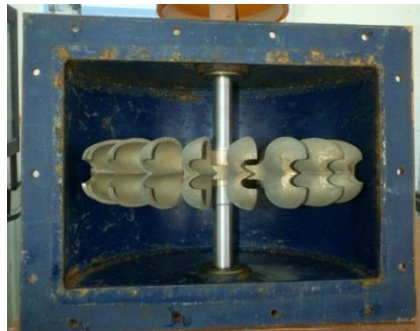


Figura 4.5. Turbina tipo Pelton, instalada en la campana del banco de pruebas.

Fotografía de autores.



Figura 4.6. Turbina tipo Pelton existente en el banco de pruebas.

Fotografía de autores.

Como primer paso en el diseño de la turbina, se obtuvo moldes de madera del disco y de los álabes de la turbina tipo Pelton (ver Fig. 4.7). Para los álabes, el molde se partió en 2. Los moldes de madera sirvieron de base para preparar moldes de arena para verter el metal fundido. La turbina se fundió en aluminio con refuerzo de acero, que a diferencia del cobre de la turbina Pelton existente, es mucho más liviano, por lo que se espera una mayor velocidad de rotación.



(a)



(b)

Figura 4.7. Moldes de madera de los elementos de la turbina tipo Pelton existente en el banco de pruebas. (a) Álabe, (b) Disco.

Fotografía de autores.

Al solidificarse la aleación, se destruyó el molde de arena, y se granalló las piezas. Para eliminar las espurias del proceso de fundición, se torneó el disco, y se lijó los álabes con lija número 80 y con escorfina. Finalmente se perforó el agujero para el eje, y, se fijó la chaveta y el prisionero (ver Fig. 4.8).



Figura 4.8. Elementos de la turbina tipo turgo listos para ensamblaje.
Fotografía de autores.

Para el ensamblaje de las turbinas, se dividió el disco en partes iguales (16 o 20) (ver Fig.4.9). Con ayuda de un macho de roscado y un gira-machos, se perforó y roscó el disco, y, con tornillos se fijaron los álabes (ver Fig.4.10). Para mejorar la rigidez del ensamblaje, en la base de los álabes se utilizó suelda de aluminio. La Fig.4.11 muestra las turbinas turgo terminadas. La Fig.4.12 presenta una comparación entre la turbina Pelton, originalmente existente, y, una de las turbinas turgo construidas.



Figura 4.9. División del disco de la turbina turgo.
Fotografía de autores.



Figura 4.10. Ensamblaje de los álabes al disco.
Fotografía de autores.



Figura 4.11. Turbinas turgo construidas.
Fotografía de autores.



Figura 4.12. Turbinas Pelton y turgo a operar en el banco de pruebas.
Fotografía de autores.

Cada una de las turbinas turgo construidas, se monta sobre la campana, se ajusta con el prisionero y la chaveta. Una vez listo el montaje, se coloca los rodamientos en los extremos del eje (ver Fig.4.13). La campana se coloca sobre el banco, y, el ángulo de inyección se regula desplazando la campana por el canal (ver Fig.4.14).



Figura 4.13. Turbina turgo montada en la campana del banco de pruebas.
Fotografía de autores



Figura 4.14. Turbina turgo montada en la campana del banco de pruebas y lista para experimentación.
Fotografía de autores

CONCLUSIONES

- El incremento de la demanda energética a partir de la revolución industrial, llevó a la implementación de un número cada vez mayor de centrales de hidrogenación, por lo que las turbinas hidráulicas se convirtieron en una solución de ingeniería de uso masivo.
- La reversibilidad de las bombas y las turbinas es poco real, y, suele conllevar rendimientos muy bajos, y, a veces nulos, exceptuando las diseñadas especialmente para trabajar como bomba y como turbina.
- En el análisis del movimiento del agua en las turbinas, se utiliza una nomenclatura universal, que se basa en los triángulos de velocidad a la entrada y a la salida del rodete.
- La sincronía que debe existir para generar electricidad a una determinada frecuencia, debe ser tal, que la velocidad de la turbina, sea una conjugada con el número de pares de polos del alternador.
- El diámetro de la turbina turgo al ser pequeño conduce a una mayor velocidad angular, lo que facilita su acoplamiento directo al generador, con lo cual al eliminar un posible multiplicador de velocidad aumentara su fiabilidad.
- La forma de la incidencia del flujo en los álabes de la turbina turgo (en el mismo instante el fluido choca en 3 cangilones), distribuye el esfuerzo de mejor forma y reduce el desgaste.
- Los bancos de prueba para ensayos de bombas, permiten reproducir, en un ambiente controlado, las condiciones reales en las que operan las máquinas hidráulicas, tuberías, y, accesorios.
- La finalidad básica de una bomba centrífuga, en cualquier sistema de fluidos, es agregar energía al fluido. En una bomba centrífuga, el líquido es forzado por la presión hacia el impulsor, que descarga el líquido a una presión más alta, y, a mayor velocidad. En el grupo de paletas de difusión estacionarias, que rodean la periferia del impulsor, la mayor parte de la energía de velocidad se convierte en energía de presión.
- Los parámetros básicos que definen el funcionamiento de una bomba centrífuga, son la descarga, la cabeza, y, la potencia y eficiencia.
- La propuesta de adecuación del banco de pruebas de bombas centrífugas existente en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil de la UTPL, se basó en que la operación de las turbinas de acción requiere gestionar el ángulo de incidencia del chorro de agua.

- Se estableció la necesidad de diseñar y construir un banco de pruebas para el estudio, en un ambiente controlado, del funcionamiento de turbinas del tipo turgo, a fin de trasladar los resultados obtenidos a la implementación de soluciones de hidrogenación en campo.
- Para atender los requerimientos planteados para la rehabilitación y adecuación del banco de pruebas, se conformó un equipo de trabajo entre técnicos de la Sección de Energía y Electricidad SEE del Departamento de Ciencias de la Computación DCCE, del Departamento de Infraestructura de la UTPL, y, un tesista de la titulación de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones.
- Se rehabilitó el banco de pruebas Armfield para el estudio de bombas centrífugas, existente en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil; para posteriormente modificarlo para el estudio del desempeño de turbinas tipo turgo.
- Dada la evaluación general del estado del banco de pruebas, se identificó y priorizó los problemas existentes. Donde se estableció la necesidad de atender requerimientos en el circuito hidráulico, en el circuito de fuerza y, en la instrumentación del banco.
- Para gestionar la rehabilitación del banco de pruebas, se decidió seguir un flujograma de trabajo, donde, se dividió las piezas en sujetas a limpieza y en reemplazables.
- Por cuanto las turbinas tipo Pelton y tipo turgo, son turbinas de acción, las acciones requeridas para la adecuación del banco de pruebas son mínimas: variar el ángulo de inyección, y, diferenciar la forma y disposición de los álabes.
- Considerando que en el banco de pruebas de bombas centrífugas existente, el inyector esta inmóvil, se decidió adaptar la campana que sostiene las turbinas, para facilitar su desplazamiento, y, consecuentemente variar el ángulo de inyección. La opción aceptada, fue la de fresar en la base de la campana, un canal que permita rotar la posición de la misma respecto al inyector.
- El diseño de la turbina turgo es muy similar a una turbina Pelton, ya que la forma de sus álabes es similar, con la diferencia de que en la turgo son la mitad de los de una Pelton.
- Considerando que el banco de pruebas existente, contiene una turbina Pelton, se decidió tomar esta como base para el diseño de una turbina tipo turgo.
- En el desempeño de una turbina tipo turgo, inciden 3 aspectos: diámetro, número de álabes, y, ángulo de incidencia del chorro de agua. En el marco de este proyecto, se acordó modificar el ángulo de inyección (entre 0° y 20°), y, el número

de álabes (16 y 20), manteniendo el diámetro (31 cm) por razones de espacio en la campana.

