UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM Tesis de Pregrado de Acceso Abierto

2017

IMPLEMENTACIÓN DE BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS MONO Y TRIFÁSICO DE GRUPOS BOMBA-TURBINA

MELLA MORA, PABLO FELIPE

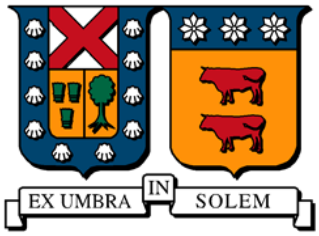
http://hdl.handle.net/11673/25806

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO-CHILE



“Implementación de Banco de Pruebas para Ensayos Mono y Trifásico de Grupo Bomba-Turbina”

PABLO FELIPE MELLA MORA

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Mg. Ing. Jaime Espinoza S.

PROFESOR COREFERENTE: Ing. Rafael Mena Y.

Septiembre - 2017

Resumen Ejecutivo

El presente trabajo consideró el diseño e implementación de un nuevo banco de ensayos de bombas centrífugas funcionando de forma reversible como turbina, a objeto de realizar ensayos de grupos turbina-generador ya sea monofásico de 2 [kW],para usos domésticos o trifásico para uso industrial de 20 [KW] en el Laboratorio de Termofluidos(LTF) de esta Universidad.

El LTF dispone de diferentes circuitos de ensayos para turbinas hidráulicas y bombas centrífugas como parte de su superestructura como de memorias anteriores. De ahí que ya se disponía de un grupo de alimentación motobomba que posibilitaba la operación de un segundo grupo en la modalidad bomba-turbina, simulando diferentes rangos de altura de operación y caudales variables hasta unos 200 m^3/h. El presente proyecto se reinició a partir de esta situación hasta la conformación y puesta en marcha de los dos nuevos grupos generadores.

El trabajo consideró además la implementación de los sistemas complementarios eléctricos, control electrónico de carga y sistema de disipación de energía para cada grupo, además de los instrumentos de medición necesarios para realizar los ensayos. El nuevo banco de ensayos permite obtener las curvas de potencia versus caudal y eficiencia global de cada grupo ensayado. Los resultados obtenidos indican eficiencias globales de cada grupo entre 45 y 62%, valores muy razonables para grupos de este nivel de potencia.

El Laboratorio de Termofluidos dispone, con este trabajo, de un banco de ensayos que posibilita validar las condiciones de operación de diferentes configuraciones bomba-turbina para condiciones diferentes a las aplicadas.

La inversión que significó readaptar este nuevo banco de ensayos alcanzó un monto de unos US 1300, aporte logrado por gestiones personales del autor del trabajo.

Abstract

The present work is focused on the design and implementation of a new Test Stand for centrifugal pumps which work in a reversible way as a turbine in order to conduct tests on turbine-generator groups which can either be 2 [kW] single-phased turbine-generator for domestic purposes or 20 [KW] three-phased turbine-generator for industrial use in the Federico Santa María Technical University thermofluid laboratory (LTF).

LTF offers different test circuits for hydraulic turbines and centrifugal pumps as part of its superstructure and earlier memories. From then on, an electrical power supply for water pump become available which enabled the functioning of a second group on turbine-pump mode, simulating different height ranges and variable flows up to 200 m^3/h. This project was re-initialized starting from this situation up to the creation and the launching of the two new group generators.

The project considered electrical complementary systems implementation, electronic load control and energy dissipation system for each group, besides measurement instruments necessary for conducting tests. The new test stand enables obtaining power curves compared to variable flows and global efficiency in each tested group. The results gathered show global efficiencies in each group between 45% and 62%, very reasonable amounts considering the potency of these groups.

Thermofluid laboratory provides, with this work, a test stand which enables to validate operational conditions of different turbine-pump configurations for different conditions to the ones applied.

The investment of re-adapting this new test stand went over 1300 USD, amount of money which was fully paid by the author of this paper.

Índice General

1 Introducción y objetivos 1

1.1 Introducción 1

1.2 Objetivos 2

2 Comportamiento de bombas hidráulicas funcionando como turbinas hidráulicas.

2.1 Historia 3

2.2 Experiencias anteriores del DIMEC-USM en este campo 5

2.3 Aspectos Generales 10

2.4 Trabajo de una bomba funcionando como turbina. 11

2.4.1 Diferencias en el diseño de una bomba centrífuga y una bomba modo turbina. 12

2.5 Características teóricas del funcionamiento de una bomba modo turbina. 15

2.5.1 Regulación de la velocidad rotacional 16

2.5.2 Control del caudal y altura de carga de la máquina 17

2.5.3 Requerimientos en el diseño 18

3 Banco de prueba 18

3.1 Diseño del banco de ensayos. 20

3.2 Sistema de alimentación 22

3.3 Selección de tuberías 23

3.4 Diagrama general 24

3.5 Circuito Hidráulico 25

3.5.1 Grupo Bomba modo turbina -Generador Trifásico 26

3.5.2 Grupo Bomba modo Turbina -Generador Monofásico 26

3.5.3 Estanque 27

3.5.4 Válvula mariposa reguladora de caudal 27
3.5.5 Flujometro 28
3.5.6 Manómetro 28
3.5.7 Mano-Vacuometro 29
3.6 Reguladores de control de carga 29
3.6.1 Regulador de control de carga sistema monofásico ¨A2¨ 29
3.6.2 Regulador de control de carga sistema trifásico ¨J3¨ 30
3.7 Ensayos bomba funcionando como turbina 31
3.8 Flexibilidad del banco de ensayos. 35
4 Análisis de datos 38
4.1 Grupo Turbina-Generador Monofásico 38
4.1.1 Gráfico 1500 RPM, 3.2 BAR 38
4.1.2 Gráfico 1500 RPM, 3.2 BAR 39
4.1.3 Gráfico 1500 RPM, 3.8 BAR 40
4.1.4 Gráfico 1500 RPM, 3.8 BAR 41
4.1.5 Gráfico 1500 RPM, 4.4 BAR 42
4.1.6 Gráfico 1500 RPM, 4.4 BAR 43
4.2 Grupo Generador-Turbina Trifásico 44
4.2.1 Gráfico 1500 RPM 44
4.3 Puesta en marcha Banco ensayos 45
5 Conclusiones y propuestas de mejoras 46
6 Referencias 48
7 ANEXOS 50
7.1 Sistema de alimentación. 50
7.1.1 Bomba de alimentación 50

7.1.2 Motor Eléctrico 50
7.2 Equipos a estudiar 50
7.2.1 Bomba de trabajo 1 51
7.2.2 Generador trifásico 51
7.2.3 Bomba de trabajo 2 51
7.2.4 Generador Monofásico 52
7.3 Instrumentos de medición. 52
7.3.1 Tacómetro: 52
7.3.2 Multímetro pinza digital: 53
7.4 Curvas características de bombas ensayadas [10]. 54
7.5 Campo de aplicación de la bombas centrífugas. 56
7.6 Layout del panel del controlador de carga ¨A2¨ 57
7.7 Layout panel controlador de carga ¨J3¨ 58
7.8 Tablas datos ensayados. 59
7.8.1 Datos Ensayos Generador Monofásico 59
7.8.2 Datos Ensayos Generador Trifásico 60
7.9 Imágenes implementación Banco de Ensayos Bombas Funcionando como Turbina 61
7.10 Imágenes sistema de control, bancos de carga y tableros eléctricos. 66
7.10.1 Tablero eléctrico sistema de alimentación. 66
7.10.2 Tablero eléctrico y controlador de frecuencia generador monofásico. 67
7.10.3 Tablero eléctrico y controlador de frecuencia generador trifásico. 67
7.10.4 Banco de resistencias generador trifásico. 68

Índice de Figuras

Figura 1 Ensayos Bomba modo Turbina. Roberto Monteverde. 7

Figura 2 Esquema Instalación Banco Ensayos PAT. Luis Cáceres 8

Figura 3 Banco ensayo bombas centrífugas de pulpa (relave) funcionando como turbina. Diego Álvarez 10

Figura 4 Esquema que muestra el paso del fluido y sentido de giro de una bomba centrifuga y una turbina convencional 11

Figura 5 Curva Característica, Altura total en función del flujo de una bomba y una PAT. 13

Figura 6 componentes de una bomba funcionando como turbina.. 16

Figura 7 Factores que afectan la velocidad rotacional de la turbina. 17

Figura 8 Instalación de Manómetros. 19

Figura 9 Diseño Banco de Ensayos Vista Superior 20

Figura 10 Banco de Ensayos 21

Figura 11 Diseño PAT ensayadas. 22

Figura 12 Sistema de Alimentación 23

Figura 13 Diagrama General Banco de Ensayos. 24

Figura 14 Circuito Hidráulico 25

Figura 15Bomba Turbina- Generador Trifásico 26

Figura 16 Grupo Bomba Turbina-Generador Monofásico 26

Figura 17 Estanque Banco de Ensayos. 27

Figura 18 Válvula reguladora de caudal Sistema de Alimentación. 27

Figura 19 Flujometro 28

Figura 20 Manómetro en la Entrada de cada PAT. 28

Figura 21 Mano-Vacuometro en la descarga de cada PAT. 29

Figura 22 Tablero de ampolletas, sistema de disipación energía generador monofásico 34

Figura 23 Banco de resistencias generador trifásico. 35

Figura 24 Diseño PAT- Generador corriente continua. 36

Figura 25 Tacómetro 52

Figura 26 Multímetro 53

Figura 27 Curva característica Bomba Vogt N 665 54

Figura 28 Curva característica Bomba Vogt N629B 55

Figura 29 Campo de trabajo bombas centrifugas Vogt. 56

Figura 30 Layout controlador de carga "A2" 57

Figura 31 Layout controlador de carga "J3" 58

Figura 32 Instalación tuberías banco ensayo. 61

Figura 33 Soldadura codo-tee con tubería. 61

Figura 34 Conexión sistema codo-tee con flange tubería 61

Figura 35 Soldadura reducción 62

Figura 36 Instalación codo en sistema de tuberías banco de ensayo. 62

Figura 37 vista implementación banco de ensayos 63

Figura 38 Conexión válvula PAT. 63

Figura 39Pintado base PAT. 63

Figura 40 Banco de ensayos 64

Figura 41 Conexión Piping y PAT terminado. 64

Figura 42 Sistema eléctrico y controlador de frecuencia generador trifásico 65

Figura 43 Descarga Pat 65

Figura 44 Banco ensayos final. 66

Figura 45Tablero eléctrico sistema de alimentación circuito 66

Figura 46 Tablero eléctrico y controlador de frecuencia generador monofásico 67

Figura 47Tablero eléctrico y controlador de frecuencia generador trifásico. 67

Figura 48 Banco de resistencia generador trifásico 68

1 Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Cuando se analiza la situación energética de países en desarrollo, en especial en áreas rurales que no disponen de energía eléctrica, las pequeñas centrales hidráulicas (PCH) son una buena alternativa en la generación de energía. Pero el costo de implementación de estas pequeñas centrales en algunos casos es inviable, por lo cual el uso de bombas centrifugas como turbinas (PAT) puede considerarse como una alternativa tanto técnica como económica muy valiosa en la dirección de reducir el costo de inversión de una turbina convencional.

Las bombas usadas como turbinas, es decir con su sentido de rotación inverso tienen una serie de ventajas sobre una turbina convencional, debido al menor costo en su adquisición, mayor facilidad para su mantenimiento, mayor disponibilidad en el mercado, etc. No obstante existen algunas dificultades como el desconocimiento de las curvas características de estas por catálogo del fabricante, debido a que estas no se fabrican para utilizarse de este modo, de ahí sea necesario conocer el punto óptimo de operación para su buen funcionamiento. Por ello el disponer de un banco de ensayos para realizar pruebas de funcionamiento de las bombas centrifuga funcionando como turbina permite establecer el rango de máximo rendimiento.

El presente trabajo muestra el diseño e implementación del nuevo banco de ensayo de bombas centrífugas trabajando de forma reversible, en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María Casa Central, cuya principal función será obtener el rendimiento de las bombas en sentido inverso, además de utilizarse para fines académicos dentro de la Universidad ya que el banco de ensayos quedará de forma permanente en ésta.

1.2 Objetivos

El presente trabajo consiste en la implementación de un banco de ensayos de bombas centrifugas en operación reversible como turbina (PAT), el cual se ubica en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María. El banco de pruebas dispondrá de un grupo (220V) y de un segundo grupo (380V), con sus correspondientes tableros eléctricos, controles electrónicos y sistema de disipación, lo cual permitirá disponer de un banco de ensayos de prueba de conjuntos similares y dar servicio a otros grupos generadores.

Para cumplir con este propósito se propone el siguiente plan de trabajo:

- Analizar el estado del arte en aplicaciones bombaturbina.
- Analizar las experiencias del DIMEC - USM en este campo.
- Analizar capacidad y flexibilidad de banco actual de ensayos.
- Proponer diagrama de ensayo para proyectos pequeños y medianos.
- Elaborar diagrama eléctrico-electrónico del conjunto bombaturbina.
- Implementar equipos propuestos y lograr pruebas operacionales.
- Elaborar cartilla de ensayos demostrativos.

2 Comportamiento de bombas hidráulicas funcionando como turbinas hidráulicas.

2.1 Historia

El impulsor centrífugo ha existido hace más de 200 años, pero su mejor aprovechamiento y desarrollo se produjo en los últimos 85 años. Este impulsor centrífugo se encuentra en las bombas centrífugas y se piensa que son las máquinas más utilizadas en nuestros tiempos. La invención del impulsor centrífugo es una obra de Leonardo Da Vinci quién sugirió la idea de utilizar fuerza centrífuga para levantar líquido.

El campo de aplicación de estas máquinas ha ido aumentando ampliamente al pasar de los años por lo cual las industrias dependen cada día más de éstas.

Las investigaciones sobre el funcionamiento de las bombas modo turbina iniciaron alrededor del año 1930 y el principal reto fue la selección de una bomba adecuada para su uso reversible en una mini central hidroeléctrica. En el año 1931 cuando Thoma y Kittredge [5] publicaron un artículo ¨llamado bombas centrífugas operadas bajos condiciones anormales¨ donde accidentalmente hallaron que la bomba centrífuga puede funcionar muy eficientemente en su modo inverso.

El funcionamiento de la bomba en modo turbina se ha convertido en un importante desafío de estudio para los fabricantes de bombas hidráulicas, en 1941 Knapp [13] publicó las características de rendimiento de algunas bombas hidráulicas basado en algunas investigaciones experimentales realizadas. En 1957 Stepanoff [13] informó sobre el concepto de varios modos de funcionamiento de la bomba en sentido inverso a través de curvas de rendimiento.