- La turbina se fundió en aluminio con refuerzo de acero, que a diferencia del cobre de la turbina Pelton existente, es mucho más liviano, por lo que se espera una mayor velocidad de rotación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Pedro Fernández Diez, Turbinas Eléctricas [Online]: Disponible en: <<http://libros.redsauce.net/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/01Turb.Hidr.pdf>> [Consulta de agosto del 2012].
- [2]. Biblioteca sobre Ingeniería Energética, Turbinas [Online]: Disponible en: <<http://es.libros.redsauce.net/?pageID=19>> [Consulta de agosto del 2012].
- [3]. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, Hidromecánica y energías alternas [Online]: Disponible en: <<http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/1480/1/Tesis%20-%20Respaldo1hidomecanica.pdf>> [Consulta de agosto del 2012].
- [4]. UCV, Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, “Diseño y Cálculo de Turbinas” [Online]: Disponible en: <<http://ucvvirtual.edu.pe/campus/HDVirtual/700439399/TURBINAS%20HIDRAULICAS/7000000269/Ejemplo%20de%20calculo%20de%20Turb%20Pelton%20ecuaciones.pdf>> [Consulta de enero de 2013].
- [5]. ESHA, Guía para el desarrollo de una pequeña central Hidroeléctrica [Online]: Disponible en: <http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/GUIDES/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_ES_02.pdf> [Consulta de agosto de 2012].
- [6]. EPA, Energía de la Patagonia AYSÉN S.A.; Tipos de Turbinas [Online]: Disponible en: <<http://www.tuscanywind.com/Rotore%20Turbina%20Turgo%20in%20Acciaio%20inossidabile%2024%20pale>> [Consulta de agosto de 2012].
- [7]. CMCHYDRO, Características de las turbinas [Online]: Disponible en: <<http://www.cmchydro.es/turbina-pelton.php>> [Consulta de agosto de 2012].
- [8]. TuscanyWind, Harvesting Power, Rotore Turbinas Turgo in acciaio inossidabile [Online]: Disponible en: <<http://www.tuscanywind.com/Rotore%20Turbina%20Turgo%20in%20Acciaio%20inossidabile%2024%20pale>> [Consulta de agosto de 2012].
- [9]. II Curso Internacional de Especialización en Micro y Minicentrales Hidroeléctricas [Online]: Disponible en: <<http://fainweb.uncoma.edu.ar/La.M.Hi/textos/Pequenas%20centrales/UNIDAD%205.pdf>> [Consultado el de agosto del 2012].
- [10]. Escuela Politécnica Nacional, Modelación y Diseño para Micro-Centrales de Generación Hidroeléctrica [Online]: Disponible en: <<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1073/1/CD-1906.pdf>> [Consulta de agosto del 2012].
- [11]. ENERGOCLUB, Managenergy, “il Forum, Energetic Ambiente” [Online]: Disponible en <<http://www.energoclub.org/page/turbine-idroelettriche>> [Consulta de enero del 2013].
- [12]. Tecnología, Relaciones de transmisión [Online]: Disponible en <<http://tecnoapostol.wordpress.com/2011/12/19/las-relaciones-de-transmision/>>

[Consulta de enero del 2013].

- [13]. ARMFIELD, HYDRAULIC MACHINES, “Centrifugal Pump Test Set” [Online]: Disponible en: <http://www.consultexim.hu/katalogus/armfield/dshtml/rseries/r2.htm> [Consulta de enero del 2013].
- [14]. Universidad de Oriente, Escuela de ingeniería y ciencias aplicadas, Departamento de mecánica, Gabriela Cristina Tobía Rodríguez, “Automatización del banco de pruebas Armfield Fm20 de una bomba centrífuga”, [Online]: Disponible en: <http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/308/1/Tesis-IM008-T80.pdf> [Consulta de enero del 2013].
- [15]. Universidad de Oriente, Escuela de ingeniería y ciencias aplicadas, Departamento de mecánica, Emir José Milano Bruzco, “Mejoramiento de los planes de mantenimiento preventivo de los equipos del área de control de sólidos de una empresa de servicios petroleros”, [Online]: Disponible en: <http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/304/1/Tesis-IM004-M56.pdf> [Consultado de enero del 2013].
- [16]. Pedro Fernández Diez, Bombas centrífugas y volumétricas [Online]: Disponible en: <http://libros.redsauce.net/Bombas/PDFs/BOMBAS01.pdf> [Consulta de Febrero del 2013].
- [17]. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ricardo Antonio Rosada Méndez, “Manual para los ensayos del laboratorio de máquinas hidráulicas” [Online]: Disponible en: http://www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0473_M.pdf [Consulta de mayo del 2013].
- [18]. ARMFIELD, Discovery Armfield, “Equipos de enseñanza e investigación en ingeniería”, [Online]: Disponible en: <http://www.discoverarmfield.co.uk/gsf9-esp/files/assets/downloads/publication.pdf> [Consulta de mayo del 2013].
- [19]. ESPOCH, Facultad de mecánica, Escuela de ingeniería mecánica, “Diseño e implementación de un sistema de gestión de calidad para el laboratorio de turbomaquinaria con fines de acreditación ante el organismo de acreditación ecuatoriano (oae)”, [Online]: Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/896/1/15T00467.pdf> [Consultado de Junio del 2013].
- [20]. ARMFIELD, HYDRAULIC MACHINES, “Centrifugal Pump Test Set” [Online]: Disponible en: <http://www.consultexim.hu/katalogus/armfield/dshtml/rseries/r2.htm> [Consulta de Junio del 2013].
- [21]. Universidad de Oriente, Escuela de ingeniería y ciencias aplicadas, Departamento de mecánica, Gabriela Cristina Tobía Rodríguez, “Automatización del banco de pruebas Armfield Fm20 de una bomba centrífuga”, [Online]: Disponible en: <http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/308/1/Tesis-IM008-T80.pdf> [Consulta de agosto del 2013].

[22] Heredia Sánchez Luis. "Construcción y Ensayo de una Rueda Hidráulica de Corriente Libre de 2m de Diámetro", [Online]: Disponible en: <<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/390>> [Consultado el 15 de agosto del 2013].

[23] No se reconoce autor, "Aplicación de las turbinas hidráulicas", [Online]: Disponible en: <<http://tesis.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/98/1/TESIS%20APLICACION%20lechugabarrera.pdf>> [Consultado el 20 de agosto del 2013].

ANEXO 1

PAPER: Rehabilitación de un banco de pruebas para estudio de bombas centrífugas y adecuación del banco para el estudio de turbinas tipo turgo

Rehabilitación de un banco de pruebas para estudio de bombas centrífugas y adecuación del banco para el estudio de turbinas tipo turgo

A. Uchuary^{#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

^{#1}aduchuary@utpl.edu.ec

^{#2}jorgeluis@utpl.edu.ec

Resumen— Se describe el proceso de rehabilitación de un banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas, existente en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL; y, la adecuación del mismo banco para la experimentación de turbinas tipo turgo.

Palabras claves— estudio de bombas centrífugas, estudio de turbinas tipo turgo.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de la iniciativa de incorporar fuentes renovables, en forma experimental, al sistema de provisión de energía del campus universitario San Cayetano de la UTPL, un papel importante juegan las aplicaciones de hidrogenación.

El diseño de estas aplicaciones, 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 del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil; y, posteriormente modificarlo para posibilitar el estudio del desempeño de turbinas tipo turgo.

En las instalaciones hidroeléctricas habituales, las turbinas hidráulicas aprovechan la energía potencial y cinética del agua. En estas instalaciones, en uso extensivo se encuentran turbinas tipo Pelton, Kaplan, o, Francis, “especializadas” para determinadas combinaciones de salto y caudal. Por su parte, una turbina turgo aprovecha la energía cinética proveniente de un inyector, cuyo ángulo de incidencia varía entre 15° a 22°, respecto al plano diametral del rodete.

Desde esta perspectiva, se requiere entonces modificar el banco de pruebas para lograr incluir la variabilidad del ángulo de incidencia del chorro proveniente del inyector. Adicionalmente, se necesita diseñar y construir una turbina tipo turgo experimental, inexistente en el banco. En este trabajo, se describe los resultados obtenidos.

II. TURBINAS HIDRÁULICAS

A. Generalidades

Una turbina hidráulica es una turbo máquina motora, y, se puede identificar 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.

Exceptuando las máquinas diseñadas especialmente para trabajar como bomba y como turbina, la reversibilidad de las bombas y las turbinas es poco real, y, suele conllevar rendimientos muy bajos, y, a veces nulos [1].

Una turbina hidráulica se compone de tres elementos que, el fluido atraviesa sucesivamente: el distribuidor, el rodete, y, el difusor (ver Fig. 1) [2].

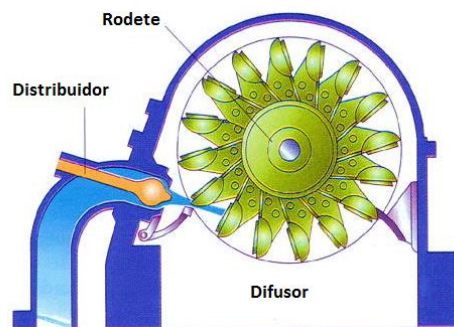


Fig.1. Esquema general de una turbina hidráulica [Disponible en: <http://ucvvirtual.edu.pe/campus/HVirtual/700439399/TURBINAS%20HIDRAULICAS/7000000269/Ejemplo%20de%20calculo%20de%20Turb%20Pelton%20ecuaciones.pdf>]

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.

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 una 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 [2].

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.

B. Turbinas hidráulicas de uso frecuente

Turbinas Pelton

Son turbinas de acción, donde el distribuidor transforma la energía de presión del agua en energía cinética. Cada distribuidor produce un chorro, cuyo caudal se regula mediante un inyector [3].

El distribuidor en este tipo de turbinas incide tangencialmente en el rodete, donde los álabes constan de un deflector cuya misión es desviar el chorro a los dos cangilones de cada álabe de la turbina (ver Fig.2.), comúnmente se utilizan en saltos de agua entre 40 a 1200 m [3].



Fig. 2. Turbina Pelton [Disponible en: <http://www.cmhydro.es/turbina-pelton.php>].

Turbinas Turgo

La turbina Turgo puede trabajar en saltos con alturas comprendidas entre 15 y 300 metros. Al igual que la turbina Pelton, se trata de una turbina de acción, pero a diferencia de esta sus álabes tienen una distinta forma y disposición (ver Fig.3.) [2].

La característica principal de la turbina turgo es que el chorro incide con un ángulo que varía de 15°- 22° respecto al plano diametral del rodete, además, el chorro incide sobre varios álabes, de forma semejante a como lo hace el fluido en una turbina de vapor [4].



Fig. 3. Turbina Turgo [Disponible en: <http://www.tuscanywind.com/Rotore%20Turbina%20Turgo%20in%20Acciaio%20inossidabile%202024%20pale>].

Turbinas Francis

Son turbinas de reacción de flujo radial y admisión total, muy utilizadas en saltos de altura media comprendida entre 20 y 800 m, equipadas con un distribuidor de álabes regulables y un rodete de álabes fijos [3].

En las turbinas Francis, los álabes distribuidores que regulan el caudal de agua que entra al rodete giran accionados mediante bielas (ver Fig.4), que a su vez son accionadas por un anillo exterior que sincroniza su movimiento [2].



Fig. 4. Turbina Francis [Disponible en: <http://www.cmhydro.es/turbina-pelton.php>].

Turbinas Kaplan

Las turbinas tipo Kaplan, se clasifican entre las de reacción de flujo axial. En una **turbina "verdadera" tipo Kaplan** (ver Fig.5), los álabes del distribuidor y del rodete son fijos, mientras que en una **turbina semi_Kaplan**, sólo son regulables los álabes del rodete [5].



Fig. 5. Turbina Kaplan [Disponible en: <http://www.cmhydro.es/turbina-pelton.php>].

III. PARTICULARIDADES DE LA TURBINA TIPO TURGO PARA LA HIDROGENERACIÓN

La sencillez, fácil instalación, y, mantenimiento mínimo, han vuelto populares a las turbinas tipo turgo, en microcentrales hidroeléctricas. Además, las turbinas turgo pueden ser utilizadas en amplios intervalos de caudal y altura, sin disminuir su eficiencia, de manera apreciable.

Entre las ventajas de la turbina tipo turgo, más apreciadas para la micro hidrogenación, se destaca:

- Debido a que la turbina tiene un diámetro reducido, su velocidad angular es mayor, lo que facilita el acoplamiento directo al generador, mejorando la fiabilidad al eliminar el multiplicador de velocidad [9].
- La forma de la incidencia del flujo en los álabes de esta turbina (en el mismo instante el fluido choca en 3 cangilones), distribuye el esfuerzo de mejor forma y reduce el desgaste
- La relación entre el diámetro del inyector y el diámetro de la turbina, la convierte en una máquina hidráulica capaz de “pasar” grandes volúmenes de agua, sin sufrir daños en el rodete [10].
- Por cuanto la turbina funciona a una alta velocidad específica, es una máquina compacta, que se puede acomodar en espacios reducidos [11].

En el marco de este proyecto, se busca una turbina de mediana altura, con alta eficiencia comprobada, confiable, y, de mantenimiento simple [12], características que corresponden a una turbina tipo turgo.