Entre las décadas de 1950 y 1960 el concepto de centrales de bombeo se desarrolló principalmente en países desarrollados.

En 1994 Frenk [14] llevo a cabo el análisis de los costos de la implementación de una micro central hidroeléctrica utilizando bombas en modo turbina y también utilizando una turbina convencional. El costo consideraba tanto turbo máquinas, conductos forzados, depósitos de almacenamiento, etc. Estos costos fueron considerados según la magnitud que se requiere la cual dependía directamente del flujo nominal que se tuviera. Por lo cual considerando inversión inicial, costos de mantención y operación hacen que las bombas funcionando en modo turbina sea mucho menos costoso que la aplicación de turbinas convencionales.

En 2006 Chuenchooklin [14] presentó el análisis de costo para la generación de 1.116 [Kw] potencia para una micro central hidroeléctrica para una aldea agrícola en Tailandia, el costo de implementación del proyecto fue de aproximadamente US 4000 (45% tuberías del sistema, 37% sistema de control, electricidad y el 18% para el sistema de bombas centrifuga).La recuperación de la inversión se estimó en un plazo de 6 años, además los resultados arrojaron que la energía producida era suficiente para el funcionamiento de la luz eléctrica y el uso de algunos electrodomésticos.

En 2010 Arriaga [14] llevo a cabo el análisis de un proyecto de generación de energía de 2[KW] de potencia en la República Democrática Popular Lao para comunidades entre 40 y 500 personas. 3 opciones fueron evaluadas para el estudio de la generación de energía a través de recursos hídricos, la primera la utilización de bombas en modo inverso, la segunda utilización de una turbina vietnamita y la última energía solar usando paneles fotovoltaicos. Los costos se dividieron en obras civiles y costos de distribución de energía. Según el análisis el menor costo de instalación corresponde a la instalación de las bombas y el mayor costo de inversión correspondió a la instalación de los paneles fotovoltaicos.

En los últimos años se han encontrado otras formas de aplicación para las bombas en sentido inverso, este es el caso de la industria química que en ciertas ocasiones en necesario disipar la energía de fluidos de alta presión a través de pequeñas tuberías por lo cual esas se utilizan para recuperar algo de la energía disipada.

Toma importancia en el uso de las bombas en modo turbina la empresa Germana Zweckverband Landeswasserversorgung [15], uno de los mayores proveedores de agua potable en dicho país. Esta empresa ha aprovechado el potencial de 8 bombas aspirantes KSB Etanorm 153-315, para la

generación de electricidad para sus propias necesidades y para la reducción de su demanda al consumo de la red nacional, la utilización de las bombas en modo turbina equivale a un ahorro aproximado del 25% del consumo de energía eléctrica. La empresa proporciona agua potable a través de 3 instalaciones en Langenau, Dischinguen y Blaubeuren a unos 3.5 millones de clientes, la cantidad suministrada puede llegar a unos 100 millones de galones al día.

Hace aproximadamente 20 años Zweckverband Landeswasserversorgung tomo la decisión de utilizar bombas en modo turbina, después de conocer los beneficios de esta utilización de las bombas la empresa decidió colocar de manera permanente 8 bombas KSB. Para la generación de energía el caudal depende de la demanda que tenga la empresa por lo cual cuando la demanda es baja no es posible ejecutar todas las bombas modo turbina, pero funcionando 3 bombas pueden generarse 170[Kw] de electricidad, mientras que 6 turbinas pueden generar 230[Kw].

2.2 Experiencias anteriores del DIMEC-USM en este campo

El estudio del uso de las bombas funcionando como turbina no es algo nuevo dentro del Departamento de Ingeniería Mecánica de esta Universidad, de hecho en el año 1980 el Ingeniero Pablo Espinoza encargado de Hidrotecnologías ONG-CETAL, publicó el libro ¨utilización de bombas centrífugas como turbinas hidráulicas¨[8] sobre la base de ensayos realizados en el Laboratorio de Termofluidos de esta Universidad en el cual explica el funcionamiento de las PAT, las ventajas que tienen sobre las turbinas hidráulicas y como estas en el último tiempo han llamado la atención de las empresas hidrogeneradoras de electricidad de pequeña escala, como un aporte en el desarrollo de localidades rurales o alejadas que no cuenten con electricidad.

Se destaca además el trabajo realizado por la escuela Federal de Ingeniería de la Universidad de Itajubá, Brasil sobre este tema con la cual se mantuvo contacto en el marco de más 10 encuentros Latinoamericanos en pequeños aprovechamientos Hidroenergéticos, realizado en distintos países de Latinoamérica, entre ellos Chile en el año 1989 y 2005(ELPAH).

También fueron desarrolladas tecnologías orientadas a la generación de 12 [V] para carga de baterías, el sistema contaba con una pequeña bomba centrífuga conectada a un alternador de automóvil, la

potencia obtenida fue de 0.5 [kw]. Esta unidad necesitó un inversor para transformar la generación de 12 [V] a220 [V] encareciendo el conjunto.

Al pasar el tiempo varios alumnos de la Universidad han realizados estudios y pruebas sobre este tema como Roberto Monteverde que en el año 2004 realizo su trabajo de título sobre la ¨ Predeterminación del comportamiento de trabajo de Bomba-Turbina con Aplicación de las Leyes Modelo¨ [4]. En el laboratorio de Termo fluidos de la Universidad ensayó bombas centrífugas funcionando como turbina con lo cual hizo recomendaciones sobre la utilización de estas en la X región del país.

Estos ensayos correspondieron en calcular la potencia eléctrica a diferentes alturas y diferentes velocidades rotacionales de las bombas ensayadas. Debido a que las condiciones nominales de las bombas ensayadas no eran las condiciones ideales, utilizó correlaciones teóricas para validar sus resultados, en el cual tuvo desviaciones entre el 5 y 7% lo cual no son valores altos para el comportamiento real de la bomba ensayada.

Además realizo un análisis de la cartera de proyectos disponibles en la X región con los resultados obtenidos de los ensayos y sugirió para cada proyecto las bombas modo turbina que se podrían utilizar con respecto a las bombas ensayadas en el laboratorio en base a los resultados obtenidos.

Además hizo un análisis del impacto económico que trae realizar un proyecto con bombas funcionando como turbinas en comparación de turbinas convencionales el cual es mucho menor, debido a la simplicidad del equipo, mantención de estas, importación de estas al país, además del personal calificado para realizar mantenciones debido a fallas o mantenciones preventivas.

Figura 1 Ensayos Bomba modo Turbina. Roberto Monteverde.

Hubo también otros trabajos como el de Luis Cáceres que realizó el estudio en su trabajo de Investigación Aplicada del ¨Comportamiento de Bomba Ensayada como Turbina Hidráulica¨ [3] el cual consistió en comprobar el funcionamiento de la bomba modo turbina y determinar la eficiencia de la bomba trabajando de forma reversible.

Realizó ensayos en el Laboratorio de Termo fluidos de la Universidad implementado una banco de prueba para ensayar bombas en sentido reversible por lo cual utilizo la bomba centrífuga conectada con un acoplamiento directo a un generador de corriente continua de potencia máxima de 16 [Kw] y finalmente esté conectado a un banco de carga de resistencias eléctricas.

Los ensayos realizados consistieron en mantener la presión constante a la entrada de la bomba, por lo tanto del generador se obtienen los parámetros de voltaje y corriente para el cálculo de la potencia

eléctrica, además del circuito de obtuvieron los parámetros de velocidad rotacional del grupo bombaturbina-generador, la presión de entrada y salida de la bomba.

Se obtuvieron valores con resultados importantes porque lograron en algunos saltos de altura obtener altas eficiencias de la bomba, además de energía considerable para poder alimentar con energía eléctrica una pequeña zona rural.

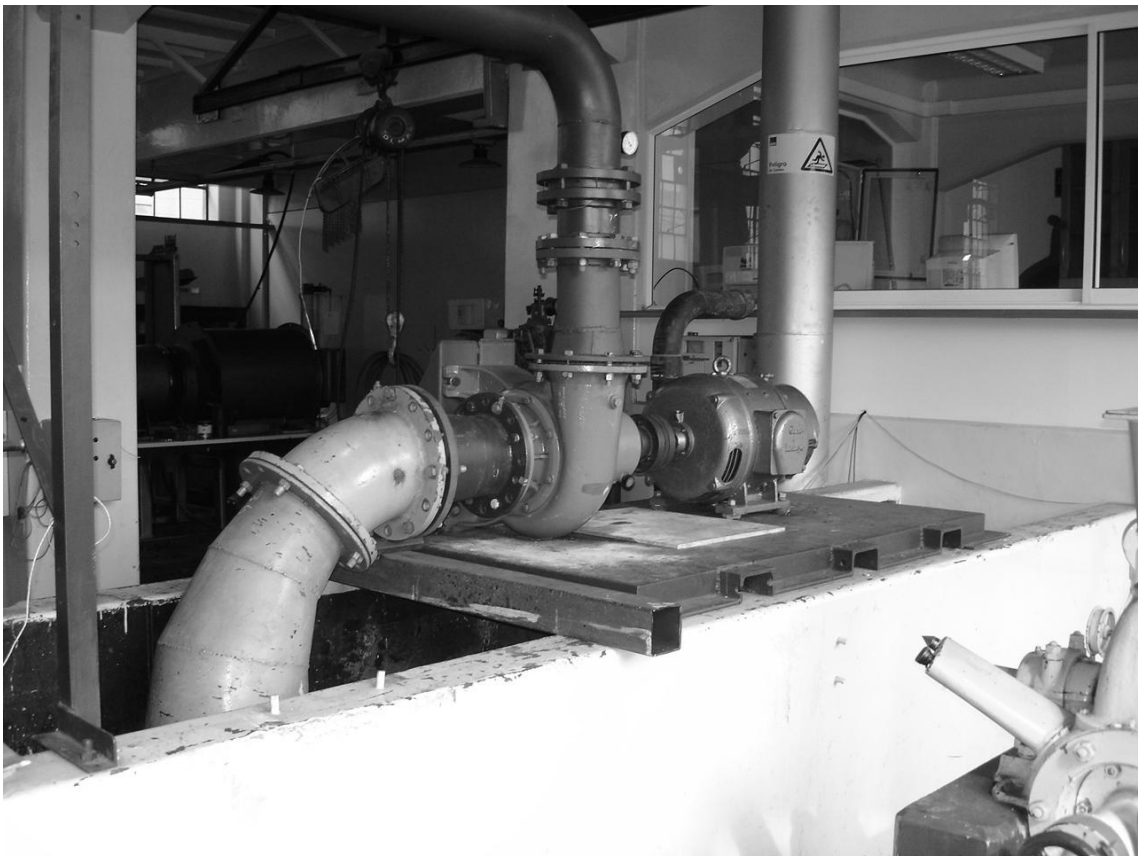


Figura 2 Esquema Instalación Banco Ensayos PAT. Luis Cáceres

El año 2012 Diego Álvarez realizó su trabajo de título sobre el estudio de la ¨Determinación experimental del comportamiento de trabajo de bombas centrífugas de pulpa (relave) operando en forma reversible como turbinas hidráulicas [2].

Implemento un banco de ensayos de bombas funcionando como turbinas en el Laboratorio de Termo fluidos de la Universidad, en el cual realizo el estudio de las curvas características de una bomba centrífuga de pulpa del sector minero para ver la eficiencia que tiene esta y si es recomendable el uso de estas en el sector minero para el aprovechamiento del potencial hidráulico para la conversión de energía renovable no convencional, además de determinar la relación que tienen las curvas características en modo bomba y modo turbina.

El banco de ensayos consistió en un sistema de alimentación motor-bomba y el sistema a estudiar correspondió a una bomba de pulpa (relave) la cual fue conectada a un Freno Dinamo-métrico para poder medir el torque del equipo el cual absorbe el torque generado y mantiene las revoluciones constantes.

Los parámetros que se tomaron en cuenta en los ensayos realizados corresponden a las alturas m.c.a., flujo, torque y velocidad rotacional del sistema rotacional del equipo generador, se calculó la potencia entregada por el equipo, además de la presión de entrada y salida de la bomba a estudiar.

Los ensayos realizados correspondieron manteniendo la presión constante para unos casos y la velocidad rotacional constante para otros, así trabajar bajos distintos puntos de operación, variando el caudal y la altura de trabajo.

Los resultados obtenidos correspondieron que en los casos que se mantuvo la velocidad rotacional constante se observó que existía una relación entre el BEP (¨Best Effiency Point¨) en modo bomba y modo turbina, estos resultados arrojaron que al ir aumentando la velocidad rotacional en los distintos ensayos realizados al grupo bomba-generador aumentaba el BEP ya que se acercaban a la velocidad rotacional del equipo, además se comprobó que el caudal de la bomba es mayor en modo turbina, según algunos resultados es casi 2 veces mayor que en modo bomba, por lo cual se encuentra dentro de los valores admisibles, además de obtener valores satisfactorios de potencia para hacer viable este proyecto en alguna faena minera.

Figura 3 Banco ensayo bombas centrífugas de pulpa (relave) funcionando como turbina. Diego Álvarez

2.3 **Aspectos Generales**

Una bomba centrífuga no difiere sustancialmente de una turbina hidráulica, prácticamente son máquinas que solo difieren en su aplicación, ya que una bomba transforma la energía mecánica en energía hidráulica y una turbina hace el proceso inverso. Debido a esto el diseño de cada una de estas está marcado por la eficiencia hidráulica para cada una de sus aplicaciones, las cuales están determinadas en su proceso de conversión de energía por las características de construcción del rotor y de la voluta.

Es importante destacar que las bombas funcionando como turbinas (PAT) cambian debido a sus condiciones de operación como son el caudal y la altura debido a que se reducen las pérdidas

hidráulicas. Debido a esto para la selección de una bomba modo turbina se exige que los puntos de operación (altura y caudal) se realicen donde encuentra la mayor eficiencia para ésta.

De este modo la altura en el modo bomba difiere de la altura en el modo turbina, aproximadamente al doble de las pérdidas hidráulicas:

$$H_{bom} \approx H_{turb} * \eta^2 \qquad (2.0)$$

Esta ley generalmente no es totalmente válida en todo su aspecto. La energía transferida entre un fluido y un impulsor está principalmente determinada con la forma de sus alabes.

Cuando se está operando en modo turbina, la transferencia de energía al rotor está determinada por la forma de la voluta de la bomba.