IV. GENERALIDADES DE LAS BOMBAS HIDRÁULICAS

Los bancos de prueba para ensayos en bombas, permiten reproducir, en un ambiente controlado, las condiciones reales en las que operan las máquinas hidráulicas, tuberías, y, accesorios [13]. Como resultado, se obtienen curvas características de los sistemas hidráulicos, que permiten evaluar la performance en condiciones de campo.

A. Sobre las bombas centrífugas

La finalidad básica de una bomba centrífuga, en cualquier sistema de fluidos, es agregar energía al fluido. En una bomba centrífuga, el líquido es forzado por la presión hacia el impulsor, que descarga el líquido a una presión más alta, y, a mayor velocidad. En el grupo de paletas de difusión estacionarias, que rodean la periferia del impulsor, la mayor parte de la energía de velocidad se convierte en energía de presión [14].

Estructuralmente, una bomba centrífuga está conformada por un impulsor o rodete, una voluta, y, una tubería de impulsión (ver Fig.6).

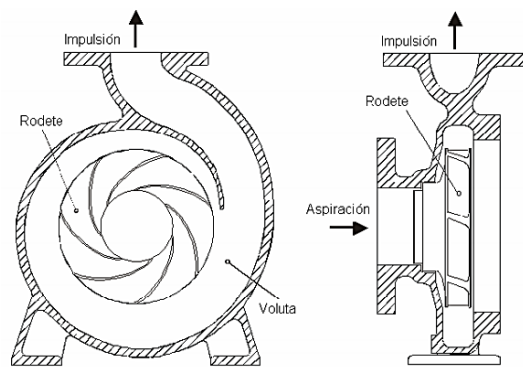


Fig. 6 Elementos constituyentes de una bomba centrífuga. [Disponible en: <http://fluidos.eia.edu.co/lhidraulica/guias/bombas/Bombas.html>]

El **impulsor o rodete** es la parte móvil de la bomba, y, está formado por un conjunto de álabes que giran dentro de una carcasa circular, impulsados por un motor. Dado que una bomba centrífuga es una máquina dinámica, para producir la energía, la bomba depende por completo de los cambios de velocidad del rodete.

La **voluta** es un órgano fijo, dispuesto en forma de caracol alrededor del rodete. La voluta recoge el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambia la dirección de movimiento, y, encamina el líquido hacia la brida de impulsión de la bomba.

La **tubería de impulsión**, instalada a la salida de la voluta, permite evacuar el líquido con la presión y la velocidad creadas por la bomba [15].

B. Curvas características de las bombas centrífugas

La curva de bombeo o curva característica de la bomba, es la representación gráfica del rendimiento de la bomba. La curva característica se emplea para seleccionar una bomba para una aplicación específica, o, para determinar si la bomba instalada rinde al nivel de su capacidad nominal [15]. La Fig.7 muestra una característica típica en la cabeza, la eficiencia, y, la potencia de la bomba, se expresan en función del caudal manejado.

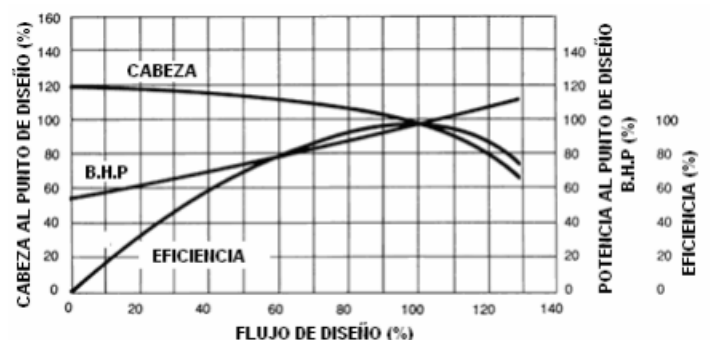


Fig. 7. Curva característica de una bomba centrífuga. [Disponible en: <http://facingconst.blogspot.com/2008/07/bombas-centrifugas.html>]

El punto de operación de una bomba, es aquel en el que la curva característica se intersepta con la curva característica del sistema [15]. La curva característica del sistema, representa el comportamiento del sistema hidráulico al que se encuentra instalada la bomba (ver Fig.8).

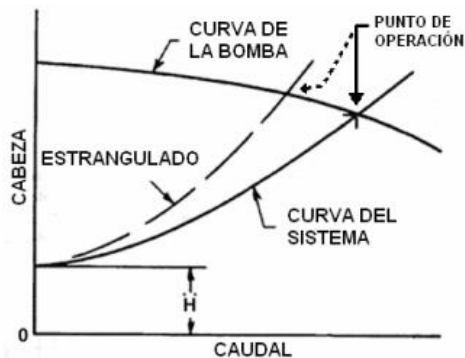


Fig. 8. Comportamiento de un conjunto sistema - bomba, enfatizando en el punto de operación de la bomba. [Disponible en: <http://facingyconst.blogspot.com/2008/07/bombas-centrifugas.html>]

V. GENERALIDADES DEL BANCO DE PRUEBAS ARMFIELD

El banco de pruebas disponible en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTP, fue construido por la firma Armfield Limited en el año 1990 (ver Fig.9)

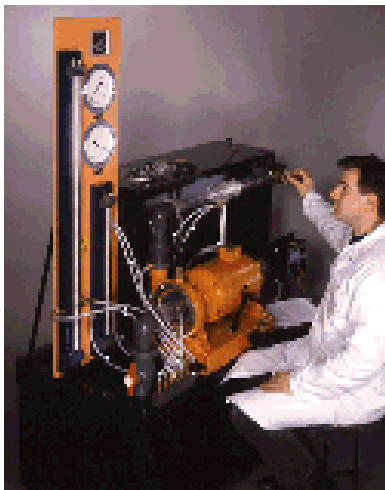


Fig. 9. Banco de pruebas de bombas centrífugas fabricado por Armfield. [Disponible en: <http://www.consultexim.hu/katalogus/armfield/dshtml/rseries/r2.html>]

El banco de prueba incluye una bomba centrífuga, de impulsor abierto de hierro fundido, con placa transparente de plexiglás, y, 4 puntos de muestreo de presión en diferentes radios. El impulsor es activado por un motor de 1.6 KW de 2900 rpm, de velocidad variable controlada por tiristores [16]. Las curvas de rendimiento de la bomba centrífuga del banco, se muestran en la Fig. 10.

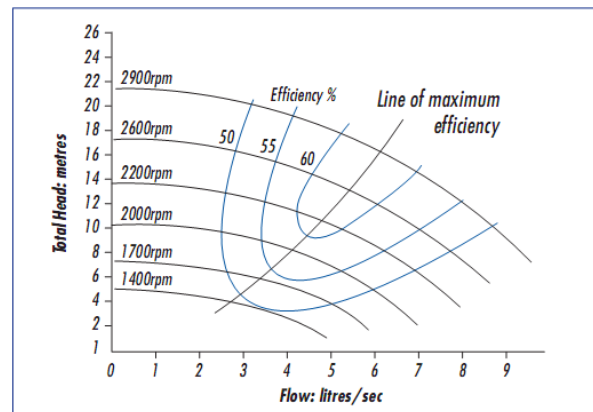


Fig. 10. Curvas características de la bomba incluida en el banco de pruebas de Armfield. [Disponible en: <http://www.consultexim.hu/katalogus/armfield/pdf/r/r2.pdf>]

El banco de pruebas tiene una capacidad volumétrica de 140 litros, sostenida por un depósito de 420 litros. En la versión original, se incluyen [17] un venturímetro, manómetros de mercurio de 0.5m, 1m, y, 25m; un vacuómetro de 0 a 5m para un flujo de hasta 5 l/s, y, un motor shunt de 2.1 HP. El esquema de conexión del banco de pruebas se muestra en la Fig. 11. La instrumentación del banco de pruebas, permite adquirir información relacionada a:

- Cabeza de la bomba / caudal característico a velocidad constante
- Característica de rendimiento de la bomba integrada (diagrama de iso-eficiencia)
- Determinación de la relación entre velocidad, caudal, altura, y, potencia absorbida por una bomba centrífuga
- Alimentación, entrada / flujo característico
- Potencia de válvula cerrada / cabeza característica
- Impulsor de distribución de presión radial

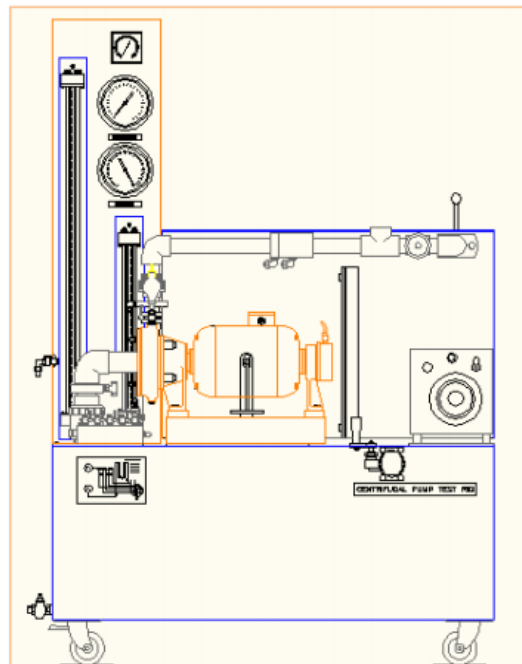


Fig. 11. Esquema de conexión de los elementos del banco de prueba de la bomba centrífuga. [Disponible en: <http://dspace.esoch.edu.ec/bitstream/123456789/896/1/15T00467.pdf>]

VI. REHABILITACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

A. Evaluación inicial del estado del banco

En una primera fase, se efectuó una evaluación general del estado del banco de pruebas (ver Fig.12), identificando y priorizando los problemas existentes. Como resultado, se pudo establecer la necesidad de atender requerimientos en el circuito hidráulico (válvula de pie defectuosa, tuberías obstruidas por óxido, bomba centrífuga inoperativa, y, empaques envejecidos y destruidos), en el circuito de fuerza (motor eléctrico inoperativo, regulador de frecuencia inoperativo, y, problemas en la alimentación eléctrica); y, en la instrumentación del banco.



Fig. 12. Vista general del banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas, al momento de la inspección inicial. [Fotografía de autores]

La gran cantidad de pátina en la superficie y los desperfectos en el resorte de la **válvula de pie** (ver Fig.13), ubicada a la entrada de la bomba, impedían que la presión en el circuito hidráulico se mantenga, volviendo el banco inoperativo.



Fig. 13. Estado inicial de la válvula de pie, a la entrada de la bomba. [Fotografía de autores]

Con el paso de los años, las piezas metálicas acopladas a las tuberías plásticas del banco, se cubrieron de óxido, el mismo que terminó por adherirse a las paredes de las **tuberías** (ver Fig.14 y 15).



Fig. 14. Vista frontal de la tubería durante la inspección inicial. [Fotografía de autores]



Fig. 15. Vista frontal de la tubería durante la inspección inicial. [Fotografía de autores]

La cámara del rodete de la **bomba centrífuga**, estaba cubierta de óxido, lo que trababa los retenes e impedía que los álabes giren (ver Fig. 16).



Fig. 16. Estado de la cámara de la bomba centrífuga con óxido en su interior. [Fotografía de autores]

Los retenes y el eje del **motor eléctrico** (ver Fig.17), se encontraban trabados, presumiblemente por la falta de mantenimiento y de uso.



Fig. 17. Vista general del motor del banco de pruebas, durante la inspección inicial. [Fotografía de autores]

Al intentar evaluar el estado de funcionamiento del *variador de frecuencia* (ver Fig.18), se registró la explosión de un capacitor interno, razón por la cual se decidió dar por inoperativo al dispositivo.



Fig. 18. Vista interior del variador de frecuencia al momento de la inspección inicial. [Fotografía de autores]

Al revisar la acometida eléctrica hacia el motor, se detectó problemas en el embobinado del núcleo del *transformador de voltaje*, por lo cual se decidió evitar su utilización ante riesgo de cortocircuito (ver Fig.19).



Fig. 19. Vista interior del transformador al momento de la inspección inicial. [Fotografía de autores]

B. Plan general de rehabilitación del banco

Para gestionar la rehabilitación del banco, se decidió seguir el flujograma de procesos mostrado en la Fig. 20. En síntesis, se dividió las piezas en sujetas a limpieza y en reemplazables.

El proceso de rehabilitación se inició con los componentes que requerían un menor esfuerzo, pasando luego a los de mayores implicaciones.

Tuberías

Al analizar el estado de las tuberías (ver Fig.21), se determinó que éstas se encontraban intactas, razón por la cual se decidió limpiarlas con un compuesto especial basado en cloro y detergente, para la remoción de óxido.

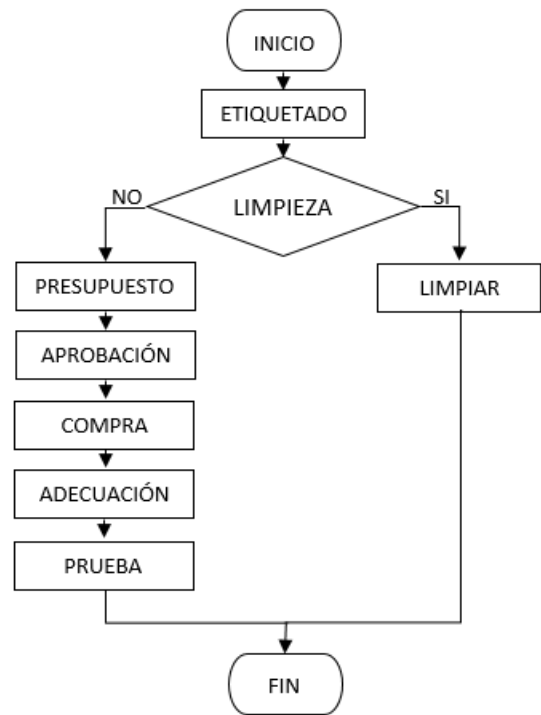


Fig. 20. Flujograma de trabajo. [Fotografía de autores]



Fig. 21 Tuberías con oxido en las paredes. [Fotografía de autores]

Finalmente, se utilizó arena fina para la limpieza a detalle del interior de la tubería, obteniendo los resultados mostrados en la Fig. 22.