2.4 Trabajo de una bomba funcionando como turbina.

Trabajar con bombas puede ser muy beneficioso debido a sus múltiples aplicaciones en la cual se encuentra su uso en operación reversible semejante al que realiza una turbina hidráulica, como se aprecia en la figura.

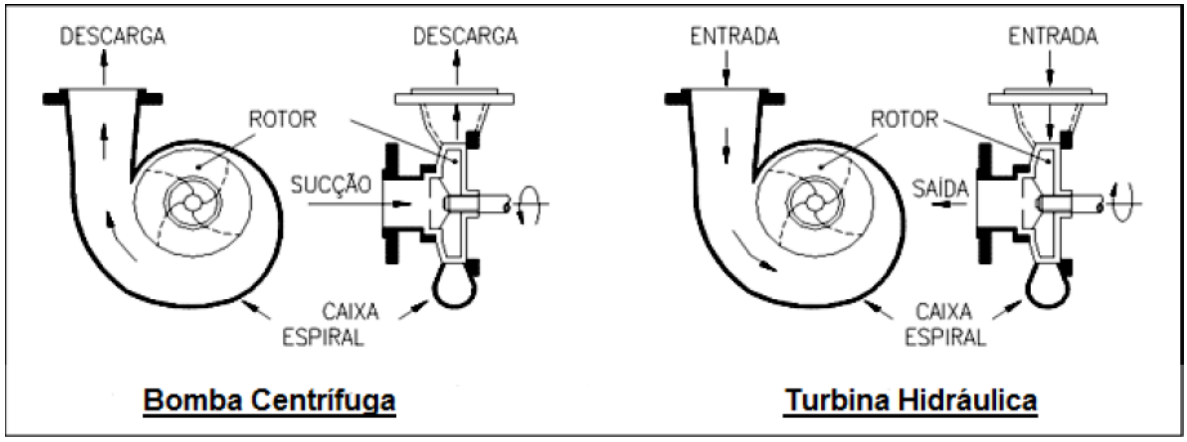


Figura 4 Esquema que muestra el paso del fluido y sentido de giro de una bomba centrifuga y una turbina convencional

Las bombas utilizadas para funcionar como turbina tienen que ser totalmente reversibles para así aprovechar completamente la energía proporcionada por el fluido. La única forma de saber su curva característica es mediante un análisis de su comportamiento a través de ensayos, debido a que sus funciones de trabajo son totalmente diferentes.

2.4.1 Diferencias en el diseño de una bomba centrífuga y una bomba modo turbina.

Se podría decir que una buena bomba funcionará como una buena turbina pero esa aseveración no es totalmente cierta ya que un error común es seleccionar una bomba modo turbina en base con los datos de diseño de una turbina haciéndolos coincidir con los datos de diseño de una bomba lo cual provocará que la bomba utilizada como turbina no funcione adecuadamente con las condiciones de trabajo.

Las curvas características de una bomba y una bomba en modo reversible pueden ser llevadas a un diagrama de altura en función del caudal con la única diferencia que este diagrama puede tomar tanto valores positivos como negativos.

El valor negativo reflejará el flujo reverso que puede tomar la bomba trabajando como turbina. La imagen que se muestra a continuación representa la curva característica en modo bomba y modo turbina en relación a la altura total en función del flujo.

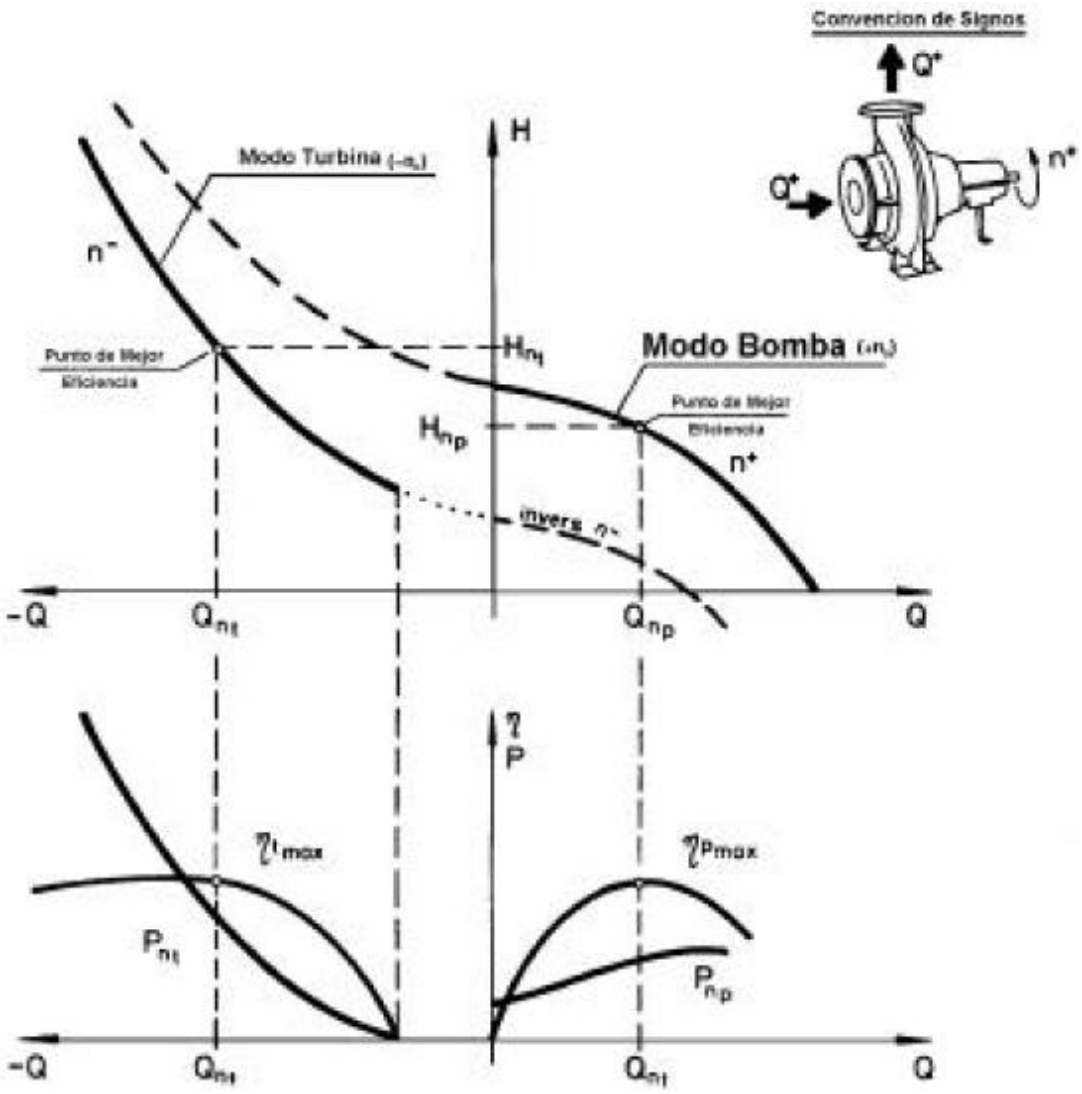


Figura 5 Curva Característica, Altura total en función del flujo de una bomba y una PAT.

Para visualizar de mejor manera las diferencias en el trabajo de una bomba centrifuga y de una bombaturbina, se presenta el siguiente recuadro:

Parámetros	Modo Bomba	Modo Turbina
Caudal	Disminuye a medida que la altura de trabajo aumenta, llegando a la altura de corte, por lo cual la bomba no será capaz de levantar al fluido.	Aumenta directamente proporcional con la altura o carga.
Potencia	La potencia mínima se encuentra situada en la máxima altura de trabajo, por lo que no existe trabajo en este punto.	Para que comience a generar, el flujo debe sobrepasar el punto de flujo mínimo o de vacío. La potencia nominal entregada aumentará progresivamente aumentando la altura nominal del sistema, por lo que el punto de mayor rendimiento es mayor que el de la bomba.
Rendimiento	La eficiencia de la bomba aumenta al incrementarse el flujo del sistema a partir de cero y hasta llegar a un flujo máximo. Desde este punto decrece a medida que sigue aumentando el flujo.	El rendimiento aumenta desde cero o de un caudal mínimo incrementándose hasta llegar al punto máximo de rendimiento por lo cual después de esto empieza a decrecer el rendimiento.

Tabla 1 Comparación de variables entre modo Bomba y Modo Turbina.

Con respecto al cuadro anterior es importante tener en cuenta los siguientes aspectos para seleccionar una bomba para que trabaje como PAT, ya que se puede observar que el punto de mejor rendimiento de una PAT difiere al de una bomba centrífuga.

Según este recuadro lo mejor que se puede hacer al seleccionar una bomba para ser utilizada como turbina es transformar la altura y el caudal para así obtener la mejor curva característica para la bomba y trasladar estos valores para trabajar en modo turbina. Pero la relación en modo turbina y en modo bomba no es la misma para cualquier tipo de bomba y además depende de las características que presente el flujo a través de la máquina. Además se pueden agregar los siguientes puntos a considerar para verificar que la bomba trabaje de manera eficiente en modo turbina:

- Verificar la fijación de los componentes en el eje y el esfuerzo sostenido sobre este debido al aumento de potencia de giro.
- Inspeccionar que los sellos en el eje se encuentren en buen estado además que los rodamientos giren en el sentido correcto.

El diseño en fundamental para el rendimiento de una bomba, ya que hay muchos factores que pueden afectar a este, tanto como el número de álabes, ángulo de estos, forma de la voluta, etc., los valores pueden diferir considerablemente de una máquina a otra considerando estos factores aunque el número específico y la velocidad rotacional sea la misma.

2.5 Características teóricas del funcionamiento de una bomba modo turbina.

La transferencia de energía en bombas centrífugas se realiza desde el impulsor hacia el fluido, así el sentido de giro y la dirección del fluido se consideran como positivo. Sin embargo una bomba centrífuga puede transformar la energía del fluido en energía mecánica de rotación si el sentido de giro y la dirección del fluido se invierten, considerándose así como negativos.

En este caso en el modo de operación como turbina la presión en la brida de entrada es mayor que en la brida de salida, al contrario como ocurre en el modo de operación de la bomba centrífuga.

La bomba centrifuga al trabajar en sentido inverso modo turbina, la brida de descarga se convierte en la entrada de la turbina y la brida de succión se convierte en la descarga, pero en sí el verdadero punto

de salida de la bomba modo turbina está dado en donde finaliza la tubería de succión de la bomba centrífuga. La siguiente imagen muestra los componentes de una bomba funcionando modo turbina.

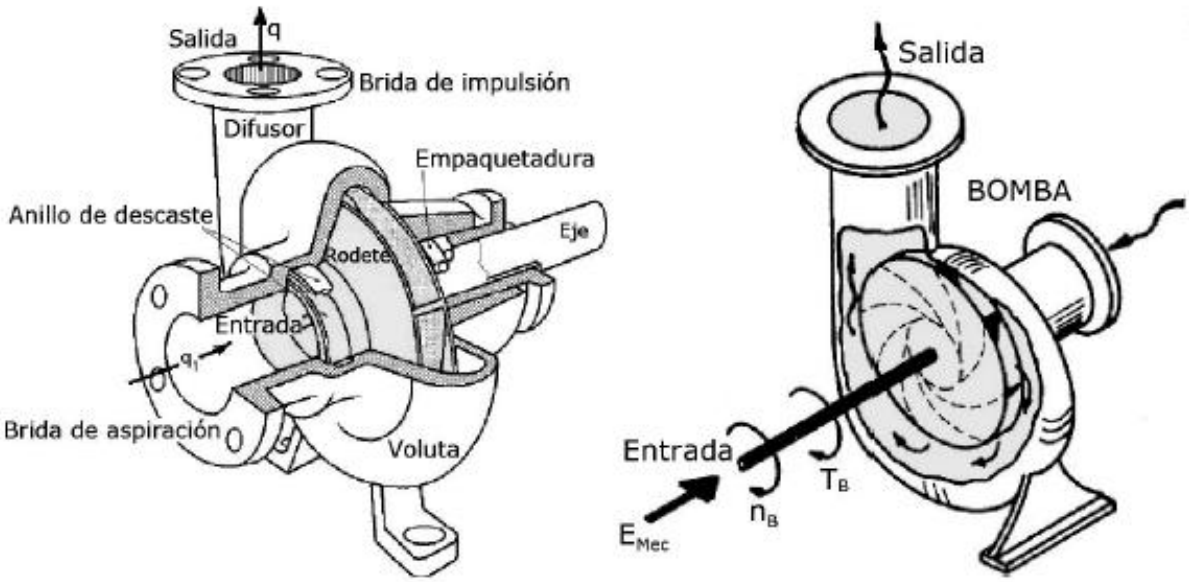


Figura 6 componentes de una bomba funcionando como turbina..

2.5.1 Regulación de la velocidad rotacional

Ya que una bomba centrifuga no posee ningún mecanismo de control para la regulación del flujo, puede ocurrir que exista una apreciable variación de la velocidad rotacional a menos que la carga permanezca constante. El cambio de velocidad de la turbina es debido a 2 aspectos los que se mostrarán en la siguiente figura:

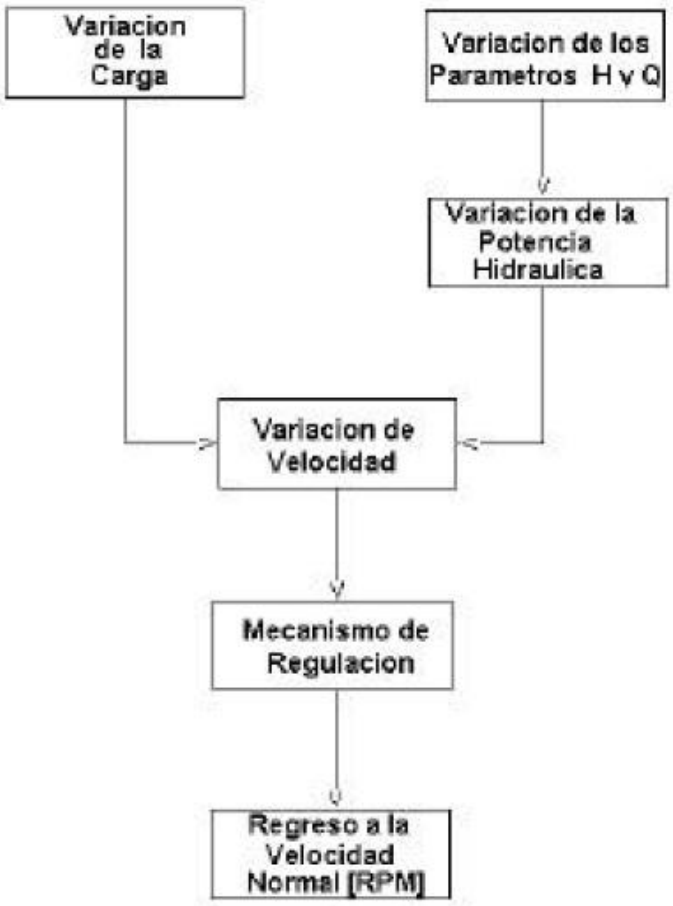


Figura 7 Factores que afectan la velocidad rotacional de la turbina.