Fig. 22 Tuberías luego del proceso de limpieza. [Fotografía de autores]

Válvula de pie

Dado el avanzado estado de deterioro de la válvula de pie, se decidió reemplazarla completamente. En el mercado local, no fue posible encontrar una válvula de idéntica geometría, por lo que fue necesario modificar el modelo más cercano (ver Fig.23). La Fig. 24 muestra la conexión de la nueva válvula de pie en el circuito de aspiración de la bomba.



Fig. 23 Válvulas de pie (antigua y nueva). [Fotografía de autores]



Fig. 24 Instalación de la válvula de pie en el circuito de aspiración de la bomba. [Fotografía de autores]

Bomba centrífuga

La Fig.25 muestra el estado de la cámara del rodete de la bomba centrífuga al ser desmontada. Con ayuda de ácido diclorometano y de una sierra, se intentó remover la cubierta de acrílico transparente de la cámara (ver Fig.26), sin resultados positivos, ya que la cubierta se quebró (ver Fig.27), razón por la cual fue necesario solicitar la fabricación local de una nueva (ver Fig.28).



Fig. 25. Vista frontal de la cámara del rodete de la bomba centrífuga. [Fotografía de autores]



Fig. 26. Limpieza y remoción del empaque de la cámara del rodete. [Fotografía de autores]



Fig. 27. Cámara del rodete de la bomba centrífuga, abierta. Se observa los efectos de la acumulación de óxido. [Fotografía de autores]



Fig. 28 Instalación de la nueva cubierta de la cámara del rodete de la bomba centrífuga. [Fotografía de autores]

Motor eléctrico

El motor eléctrico original del banco de pruebas, de 2 HP de potencia, está diseñado y montado para permitir la medición del torque en el rodete, a través de un sistema de equilibrio con pesas (ver Fig.29).



Fig. 29. Motor original del banco de pruebas con sistema de medición del torque. [Fotografía de autores]

Ante la falla completa del motor original, se requirió la adquisición local de otro de iguales prestaciones, aunque de dimensiones diferentes (ver Fig.30). Esta variación obligó a requerir la modificación del eje del rotor del nuevo motor, y, su acople con la bomba centrífuga (ver Fig.31).



Fig. 30. Variación de la geometría de los motores original y de reemplazo. [Fotografía de autores]



Fig. 31. Instalación del nuevo motor en el banco de pruebas. [Fotografía de autores]

Durante la instalación del nuevo motor en el banco de pruebas, no fue posible reproducir el sistema de medición del torque, por la cual se necesitará implementar un nodo diferente de medición.

Variador de frecuencia

Ante la imposibilidad de adquirir los componentes electrónicos requeridos para la rehabilitación del variador de frecuencia (ver Fig.32), y, con la intención de incorporar las opciones de telemetría al banco de pruebas, se decidió adquirir un nuevo variador de frecuencia tipo G110 de Siemens, cuyas principales características técnicas se muestran en la Tabla 1.



Fig. 32. Vista lateral del variador de frecuencia original. [Fotografía de autores]

Tabla 1

Características técnicas del variador G110 Siemens [18]

Dato	Valor
Potencia	2HP – 1,5KW
Fases	3
Alimentación	220V
Frecuencia de entrada	60Hz
Compatibilidad	DAQ
Control	Señal externa
	BOP
	Control por potenciómetro

El variador de frecuencia se conectó con el motor eléctrico de la bomba, de acuerdo al esquema mostrado en la Fig.33. Para la disposición del variador en el banco de prueba, se decidió reutilizar la caja metálica del variador original, realizando las adecuaciones requeridas para el funcionamiento del BOP (panel de operador) (ver Fig.34)

Para regular la velocidad de giro del motor eléctrico desde el variador de frecuencia, se diseñó una rutina en step7, uno de los lenguajes que soportan los equipos Siemens. La rutina se programó empleando los recursos de la interface de programación (ver Tabla 2). Los parámetros de programación variados, se listan en la Tabla 3. La Tabla 4 muestra los valores introducidos al equipo, considerando las características eléctricas del motor

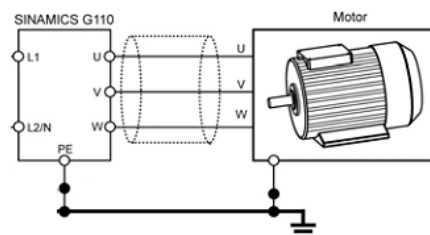
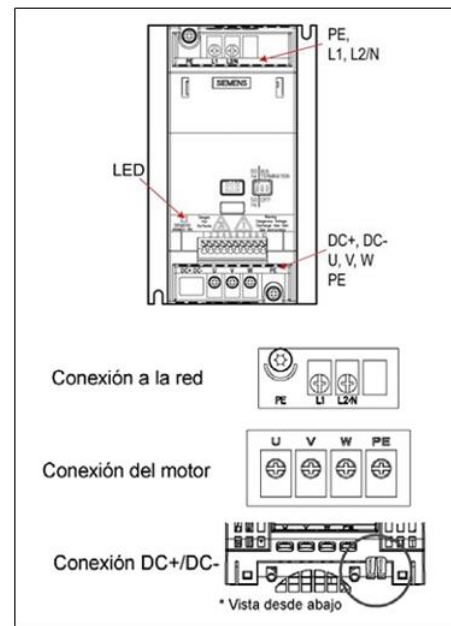


Fig. 33. (a) Esquema de conexión y bornes de variador (b) Diagrama de conexión Motor-variador. [Disponible en: http://cache.automation.siemens.com/dnl/TI0NjkzOQAA_15347973_HB/g110_opi_15347973_0403_sp.pdf]



(a)



(b)

Fig. 34. Instalación del variador de frecuencia en el banco de pruebas. a) Vista interior de la caja metálica del variador. b) Vista lateral del variador instalado. [Fotografía de autores]

Tabla 2

Interface de programación del variador G110 Siemens [18]

Paso	Característica
1	Pulsar P para acceder a los parámetros.
2	Pulsar ▲ hasta visualizar el parámetro a modificar.
3	Pulsar P para acceder al nivel de valor del parámetro.
4	Pulsar ▲▼ hasta el valor requerido.
5	Pulsar P para confirmar y guardar el valor.