Para que la velocidad rotacional se mantenga constante se pueden realizar 2 acciones para regular la velocidad.

2.5.2 Control del caudal y altura de carga de la máquina.

Este control consiste básicamente en agregar una válvula en el sistema para regular automáticamente el flujo, está válvula es necesario instalarla aguas arriba de la unidad generadora. Esta situación lleva a considerar la implementación de un regulador convencional el cual tiene un valor significativo y más aún para centrales hidráulicas pequeñas.

2.5.3 Requerimientos en el diseño

Con respecto al diseño de la bomba funcionando en modo turbina no existen cambios, pero una vez seleccionada esta se debe realizar una verificación del diseño adecuado, ya que durante su operación en modo turbina la altura y la potencia son más altas que al utilizarse como bomba.

Por lo tanto es necesario durante la verificación del diseño poner atención en los siguientes puntos:

- Cambiar sentido de las roscas de los componentes del eje (en caso que sea necesario) de modo que estos no puedan aflojarse (tuerca sujeta rotor, tapa de cojinetes, etc.)
- Verificar los límites de presión de la carcasa, para esto se debe chequear que la presión de prueba de la carcasa no sea menor a 1.5 veces la máxima presión de operación de la bomba como turbina.
- chequear que el eje pueda soportar el torque producido por la bomba reversibe, ya que este será mayor en modo turbina.
- Evaluar el diseño adecuado de los descansos para un correcto funcionamiento de la máquina.

3 Banco de prueba

El banco de prueba consiste en un circuito cerrado, es decir que se mantiene constante el nivel del fluido recirculando. Este posee un estanque el cual se encuentra libre a la atmósfera el cuál no varía su nivel de agua.

El banco de ensayos en primera instancia se encuentra diseñado en base a los diámetros de entrada y salida de las bombas funcionando como turbina que se ensayarán en el presente trabajo, en el caso de ensayar otras bombas con diámetros de entrada y salida distintos habría que hacer las modificaciones pertinentes, además de modificar el acoplamiento correcto para el grupo bombaturbina-generador.

Dentro del estanque el banco de ensayos podría aumentar la temperatura del agua debido a los roces que podrían suscitarse dentro de las pruebas que se realicen en los equipos, pero estos cambios de

temperatura no afectarían de forma considerable los valores de los ensayos por lo cual no es necesario considerar un enfriador de agua dentro del banco.

Para el modelamiento y desarrollo estructural del banco de prueba se utilizará la norma ISO 9906 [9], la que se utilizará como guía para la instalación de cada instrumento de medición y control que utilizará el banco de ensayos. En la figura que se presenta a continuación se muestran los criterios para la instalación de los manómetros y mano-vacuómetro que se instalarán en el banco de prueba.

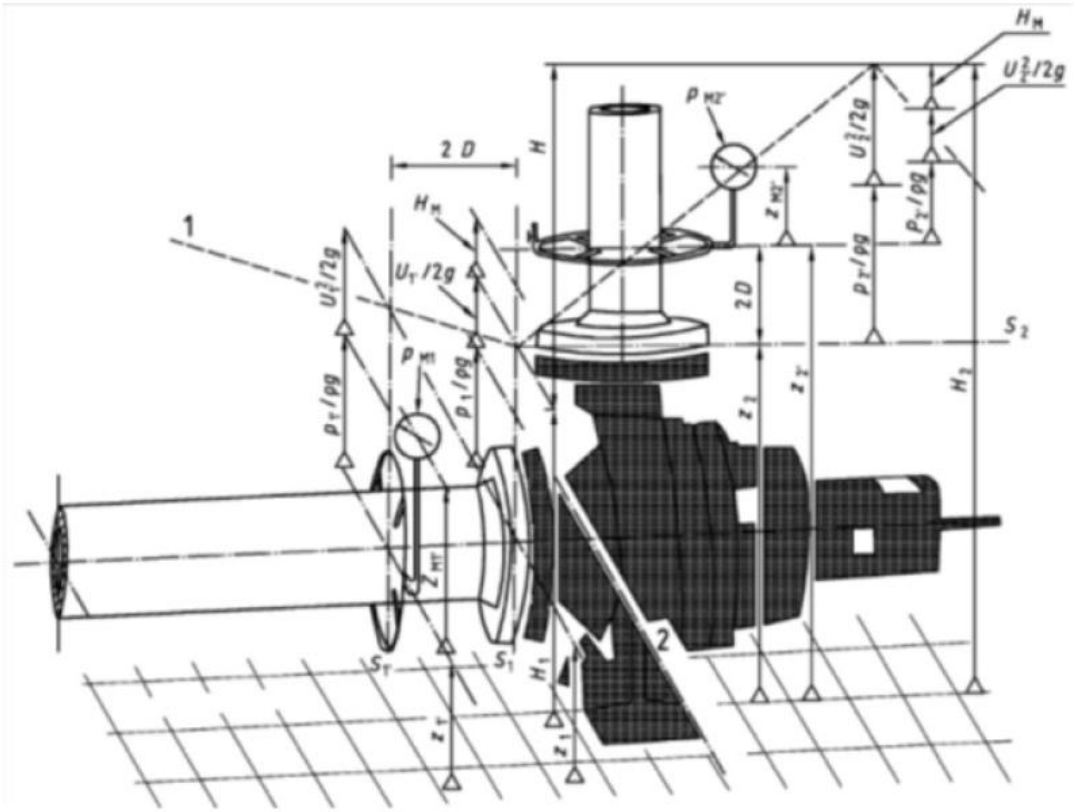


Figura 8 Instalación de Manómetros.

Según la norma ISO 9906 es necesario para la instalación del manómetro y mano-vacuómetro una distancia mínima al equipo de trabajo de 2 veces el diámetro de la tubería de la línea hidráulica, para así disminuir un presunto error que podría darse entre la carga y descarga del equipo.

3.1 Diseño del banco de ensayos.

Para el diseño del banco de ensayos se utilizó el programa Autodesk Inventor Profesional 2015 el cual fue el encargado de modelar el banco de ensayos que en la práctica se desarrolló en el laboratorio, en base a este modelo se compraron las piezas restantes para la instalación del este, el cual tuvo un costo aproximado entre materiales, sistemas de control, medición, acoplamientos, materiales eléctricos de $ 800.000 los cuales fueron donados por mi Padre, José Eduardo Suárez Muñoz. Cabe destacar que la implantación correspondió a la instalación de la línea hidráulica, la conexión de estas al grupo bombaturbina-generador, sistemas eléctricos, de control y los sistemas de disipación de energía.

A continuación se observa el diseño del banco de ensayos en 3D:

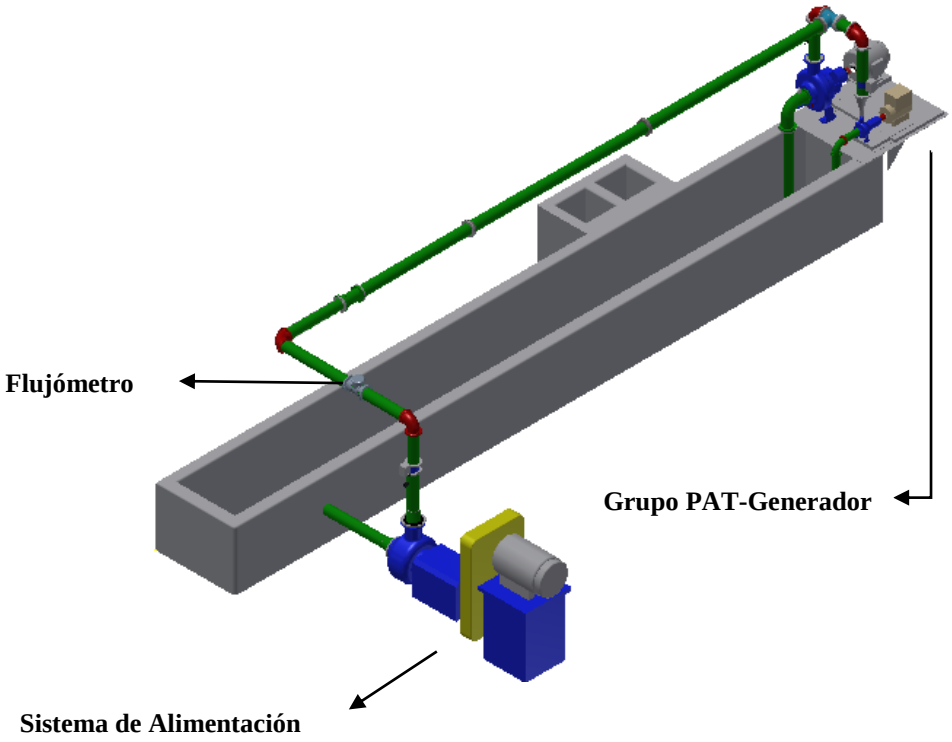


Figura 9 Diseño Banco de Ensayos Vista Superior

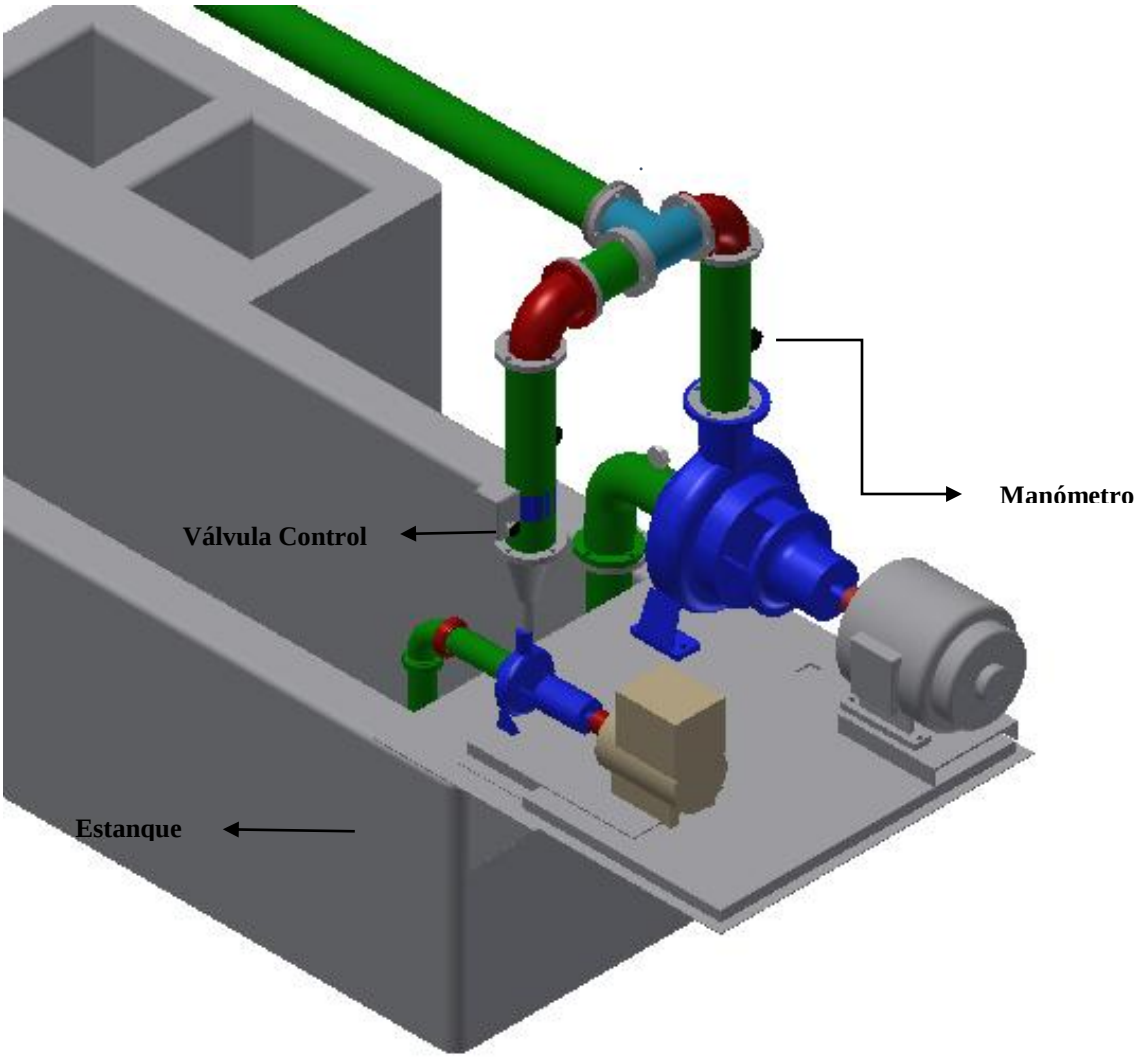


Figura 10 Banco de Ensayos

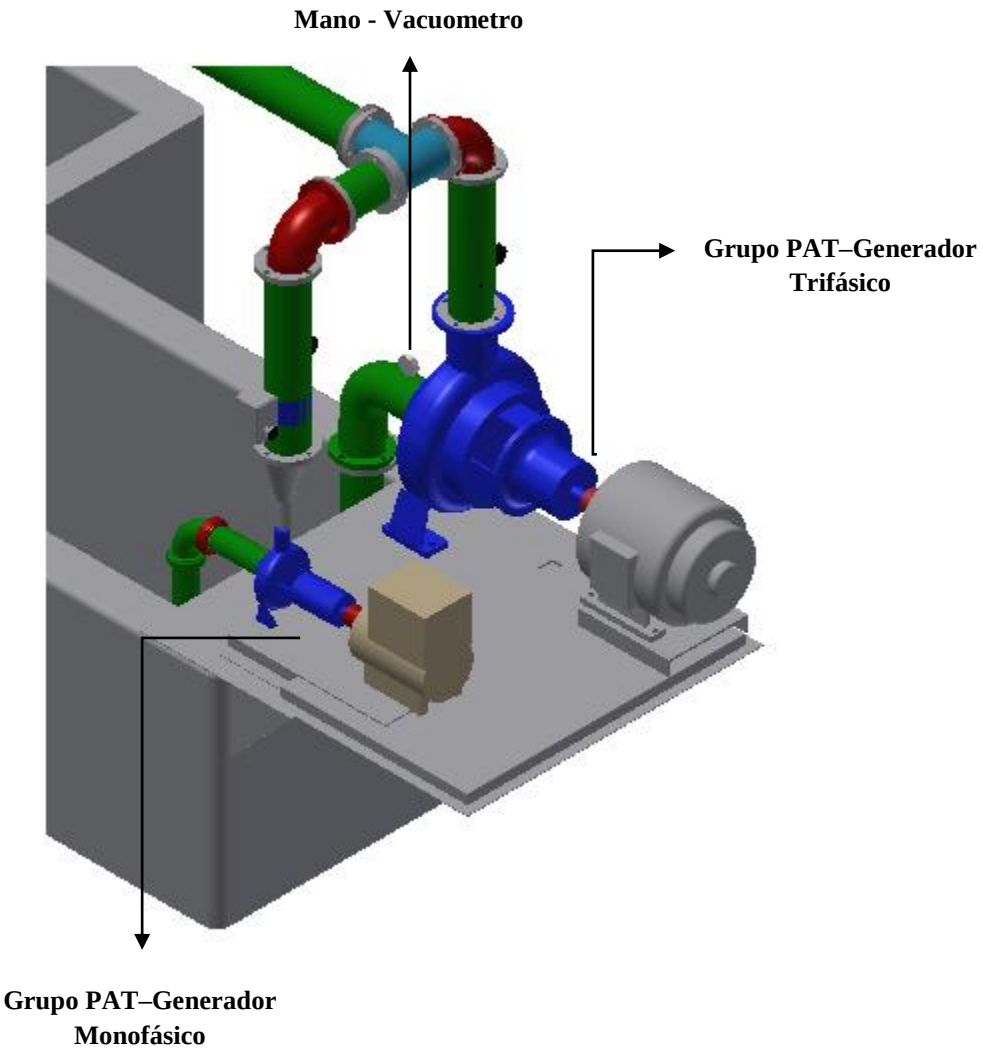


Figura 11 Diseño PAT ensayadas.

3.2 Sistema de alimentación

El equipo de alimentación que se utilizará en el banco de ensayos consiste en un conjunto motor-bomba 8x8 perteneciente a la familia SRH el cual ya se encuentra en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad Federico Santa María, este equipo cumplirá la función principal de simular las condiciones necesarias de operación de la bomba funcionando como turbina, las cuales son transmitir el flujo del agua y simular la altura necesarias para los ensayos.

Para la recirculación del agua dentro del estanque existe otros sistema (motor-bomba) el cual permite recircular el agua para así el sistema de alimentación del banco pueda trabajar sin problemas.

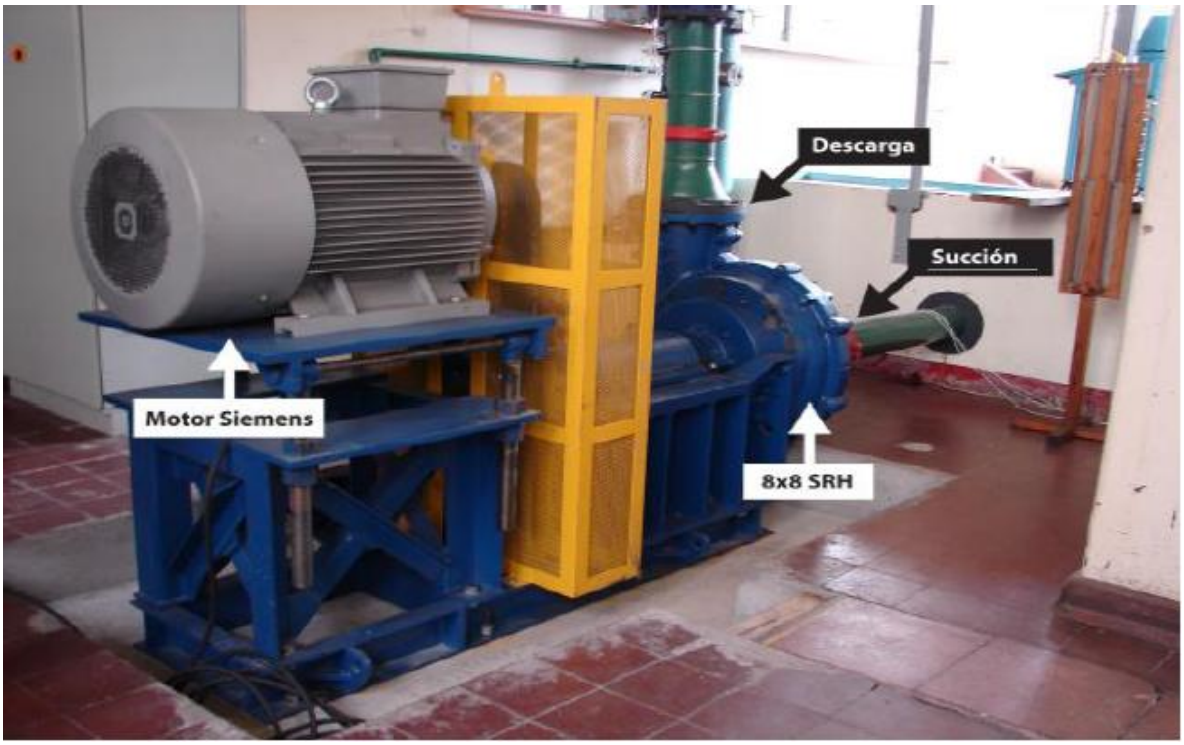


Figura 12 Sistema de Alimentación

3.3 Selección de tuberías

La selección de las tuberías será en base a las condiciones existentes del actual banco de ensayos que se encuentra en el Laboratorio y además de las condiciones de operación a las cuales serán sometidas en los respectivos ensayos, además considerando las pérdidas que puede tener el sistema.

Para el banco de ensayos se utilizarán tuberías de 5" y 6" SCH STD, las cuales algunas ya se encuentran instaladas y las restantes se instalarán de acuerdo a la modelación que se presentará en el siguiente trabajo. Estas básicamente fueron seleccionadas debido a su bajo costo y además que cumplen con los requerimientos básicos de operación del sistema, ya que en anterioridad ya han sido probadas en ensayos similares.

Al realizar la modelación del sistema y ver los recursos disponibles del banco de ensayos ya existentes, se pudo observar que en el sistema existen reducciones excéntricas y concéntricas (entrada y salida) para así disminuir las pérdidas en el proceso. Estas reducciones se dispusieron para conectar las tuberías con las bombas de trabajo, además de las que ya se encontraban dispuestas en el banco para el sistema de alimentación.

3.4 Diagrama general

El diagrama explica el proceso completo de lo realizado en el trabajo de título, dentro del laboratorio ya existía el sistema de alimentación y algunos elementos de control y medición por lo cual fue necesaria instalar la línea hidráulica mediante cañerías y hacer las conexiones correspondiente para conectar las Pat ensayadas la cuales al funcionar de manera reversible transformarían la energía mecánica en energía eléctrica al generador que iría acoplado a ésta. El generador envía la energía eléctrica al tablero eléctrico el cual controla, mide y distribuye la energía la cual llegar al controlador de carga el cual tiene como función principal mantener la frecuencia en 50 [hz], mediante la regulación del flujo del sistema derivando la energía no consumida por la demanda al banco de disipación de energía.

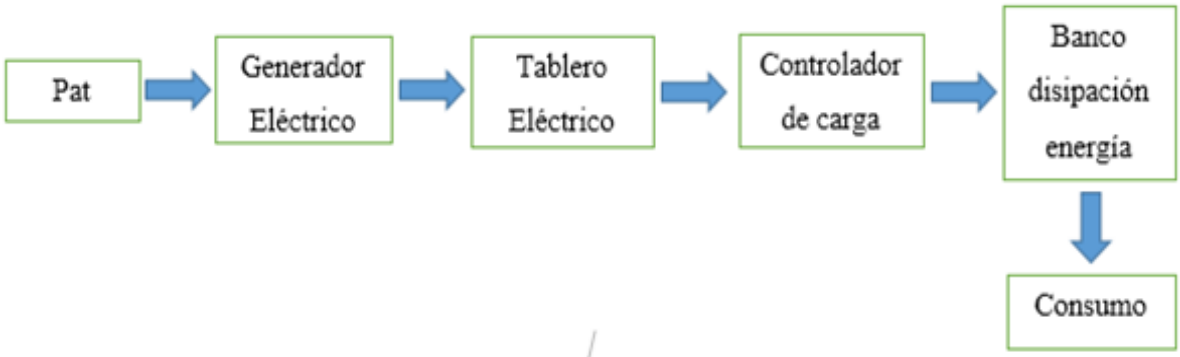


Figura 13 Diagrama General Banco de Ensayos.

3.5 Circuito Hidráulico

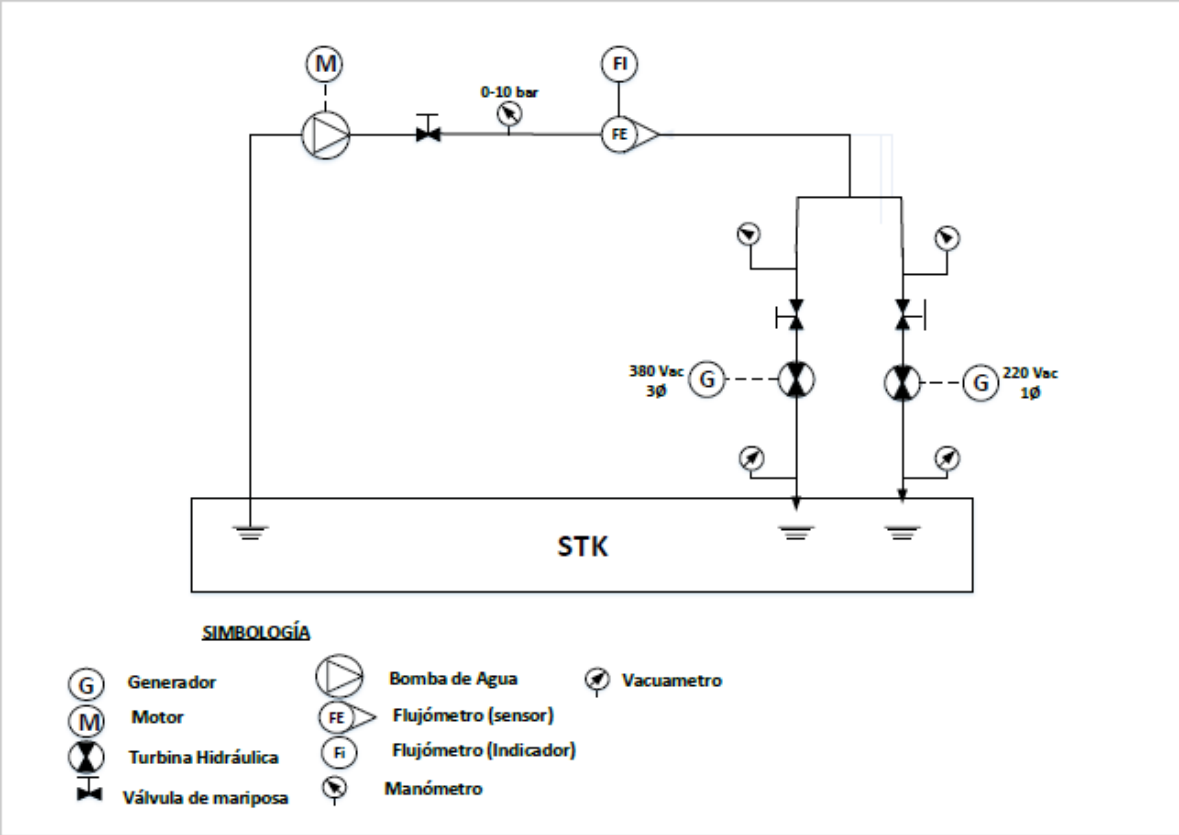


Figura 14 Circuito Hidráulico

En la figura se puede apreciar el diagrama del banco de ensayos para proyectos pequeños y medianos en la utilización de bombas funcionando como turbinas, el cual consiste en los siguientes elementos:

3.5.1 Grupo Bomba modo turbina -Generador Trifásico

Figura 15Bomba Turbina- Generador Trifásico

3.5.2 Grupo Bomba modo Turbina -Generador Monofásico

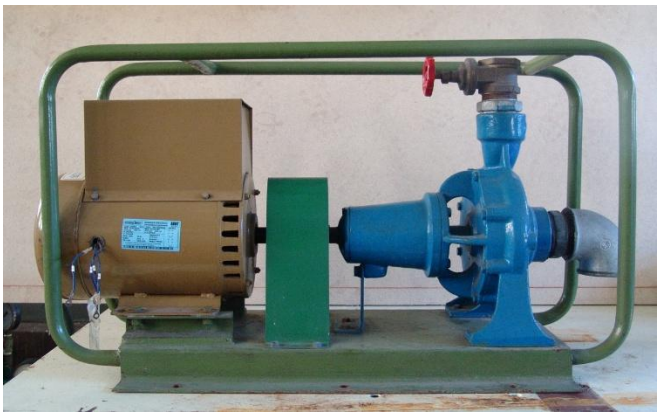


Figura 16 Grupo Bomba Turbina-Generador Monofásico

3.5.3 Estanque

Figura 17 Estanque Banco de Ensayos.

3.5.4 Válvula mariposa reguladora de caudal

Figura 18 Válvula reguladora de caudal Sistema de Alimentación.

3.5.5 Flujometro

Figura 19 Flujometro

3.5.6 Manómetro

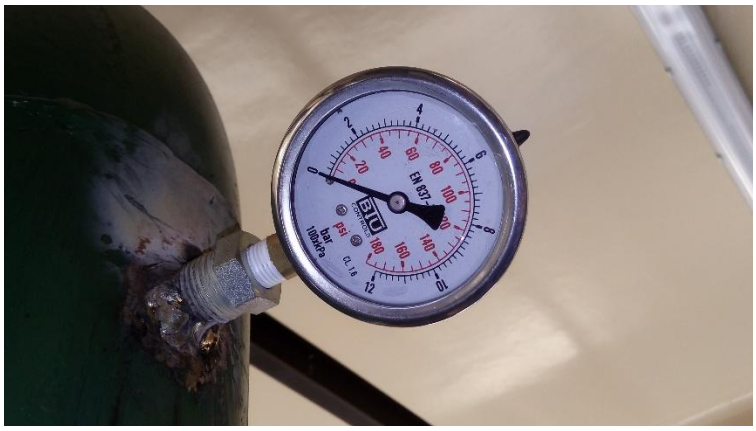


Figura 20 Manómetro en la Entrada de cada PAT.