Tabla 3

Parámetros y características de programación del variador G110 Siemens [18]

Parámetro	Característica
P0100	Selección de la frecuencia: 0 = 50Hz Europa 1 = 60Hz Norteamérica (HP) 2 = 60Hz Norteamérica (kW)
P0305	Selección de la corriente nominal, A
P0307	Potencia nominal
P0308	CosPhi nominal del motor
P0310	Frecuencia nominal del motor, Hz
P0311	Velocidad nominal del motor, rpm
P0700	Selección de la fuente de ordenes: 0 = Ajuste por defecto de fábrica 1 = BOP (teclado) 2 = Terminal 5 = USS
P1000	Selección de consigna de frecuencia 0 = Sin consigna principal 1 = Consigna MOP 2 = Consigna analógica 3 = Frecuencia fija 5 = USS
P1080	Frecuencia mínima (Hz)
P1082	Frecuencia máxima (Hz)

Tabla 4

Parámetros introducidos en el variador G110 Siemens

Parámetro	Valor
P0100	1
P0305	6 A
P0307	2 HP
P0308	0,86
P0310	60 Hz
P0311	3600 rpm
P0700	1
P1000	1
P1080	0 Hz
P1082	60 Hz

La Fig.35 muestra una vista general del banco de pruebas rehabilitado.



Fig. 35. Vista frontal del banco de pruebas de bombas centrífugas rehabilitado. [Fotografía de autores]

VII. MODIFICACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE TURBINAS TIPO TURGO

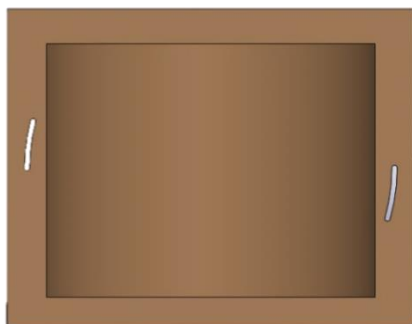
Por cuanto las turbinas tipo Pelton y tipo turgo, son turbinas de acción, las acciones requeridas para la adecuación del banco de pruebas son mínimas: variar el ángulo de inyección, y, diferenciar la forma y disposición de los álabes [16].

A. Variación del ángulo de inyección

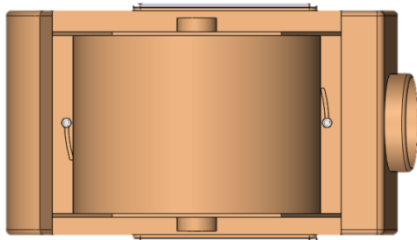
Considerando que en el banco de pruebas de bombas centrífugas existente, el inyector esta inmóvil, se decidió adaptar la *campana* que sostiene las turbinas (ver Fig.36), para facilitar su desplazamiento, y, consecuentemente variar el ángulo de inyección. La opción aceptada, fue la de fresar en la base de la campana, un canal que permita rotar la posición de la misma respecto al inyector (ver Fig. 37).



Fig. 36. Vista general del banco de pruebas de bombas centrífugas. En la parte superior se aprecia la posición del inyector y de la campana. [Fotografía de autores]



(a)



(b)

Fig.37. Propuesta de adecuación requerida para variar la posición de la campana respecto al inyector. (a) Vista inferior de la campana, (b) Vista superior del módulo. [Diseño de autores]

Con ayuda de un técnico mecánico, se fresó un canal tal, que la variación del ángulo de inyección sobre la turbina turgo varíe entre 0° y 20° (ver Fig.38).

B. Diferenciación de la forma y disposición de álabes

El diseño de la turbina turgo es muy similar a una turbina Pelton, ya que la forma de sus álabes es similar, con la diferencia de que en la turgo son la mitad de los de una Pelton (ver Fig.39). Para la misma potencia, el rodete turgo tiene la mitad del diámetro del requerido para una Pelton, y, dobla la velocidad específica [19]. Considerando que el banco de pruebas existente, contiene una turbina Pelton (ver Fig.40 y 41), se decidió tomar esta como base para el diseño de una turbina tipo turgo.

En el desempeño de una turbina tipo turgo, inciden 3 aspectos: diámetro, número de álabes, y, ángulo de incidencia del chorro de agua. En el marco de este proyecto, se acordó modificar el ángulo de inyección (entre 0° y 20°), y, el número de álabes (16 y 20), manteniendo el diámetro (31 cm) por razones de espacio en la campana.



(a)



(b)

Fig.38. Adecuación realizada para variar la posición de la campana respecto al inyector. (a) Vista inferior de la campana, (b) Vista superior del módulo. [Fotografías de autores]



(a)



(b)

Fig.39. Álabes de turbinas de acción. (a) para turbinas Pelton [20], (b) para turbinas turgo [21]

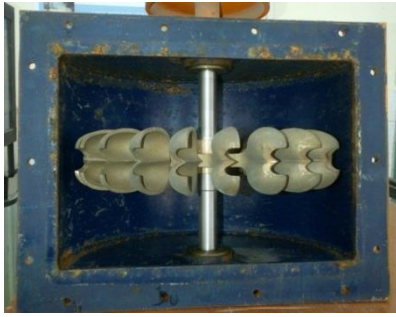


Fig. 40. Turbina tipo Pelton, instalada en la campana del banco de pruebas. [Fotografía de autores]



Fig. 41. Turbina tipo Pelton existente en el banco de pruebas. [Fotografía de autores]

Como primer paso en el diseño de la turbina, se obtuvo moldes de madera del disco y de los álabes de la turbina tipo Pelton (ver Fig. 42). Para los álabes, el molde se partió en 2. Los moldes de madera sirvieron de base para preparar moldes de arena para verter el metal fundido. La turbina se fundió en aluminio con refuerzo de acero, que a diferencia del cobre de la turbina Pelton existente, es mucho más liviano, por lo que se espera una mayor velocidad de rotación.



(a)



(b)

Fig. 42. Moldes de madera de los elementos de la turbina tipo Pelton existente en el banco de pruebas. (a) Álabe, (b) Disco. [Fotografías de autores]

Al solidificarse la aleación, se destruyó el molde de arena, y se granalló las piezas. Para eliminar las espurias del proceso de fundición, se torneo el disco, y se lijó los álabes con lija número 80 y con escorфина. Finalmente se perforó el agujero para el eje, y se fijó la chaveta y el prisionero (ver Fig. 43).



Fig. 43. Elementos de la turbina tipo turgo listos para ensamblaje [Fotografía de autores]

Para el ensamblaje de las turbinas, se dividió el disco en partes iguales (16 o 20) (ver Fig.44). Con ayuda de un macho de roscado y un gira-machos, se perforó y roscó el disco, y con tornillos se fijaron los álabes (ver Fig.45). Para mejorar la rigidez del ensamblaje, en la base de los álabes se utilizó suelda de aluminio. La Fig.46 muestra las turbinas turgo terminadas. La Fig.47 presenta una comparación entre la turbina Pelton, originalmente existente, y una de las turbinas turgo construidas.



Fig. 44. División del disco de la turbina turgo [Fotografía de autores]



Fig. 45. Ensamblaje de los álabes al disco [Fotografía de autores]



Fig. 46. Turbinas turgo construidas [Fotografía de autores]



Fig. 47. Turbinas Pelton y turgo a operar en el banco de pruebas [Fotografía de autores]

Cada una de las turbinas turgo construidas, se monta sobre la campana, se ajusta con el prisionero y la chaveta. Una vez listo el montaje, se coloca los rodamientos en los extremos del eje (ver Fig.48). La campana se coloca sobre el banco, y, el ángulo de inyección se regula desplazando la campana por el canal (ver Fig.49).