3.5.7 Mano-Vacuometro

Figura 21 Mano-Vacuometro en la descarga de cada PAT.

3.6 Reguladores de control de carga

3.6.1 Regulador de control de carga sistema monofásico ¨A2¨

Este sistema se encuentra diseñado para manejar carga y regular la frecuencia que en nuestro país corresponde a 50 [hz] cuando es utilizado en plantas hidroeléctricas o sistemas rurales independientes.

En el caso de este trabajo se utilizó sin relés externos debido a que este proyecto consta entre 1-12 [kw] ensayados, 220[V] y frecuencia de 50 [hz] para proyectos mayores entre 1-114 [kw] es necesarios relés externos además puede funcionar con sistemas eléctricos monofásicos y trifásicos.

El controlador de frecuencia ¨A2¨ fue conectado al banco de ampolletas que disipa la carga. La carga total de este banco fue dividido en 2, estas cargas son controladas internamente por el gobernador.

Si se utilizará este sistema en un generador trifásico sería necesario equilibrar las cargas controladas entre las 3 fases, para equilibrar las cargas se necesita un mínimo de 4 relés.

La función principal de estos controladores de carga es mantener automáticamente la demanda de energía de un generador en equilibrio con la cantidad de ésta que el generador pueda suministrar.

Ventajas de la utilización del regulador del control del carga ¨A2¨.

- Ya que el generador siempre genera la máxima potencia posible, la generación no requerida de forma inmediata se utilizará en cargas secundarias controladas por el sistema electrónico, si estas cargas secundarias se utilizarán de manera adecuada la eficiencia del sistema sería alta.
- Debido a que el control es por medios electrónicos, la respuesta de este a los cambios de frecuencia son muy rápidos.
- Es un sistema necesario para trabajar con bombas funcionando como turbinas ya que que no posee un sistema de control de carga como las turbinas convencionales.

La función principal del regulador del control de carga dentro del banco de ensayos será controlar la velocidad de rotación del generador monofásico desde cualquier punto del sistema de alimentación.

3.6.2 Regulador de control de carga sistema trifásico ¨J3¨

Este regulador funcionará solo con un generador trifásico, este dispositivo cumple la misma función que el controlador de carga monofásico ¨A2¨, lo cual es mantener la frecuencia del sistema en 50 [hz] controlando la velocidad de rotación del generador trifásico.

Este sistema fue conectado a un banco de resistencia y este subdividido en 6 cargas iguales cada una de 3.3 [kw], estas conectadas a los terminales de salida del controlador, estas cargas no pueden ser mayor a 6 [kw] y la suma de estas sobrepasar la capacidad máxima del generador.

La configuración del controlador de carga ¨A2¨ es igual a la de este controlador, en la parte interior de este se encuentran 4 switches rojos, estos pueden activarse o desactivarse para trabajar de distintos modos para ambos casos ensayados deben estar de la siguiente manera

- Switch 1 mantenerse en posición ON para operaciones de 50 [hz].
- Switch 2 se utiliza normalmente la posición ON como sistema gobernador.
- Switch 3 y switch 4 estos indican el ancho de banda de frecuencia del sistema. Se utilizó la configuración de ambos switch en posición ON, la cual corresponde a un ancho de banda de frecuencia de 0.5 [hz].

3.7 Ensayos bomba funcionando como turbina.

En el presente trabajo busca la implementación de un banco de ensayos para estudiar el funcionamiento de una bomba centrífuga funcionando como turbina por lo cual se realizaron una series de ensayos para calcular su rendimiento de forma reversible.

Los ensayos realizados buscaron calcular la eficiencia, potencia eléctrica y potencia hidráulica entregada por la PAT por lo cual se utilizaron las siguientes fórmulas para calcular estas variables.

En el ensayo de la bomba que trabaja con el generador monofásico la potencia se calculó de la siguiente manera:

$$Pe = V \times I \ [Kw] \qquad (3.0)$$

Donde:

Pe = Potencia eléctrica entregada por la bomba modo turbina. [Kw]

V =Voltaje entregado por el generador. [V]

A= Amperaje entregado por el generador. [A]

Para el cálculo de la potencia hidráulica se utilizó la siguiente fórmula:

$$Ph = Q \times \rho \times g \times H \ [Kw] \qquad (3.1)$$

Donde:

Ph = Potencia Hidráulica generada por la bomba modo turbina. [kw]

Q = Caudal de entrada de la PAT. [m^3/s]

P = Densidad del fluido. [Kg/m^3]

g = Fuerza gravitatoria [m/s^2]

H = altura neta o salta, en este caso corresponde a la presión de entrada a la bomba a estudiar [m]

Y por último el cálculo de la eficiencia de la bomba modo turbina:

$$\eta = \frac{Pe}{Ph} \ [\%] \qquad (3.3)$$

Donde:

Ŋ = Eficiencia de la bomba modo turbina [%]

Ph = Potencia Hidráulica generada por la bomba modo turbina. [kw]

Pe = Potencia eléctrica entregada por la bomba modo turbina. [Kw]

Los ensayos que se realizaron correspondieron en mantener constante la velocidad rotacional de la bomba, 1500 [rpm] y también la presión a la entrada de esta por lo cual los parámetros estudiados fueron el caudal, voltaje, amperaje para el respectivo cálculo de las potencias antes mencionadas para obtener la eficiencia de la PAT.

Se ensayaron ambas bombas. Para el ensayo de la bomba con el generador monofásico se realizó el estudio de esta con un banco de ampolletas para disipar la energía y comprobar la finalidad de la turbina, la generación de energía eléctrica.

En este ensayo se realizaron aproximadamente entre 14 y 20 mediciones por prueba dependiendo de la presión con cual trabajase la bomba modo turbina, a mayor presión el sistema soportaba más carga por lo cual se realizaron más mediciones. Esta experiencia consistió en ir aumentando la carga progresivamente, es decir en cada medición se iba encendiendo una ampolleta hasta llegar a la capacidad total del generador.

Figura 22 Tablero de ampolletas, sistema de disipación energía generador monofásico

Para el ensayo del segundo grupo estudiado se utilizó un banco de resistencia de capacidad de 60 [kw] de potencia el cual disponía el laboratorio, este se utilizó en defecto del propuesto para poder obtener un número mayor de mediciones debido a que con el actual banco no se podrían realizar de manera adecuada los ensayos debido a que no se poseían elementos trifásicos para simular la carga en el sistema.

Por la disposición de este banco de disipación de energía se realizaron 5 mediciones a 0-5-10-15-20 [Kw] de potencia y se obtuvieron valores respecto a la eficiencia de la bomba en modo turbina, en esos puntos no fue posible mantener la presión constante a la entrada de la bomba con la válvula reguladora de caudal del sistema de alimentación.

Figura 23 Banco de resistencias generador trifásico.

3.8 Flexibilidad del banco de ensayos.

La implementación del banco de ensayos permite que se pueden probar una gran cantidad de bombas centrífugas dada la configuración de este, bastaría solamente modificar la entrada y descarga dependiendo de los diámetros de la bomba usando reducciones o ampliaciones concéntricas para su acople, además de modificar la descarga si fuese necesario y por ultimo seleccionar un acoplamiento acorde con la bomba y el generador seleccionados.

Prácticamente cualquier bomba puede ser utilizada como turbina ya que no existe ninguna limitante en la bomba que impida el ingreso del agua por la salida de esta y la evacuación del agua por su entrada. Debido al basto campo que tienen las bombas con sus diferentes tipos, características y rangos de potencia permite que la bomba sea un sistema conveniente donde se pueda aprovechar la energía potencial del agua y se utilice la bomba adecuada para las características del sistema. Para casos donde exista un alto flujo se puede utilizar una bomba de doble flujo, incluso pueden utilizarse

bombas sumergibles en modo turbina, instalándola en el sistema de la cañería o flujo o en el curso del agua.

A continuación se muestra el diseño del banco de prueba instalada una bomba centrífuga acoplada con un generador de corriente continua.

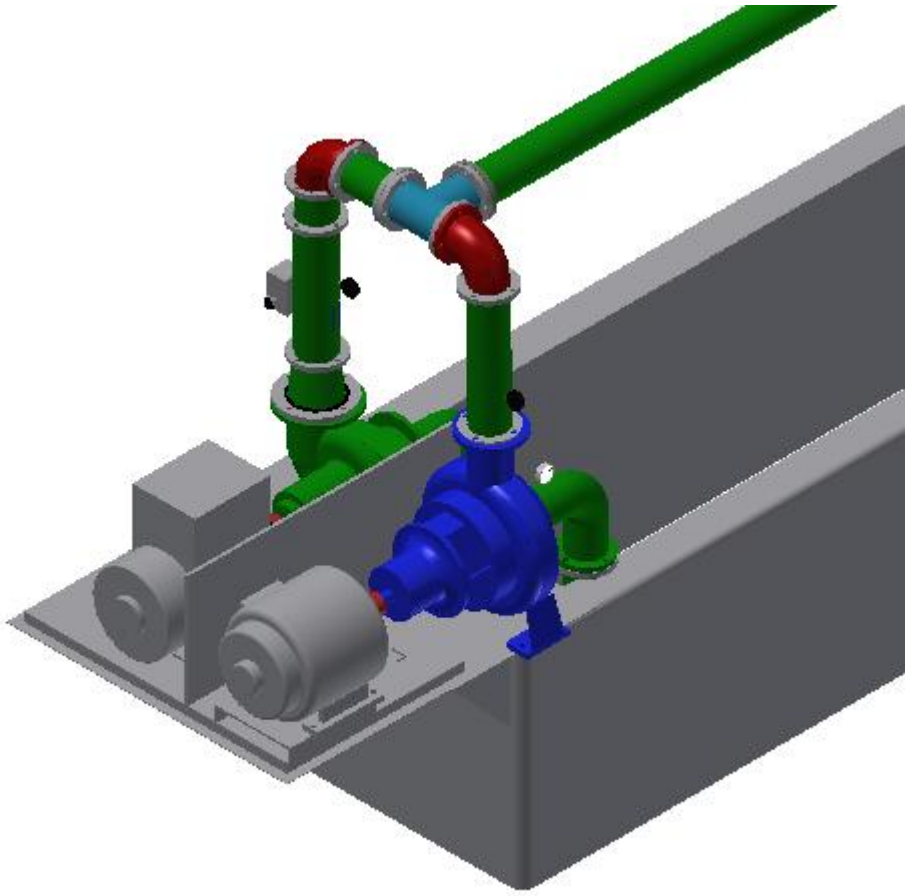


Figura 24 Diseño PAT- Generador corriente continua.

Se aprecia en la figura que la bomba para poder implementarla como turbina es necesario dejarla recostada para poder utilizarla inversamente por su disposición en el ensayo, pero eso no es problema ya que esta ya fue ensayada de esta manera en el estudio de Luis Cáceres antes mencionado, también es necesario para la instalación de esta realizar un cambio de la reducción concéntrica instalada ya que el diámetro de entrada de la bomba es distinta de la anterior, además se cambiaría el diámetro de

la unión americana que existe en la descarga de la bomba ensayada y por último la selección de un nuevo machón de acoplamiento, se elige este acoplamiento directo debido a que es el que permite menos pérdidas mecánicas y es económico.

Por ultimo debe implementarse el sistema eléctrico, de disipación de energía para este tipo de generador y así poder realizar ensayos con corriente continua.

4 Análisis de datos

4.1 Grupo Turbina-Generador Monofásico

4.1.1 Gráfico 1500 RPM, 3.2 BAR

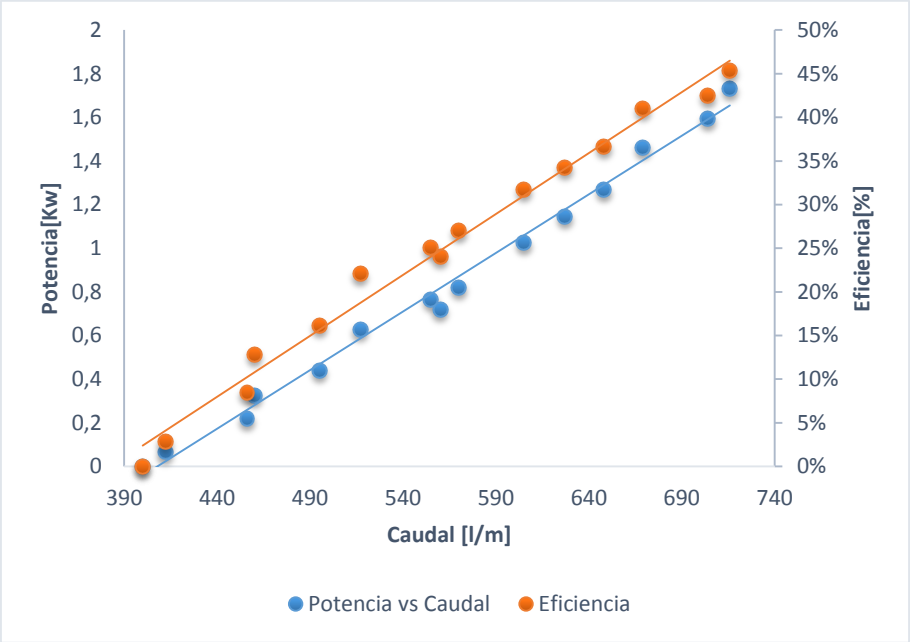


Gráfico1 Potencia vs Caudal y Eficiencia

El ensayo realizado correspondio a la prueba de una bomba funcionando como turbina a una presión de entrada de 3.2[BAR] constante y velocidad rotacional de 1500 [RPM] variando el caudal y la potencia obtenida del generador , por lo cuál el gráfico muestra la curva de potencia eléctrica vs caudal. De esta se puede apreciar que al aumentar la carga , aumentaba la potencia eléctrica y el caudal que entraba a la bomba y se obtuvieron valores de 1.7 kw de potencia con una eficiencia del 45% .

En el gráfico se observa que a medida que aumenta el caudal va aumentando la potencia eléctrica, esto es normal debido a que una turbina convencional trabaja casi con el doble de flujo que una bomba centrífuga, con la configuración del actual banco de ensayos se lobro obtener un valor de 1.26 vecesmayor el flujo de la pat que en modo bomba en el cuál se obtuvo un 45% de eficiencia de esta como se menciono anteriormente, el cual es un valor no menor pensando que se obtiene energía eléctrica para poder ser utilizada de alguna manera.

4.1.2 Gráfico 1500 RPM, 3.2 BAR

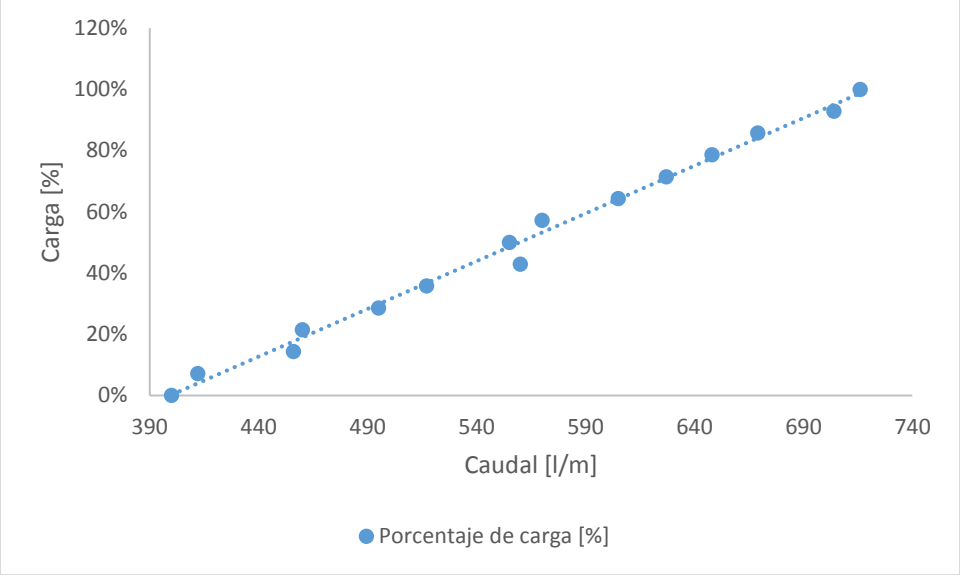


Gráfico2 Porcentaje de Carga

Correspondiente al ensayo anterior se estudió a la variación de la carga en función del caudal en el cuál se observa que al aumentar la carga también aumento el caudal en el sistema, además se obtuvo el 100% de carga con un flujo de 716 [L/M] pero el generador bajo su velocidad rotacional quedando en 1463[rpm].

4.1.3 Gráfico 1500 RPM, 3.8 BAR

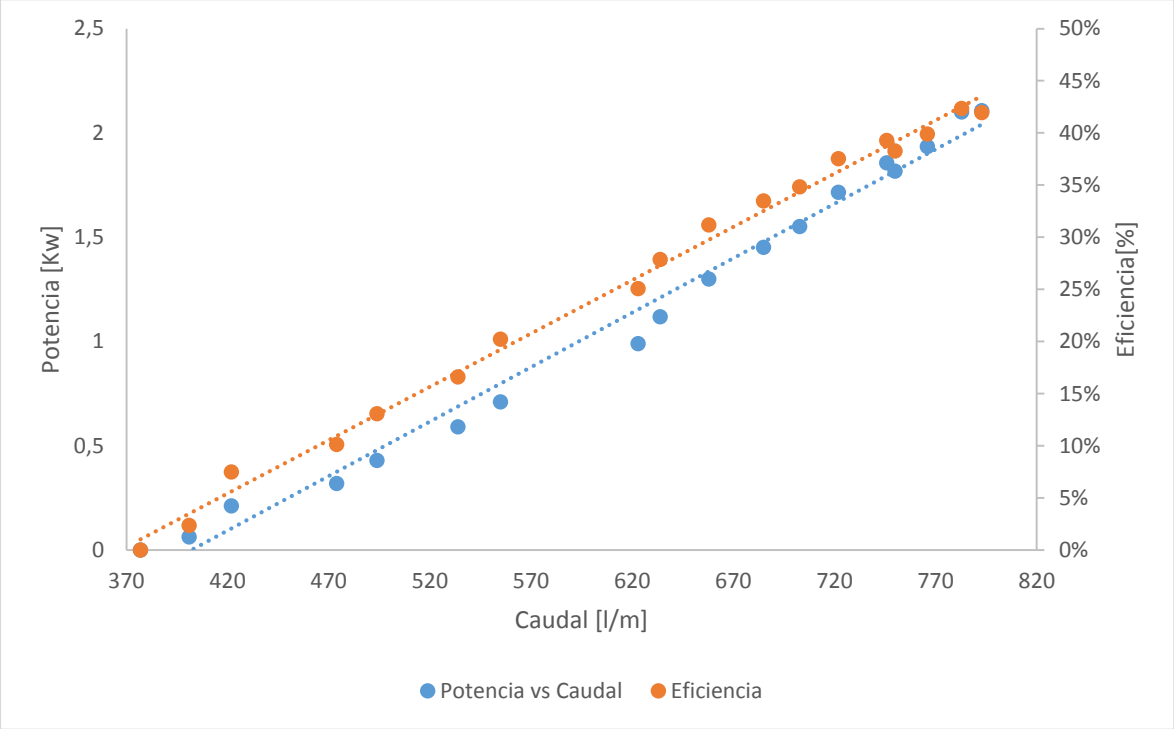


Gráfico3 Potencia vs Caudal y Eficiencia

El siguiente gráfico muestra la curva de la bomba ensayada a 3.8 [BAR] de presión de entrada con una velocidad rotacional de 1500 [RPM], se obtuvieron valores de 2.1 [KW] de potencia eléctrica suministrada por el generador y un % de eficiencia del 42 % trabajando con el 100% de la carga llegando a un caudal de 793 [L/M] y una velocidad rotacional de 1467 [RPM], se puede observar igual que en el gráfico anterior que al ir aumentando el caudal irá también aumentando la eficiencia del sistema.

4.1.4 Gráfico 1500 RPM, 3.8 BAR

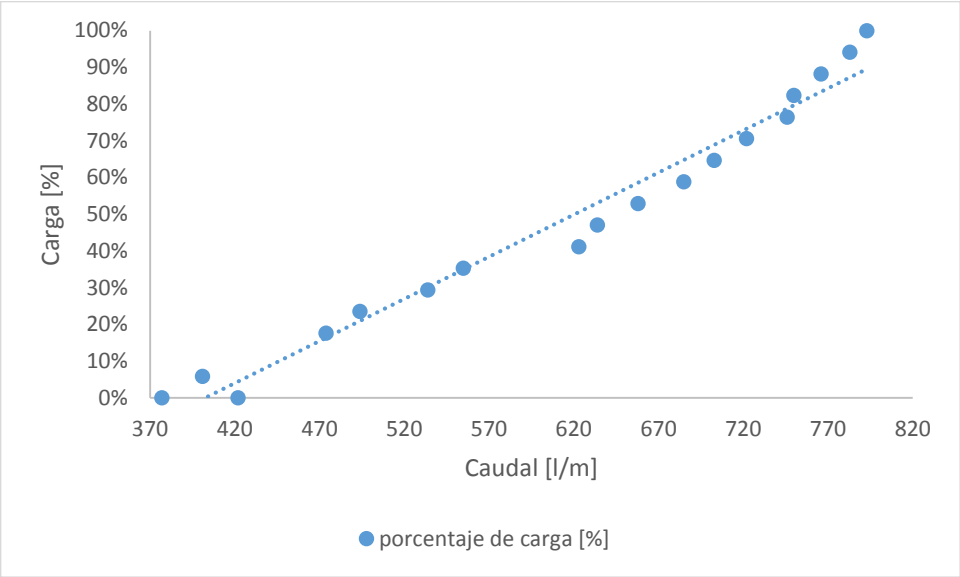


Gráfico4 Porcentaje de Carga

Correspondiente a los mismos valores ensayos en el gráfico anterior se observa que al aumentar el porcentaje de carga también aumenta el flujo del sistema, al ensayar al máximo la carga se obtuvo un valor del caudal de 793[L/M] a una velocidad rotacional del 1467[RPM].

4.1.5 Gráfico 1500 RPM, 4.4 BAR

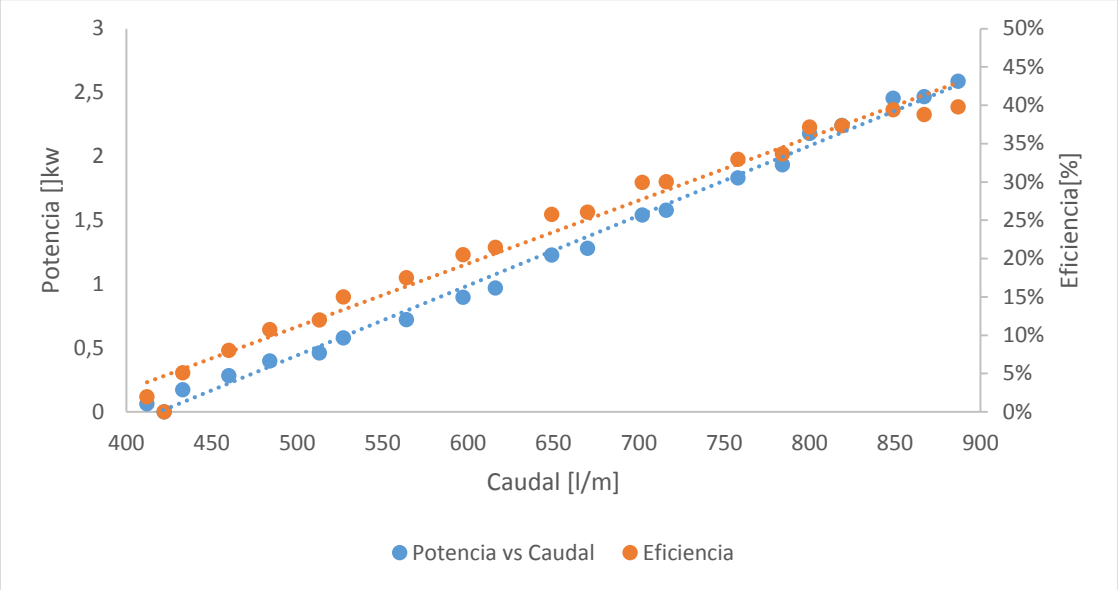


Gráfico5 Potencia vs Caudal y Eficiencia

Al analizar el siguiente ensayo realizado a la bomba con una presión de entrada mayor a los ensayos anteriores de 4.4 [BAR] a una velocidad rotacional de 1500 [RPM] manteniendo la válvula reguladora de caudal del sistema totalmente abierta se obtiene como es de esperar una eficiencia de la bomba reversible menor que los ensayos anteriores con un valor del 40% a 44 m.c.a de altura, por lo cual deducimos que para esta bomba al aumentar la presión, la eficiencia del sistema aumentará de manera más lenta al ir aumentando el caudal, se registraron valores de 2.6 [Kw] con un flujo de 887 [L/M].

4.1.6 Gráfico 1500 RPM, 4.4 BAR

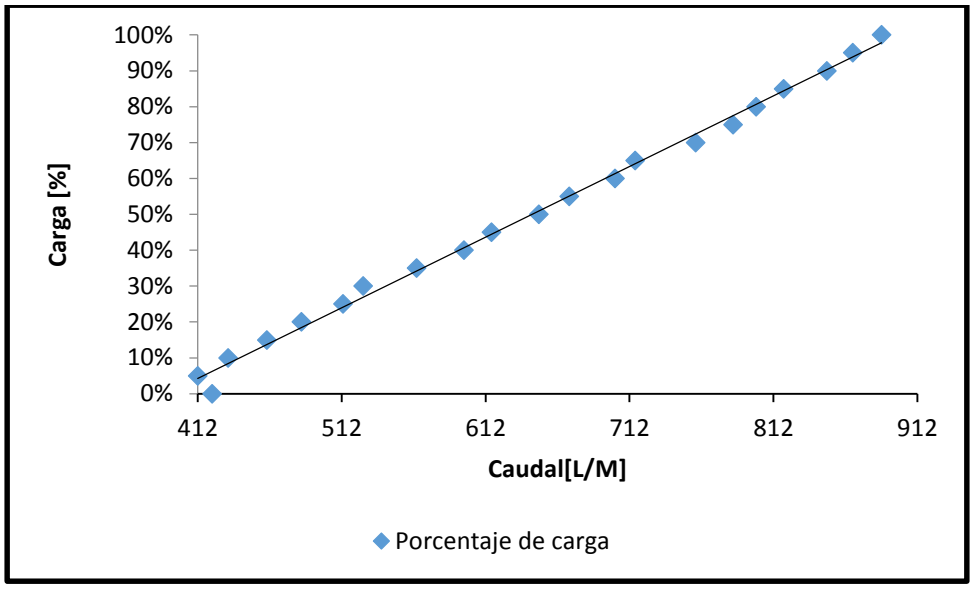


Gráfico 6 Porcentaje de Carga

Con los valores obtenido al igual que los ensayos anteriores se obtienen al aumentar la presión una mayor carga y por ende un mayor flujo dentro del sistema, donde se obtuvieron valores al 100 % de carga de 2.6 [kW] de potencia eléctrica entregada por el generador con un flujo de 887 [L/M] con una velocidad rotacional de 1480 [RPM].