Fig. 48. Turbina turgo montada en la campana del banco de pruebas [Fotografía de autores]



Fig. 49. Turbina turgo montada en la campana del banco de pruebas y lista para experimentación [Fotografía de autores]

VIII. CONCLUSIONES

- El incremento de la demanda energética a partir de la revolución industrial, llevó a la implementación de un número cada vez mayor de centrales de hidrogenación, por lo que las turbinas hidráulicas se convirtieron en una solución de ingeniería de uso masivo.
- Los bancos de prueba para ensayos de bombas, permiten reproducir, en un ambiente controlado, las condiciones reales en las que operan las máquinas hidráulicas, tuberías, y, accesorios.
- La propuesta de adecuación del banco de pruebas de bombas centrífugas existente en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil de la UTPL, se basó en que la operación de las turbinas de acción requiere gestionar el ángulo de incidencia del chorro de agua.
- Se rehabilitó el banco de pruebas Armfield para el estudio de bombas centrífugas, existente en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil; para posteriormente modificarlo para el estudio del desempeño de turbinas tipo turgo.

IX. REFERENCIAS

- [1] Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, Hidromecánica y energías alternas [Online]: Disponible en: <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/1480/1/Tesis%20-%20Respaldo1hidromecanica.pdf> [Consultado el 19 de agosto del 2012].
- [2] Pedro Fernández Díez, Turbinas Eléctricas [Online]: Disponible en: <http://libros.redsauce.net/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/01Turb.Hidr.pdf> [Consultado el 20 de agosto del 2012].
- [3] EPA, Energía de la Patagonia AYSEN S.A.; Tipos de Turbinas [Online]: Disponible en:

- <<http://www.tuscanywind.com/Rotore%20Turbina%20Turgo%20in%20Acciaio%20inossidabile%2024%20pale>> [Consulta 20 de agosto de 2012].
- [4] Biblioteca sobre Ingeniería Energética, Turbinas [Online]: Disponible en: <<http://es.libros.redsauce.net/?pageID=19>> [Consultado el 19 de agosto del 2012].
- [5] ESHA, Guía para el desarrollo de una pequeña central Hidroeléctrica [Online]: Disponible en: <http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/GUIDES/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_ES_02.pdf> [Consulta 20 de agosto de 2012].
- [6] CMCHYDRO, Características de las turbinas [Online]: Disponible en: <<http://www.cmchydro.es/turbina-pelton.php>> [Consulta 20 de agosto de 2012].
- [7] UCV, Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, “Diseño y Cálculo de Turbinas” [Online]: Disponible en: <<http://ucvvirtual.edu.pe/campus/HDVVirtual/700439399/TURBINAS%20HIDRAULICAS/7000000269/Ejemplo%20de%20calculo%20de%20Turb%20Pelton%20ecuaciones.pdf>> [Consulta 17 de enero de 2013].
- [8] TuscanyWind, Harvesting Power, Rotore Turbinas Turgo in acciaio inossidabile [Online]: Disponible en: <<http://www.tuscanywind.com/Rotore%20Turbina%20Turgo%20in%20Acciaio%20inossidabile%2024%20pale>> [Consulta 20 de agosto de 2012].
- [9] II Curso Internacional de Especialización en Micro y Minicentrales Hidroeléctricas [Online]: Disponible en: <<http://fainweb.uncoma.edu.ar/La.M.Hi/textos/Pequeñas%20centrales/UNIDAD%205.pdf>> [Consultado el 17 de agosto del 2012].
- [10] Escuela Politécnica Nacional, Modelación y Diseño para Micro-Centrales de Generación Hidroeléctrica [Online]: Disponible en: <<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1073/1/CD-1906.pdf>> [Consultado el 17 de agosto del 2012].
- [11] ENERGOCLUB, Managenergy, “il Forum, Energetic Ambiente” [Online]: Disponible en <<http://www.energoclub.org/page/turbine-idroelettriche>> [Consulta 10 de enero del 2013].
- [12] Tecnología, Relaciones de transmisión [Online]: Disponible en <<http://tecnoapostol.wordpress.com/2011/12/19/las-relaciones-de-transmision/>> [Consulta 17 de enero del 2013].
- [13] Universidad de Oriente, Escuela de ingeniería y ciencias aplicadas, Departamento de mecánica, Gabriela Cristina Tobía Rodríguez, “Automatización del banco de pruebas Armfield Fm20 de una bomba centrífuga”, [Online]: Disponible en: <<http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/308/1/Tesis-IM008-T80.pdf>> [Consultado el 17 de enero del 2013].
- [14] Universidad de Oriente, Escuela de ingeniería y ciencias aplicadas, Departamento de mecánica, Emir José Milano Bruzco, “Mejoramiento de los planes de mantenimiento preventivo de los equipos del área de control de sólidos de una empresa de servicios petroleros”, [Online]: Disponible en: <<http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/304/1/Tesis-IM004-M56.pdf>> [Consultado el 17 de enero del 2013].
- [15] Pedro Fernández Diez, Bombas centrífugas y volumétricas [Online]: Disponible en: <<http://libros.redsauce.net/Bombas/PDFs/BOMBAS01.pdf>> [Consultado el 17 de enero del 2013].
- [16] ARMFIELD, Discovery Armfield, “Equipos de enseñanza e investigación en ingeniería”, [Online]: Disponible en: <<http://www.discoverarmfield.co.uk/gsf9-esp/files/assets/downloads/publication.pdf>> [Consultado el 17 de enero del 2013].
- [17] SPOCH, Facultad de mecánica, Escuela de ingeniería mecánica, “Diseño e implementación de un sistema de gestión de calidad para el laboratorio de turbomaquinaria con fines de acreditación ante el organismo de acreditación ecuatoriano (oea)”, [Online]: Disponible en: <<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/896/1/15T00467.pdf>> [Consultado el 20 de enero del 2013].
- [18] SIEMENS, “Datasheet Variador G110”, [Online]: Disponible en: <http://cache.automation.siemens.com/dnl/TI0NjkzOQAA_15347973_HB/g110_opi_15347973_0403_sp.pdf> [Consultado el 30 de septiembre del 2013].
- [19] No se reconoce autor, “Aplicación de las turbinas hidráulicas”, [Online]: Disponible en: <<http://tesis.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/98/1/TESIS%20APLICACION%20lechugabarrera.pdf>> [Consultado el 20 de agosto del 2013].
- [20] Fabian Drechsler, Universität Ulm SS, “Physik im Alltag” Pelton –Turbine (Aufbau), [Online]: Disponible en: <http://theotpl.physik.uni-ulm.de/~rein/Hauptseminare/SS11/Vortraege_Final/Vortrag_8_Fabian_Drechsler/Wasserkraftwerke.pdf> [Consultado el 14 de septiembre del 2013].
- [21] Joseph Hartvigsen, Discovery Ar Hartvigsen-Hydro, Components for microhydro systems, “Custom Turgo Runners”, [Online]: Disponible en: <<http://h-hydro.com>> [Consultado el 14 de septiembre del 2013].