4.2 Grupo Generador-Turbina Trifásico

4.2.1 Gráfico 1500 RPM

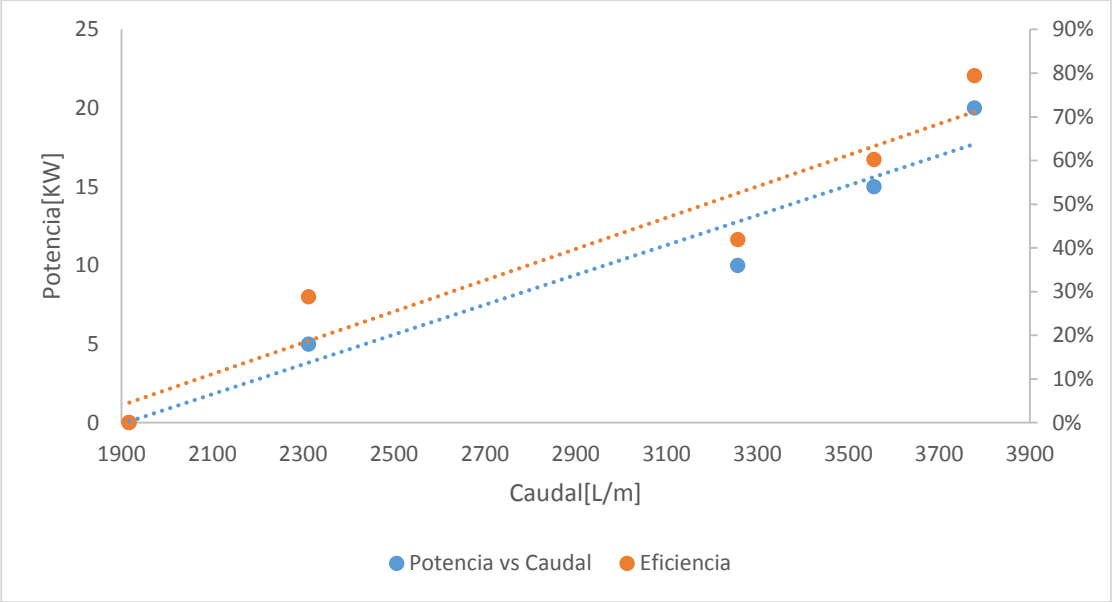


Gráfico 7 Generador Trifásico

El ensayo correspondiente al generador trifásico se realizó conectando un banco de resistencia que se encontraba en el laboratorio para así obtener parámetros y obtener algunas conclusiones sobre el comportamiento de la bomba. Estos se realizó debido a que con el banco de resistencia que consta el sistema no se podían obtener valores debido a que no se poseían equipos mecánicos trifásicos para ingresar carga al sistema y obtener los parámetros por lo cual se conectó un banco de resistencia el cual permitía obtener valores de la potencia disipada por el generador.

Los ensayos realizados consistieron en mantener la velocidad rotacional del grupo bomba-generador constante a 1500 rpm, debido a la disposición del banco no se pudo mantener constante la presión pero se obtuvo valores importantes de eficiencia a diferentes saltos como a los 40 [m.c.a] se obtuvo 56% de eficiencia y a los 38 [m.c.a]se obtuvo un 62% de eficiencia casi la misma que en funcionamiento modo bomba, además se comprobó que el caudal es mayor en modo turbina que en modo bomba respectivamente casi 1.2 veces mayor.

4.3 Puesta en marcha Banco ensayos

	LISTA DE CHEQUEO PARA OPERACIÓN BANCO DE ENSAYOS DE BOMBAS MODO TURBINAS												
Laboratorio de Termofluidos													
Puesta en marcha del equipo		*Fecha en la que se realizara la actividad*											
1	Verificar giro libre de ejes Bomba-Turbina y generador(no debe estar agripado)												
2	Verificar válvulas abiertas bombas-turbinas para pérdida del aire												
3	Cebar Bomba Vogt utilizada para relleno de estanque												
4	Verificar variador de frecuencia Mitsubishi utilizado en Bomba Vogt de relleno de estanque encontrarse en la posicion PU												
5	Poner en marcha variador de frecuencia (botón FWD), para su detención utilizar botón STOP.												
6	Cebado del circuito manteniendo Válvula reguladora de caudal abierta.												
7	Puesta en marcha bomba alimentación circuito cuando estanque se encuentre sobre el nivel de succión.(Válvula reguladora de caudal debe mantenerse cerrada)												
8	Verificar tablero eléctrico para puesta en marcha (Breaker y automaticos deben encontrase en posicición superior, posteriormente se da puesta en marcha con botón START de partidor suave.												
8	Abrir válvula reguladora de caudal ubicada en la descarga.												
9	Revisión nivel de agua del canal (si se encuentra muy alto se debe apagar bomba Vogt de relleno de estanque y si baja el nivel del agua a la succión de la bomba de alimentación se enciende nuevamente)												
10	Cierre de 1 válvula Bomba-Turbina, la otra se mantendra abierta (funcionamiento de estas independientes)												
11	Toma de parámetros para registro de datos del tablero eléctrico e instrumentos de medición y control.												
Al finalizar el ensayo (detención del equipo)													
1	Cerrar válvulas Bombas-turbina.												
2	Cerrar válvula reguladora de caudal.												
3	Apagar el sistema desde el partidor suave(STOP), posteriormente bajar breaker y automaticos.												

Tabla 2 Lista Chequeo banco de ensayos Pat.

5 Conclusiones y propuestas de mejoras

Se implementó en el Laboratorio de Termo fluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María un banco de prueba de bombas centrífugas funcionando como turbina hidráulicas con sus respectivos sistemas de control electrónico, tableros eléctricos y sistemas de disipación, para realizar ensayos con generadores de corriente alterna, monofásico y trifásico.

El banco de ensayos se diseñó de tal manera que fuera adaptable a todo tipo de bombas por la configuración del diseño ya que sería necesario cambiar solo algunos elementos del banco para acoplar otras bombas de diferentes dimensiones.

A través del estudio realizado sobre este tema, estos iniciaron hace aproximadamente 85 años donde se realizó un estudio de bombas centrífugas trabajando bajo condiciones anormales en la cual ensayaron una bomba centrifuga trabajando de forma reversible donde se encontraron niveles de eficiencia buenos para trabajar la bomba de esa manera, transcurridos los años la Universidad también ha estado presente con estudios desde el año 1980 a la fecha de hoy.

La principal desventaja que tiene una bomba centrífuga con respecto a una turbina convencional fue cubierta en este banco de ensayos ya que se instaló un controlador de carga el cual mantendría en todo momento la frecuencia en 50 [hz], el cual regularía el flujo dependiendo de la carga aplicada.

El único problema al final de instalado el banco de ensayos fue que para el grupo bombaturbina-generador trifásico no se disponía de equipos trifásicos para simular carga y poder tomar mediciones, por lo cual fue necesaria la instalación de un banco de resistencia que se encontraba en el laboratorio para realizar las mediciones, debido a esto se recomienda habilitar de manera permanente el banco de disipación de energía dispuesto en este trabajo y así poder utilizar el controlador de carga, además se propone la mejora del sistema de recirculación de agua de este banco ya que solo trabaja a través de gravedad, además de instalar una mirilla para observar el nivel del agua del banco y así no quemar las resistencias por la falta de agua dentro de este.

Se sugiere instalar una rejilla de protección dispuesta de manera tal que evite algún tipo de accidente provocado por el funcionamiento del equipo, aunque se tomaron todas las precauciones pertinentes al momento del diseño del banco.

Los ensayos realizados mostraron algunos valores importantes, donde se logró obtener un 45% de eficiencia en modo turbina y más de 2 [kw] de potencia eléctrica en el grupo monofásico y en el grupo trifásico se obtuvo un rendimiento del 62% generando 16 [kw]de potencia, los cuales son parámetros importantes si hablamos de transformar energía potencial del agua en energía eléctrica, cabe destacar que los ensayos fueron realizados por personas por lo cual puede existir algún error humano al momento de realizar las mediciones.

Con el estudio realizado es importante recalcar la ventaja que posee una bomba por sobre una turbina, éstas ventajas son tales como su simplicidad en uso e instalación, el costo de esta respecto a una turbina, el costo de mantención, el personal capacitado para realizar estas mantenciones, repuestos en el mercado nacional y la capacidad de adquirir estas máquinas.

6 Referencias

[1] J. M Chapallaz, P.Eichenberger, G. Fischer. Manual on Pumps used as Turbine. MHPG Series, Volume 11.

[2] Álvarez Malebrán, Diego. ¨Determinación experimental del comportamiento de trabajo de bombas centrífugas de pulpa (relave) operando en forma reversible como turbinas hidráulicas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, 2012.

[3] Cáceres Riquelme, Luis. ¨Comportamiento de Bomba Ensayada como Turbina Hidráulica¨ Informe Investigación aplicada 1. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.

[4] Monteverde Basso, Roberto, ¨ Predeterminación del comportamiento de trabajo de Bomba-Turbina con Aplicación de las Leyes Modelo¨. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, 2004.

[5] Javendra B. Patel, R.N Mevada, Dheerai Sardana, Vinod P, Rajput, ¨Experimental and numerical Investigation of centrifugal pump performance in reverse mode, [en línea] Departament of Mechanical Engineering, SRPEC, Uniha (India). http://ijates.com/images/short_pdf/1426957091_1094.pdf [consulta: Marzo 2017]

[6] Ortiz Floréz, J. Abella Jiménez, J.A. MÁQUINAS HIDRÁULICAS REVERSIBLES APLICADAS A MINI CENTRALES HIDROELÉCTRICAS. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, [en línea] VOL 6, N° 2, JUNE 2008. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4609914> [consulta: Marzo 2017]

[7] Audisio, Orlando Aníbal. Marchegiani, Ariel Ricardo. Kurtz, Víctor Hugo. BOMBAS CENTRÍFUGAS OPERANDO COMO TURBINAS HIDRÁULICAS (1° PARTE). [en línea] <https://cerpch.unifei.edu.br/artigos/bombas-centrifugas-operando-como-turbinas-hidraulicas-1o-parte/ > [consulta: Marzo 2017]

[8] Espinoza, Pablo. ¨utilización de bombas centrífugas como turbinas hidráulicas¨. Universidad Técnica Federico Santa María, 1980.

[9] ISO 9906:1999. Rotodynamic Pumps Hydraulic Performance acceptance tests Grades 1, 2 and 3.

[10] Catálogo bombas centrífugas Vogt Serie N. [en línea] < http://www.globalriego.cl/pdf/bomba-vogt.pdf > [consulta: Marzo 2017]

[11] Olimstad, Grunde. ¨Characteristics of Reversible-Pump Turbines¨. Thesis for the degree of Philosphiae Doctor Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Marine Technology, 2012.

[12] Derakhshan, Shahram. Nourbakhsh, Ahmad. ¨ Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. [en línea] Departament of Mechanical Engineering. Faculty of Engineering, University of Tehran, 2007. <http://www.iust.ac.ir/files/mech/derakhshan_5df40/files/ISI-Derakhshan1.pdf.> [consulta: Abril 2017]

[13] Knapp, R.T. ¨Complete characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in the Prediction of Transient Behavior¨.[en línea] California, 1937. <http://authors.library.caltech.edu/48235/1/Complete%20Characteristics%20of%20Centrifugal%20Pumps%20and%20Their%20Use%20in%20the%20Prediction%20of%20Transient%20Behavior.pdf> [consulta: Abril 2017]

[14] Motwania, K.H. Jainb, S.V, Patelb, R.N. ¨Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants. Faculty of Technology, [en línea] Marwadi education foundation group of institutions, 2012. <http://ac.els-cdn.com/S1877705813001045/1-s2.0-S1877705813001045-main.pdf?_tid=c92d8008-7360-11e7-b718-00000aab0f27&acdnat=1501224699_0fbcf88ef1779b4df7536ab3f9da114d> [consulta: Mayo 2017]

[15] CASE HISTORY: PUMPS AS TURBINES IN THE WATER INDUSTRY. [en línea] <http://www.waterworld.com/articles/print/volume-27/issue-2/departments/pump-tips-techniques/case-history-pumps-as-turbines-in-the-water-industry.html> [consultado: Mayo 2017]

7 ANEXOS

7.1 Sistema de alimentación.

7.1.1 Bomba de alimentación

- Marca: Warman
- Modelo: 8x8 SRH
- Flujo máximo: $500\left[\frac{m^3}{hr}\right] = 8333\left[\frac{L}{min}\right] = 138{,}89\left[\frac{L}{seg}\right]$
- Velocidad rotacional: 1500 [rpm]

7.1.2 Motor Eléctrico

- Marca: Siemens
- Modelo: $ILG4283 - 4AA60$
- Potencia: $90[kw] - 125[HP]$
- Vel. Rotacional: 1500 rpm
- Polos: 4

7.2 Equipos a estudiar

Las bombas centrífugas usadas para funcionar como turbinas hidráulicas y por ende para la generación de energía consistieron en 2 bombas centrífugas que se encontraban en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad, las cuales ya han sido utilizadas para ensayos similares al propuesto en este trabajo.

7.2.1 Bomba de trabajo 1

- Marca : Vogt
- Modelo : N665
- Flujo nominal : $192\left[\frac{m^3}{h}\right] = 3200\left[\frac{L}{min}\right] = 52{,}7\left[\frac{L}{seg}\right]$
- Velocidad Rotacional : 1450 [rpm]
- Altura Nominal: 32.5 [m]
- Diámetro Rodete: 334 [mm]
- Diámetro Succión : 5"
- Diámetro Descarga: 4"
- Rendimiento Óptimo : 80%

7.2.2 Generador trifásico

- Marca : STS SWITCHGEAR MOTORS LTD
- Modelo : G16 E
- Potencia : 32.5 [KVA]
- Vel. Rotacional: 1500 [RPM]
- Voltaje : 415/220 [V]

7.2.3 Bomba de trabajo 2

- Marca : Vogt
- Modelo : N 629 B
- Flujo Nominal : 34 $[\frac{m^3}{h}]$ = 566,7 $[\frac{L}{min}]$ = 9.44 $[\frac{L}{seg}]$
- Vel. Rotacional : 1450 [rpm]
- Altura Nominal : 17.5 [m]
- Diámetro Rodete : 218[mm]
- Diámetro succión : 2 ½’’
- Diámetro Descarga : 2´´
- Rendimiento óptimo : 70%

7.2.4 Generador Monofásico

- Marca : KOHLBACH
- Modelo: 112 MA
- Potencia: 1.8 [KW] – 2.0 [KVA]
- Vel. Rotacional : 1500[RPM]
- Voltaje: 110/220 [V]

7.3 Instrumentos de medición.

7.3.1 Tacómetro:

- Marca: Extech Instrument
- Modelo: 461891
- Rango: 0.5-19999 [RPM]
- Resolución : 0.5[RPM]

Figura 25 Tacómetro

7.3.2 Multímetro pinza digital:

- Marca: Sonel.
- Modelo: cmp-2000
- Lectura: CC, CA, F, T°, Capacitancia y resistencia.
- Rango Voltaje: [0-6.599]V, [6.6-65.99]V , [66-660]V
- Res. voltaje: [0.001] V, [0.01] V, [0.1] V.
- Rango Amperaje DC: [0-659.9] A, [660-2000] A.
- Res. Amperaje DC: [0.1] A, [1] A.
- Rango Amperaje AC: [0-659.9] A, [660-1500] A.
- Res. Amperaje AC: [0.1] A, [1] A.

Figura 26 Multímetro

7.4 Curvas características de bombas ensayadas [10].

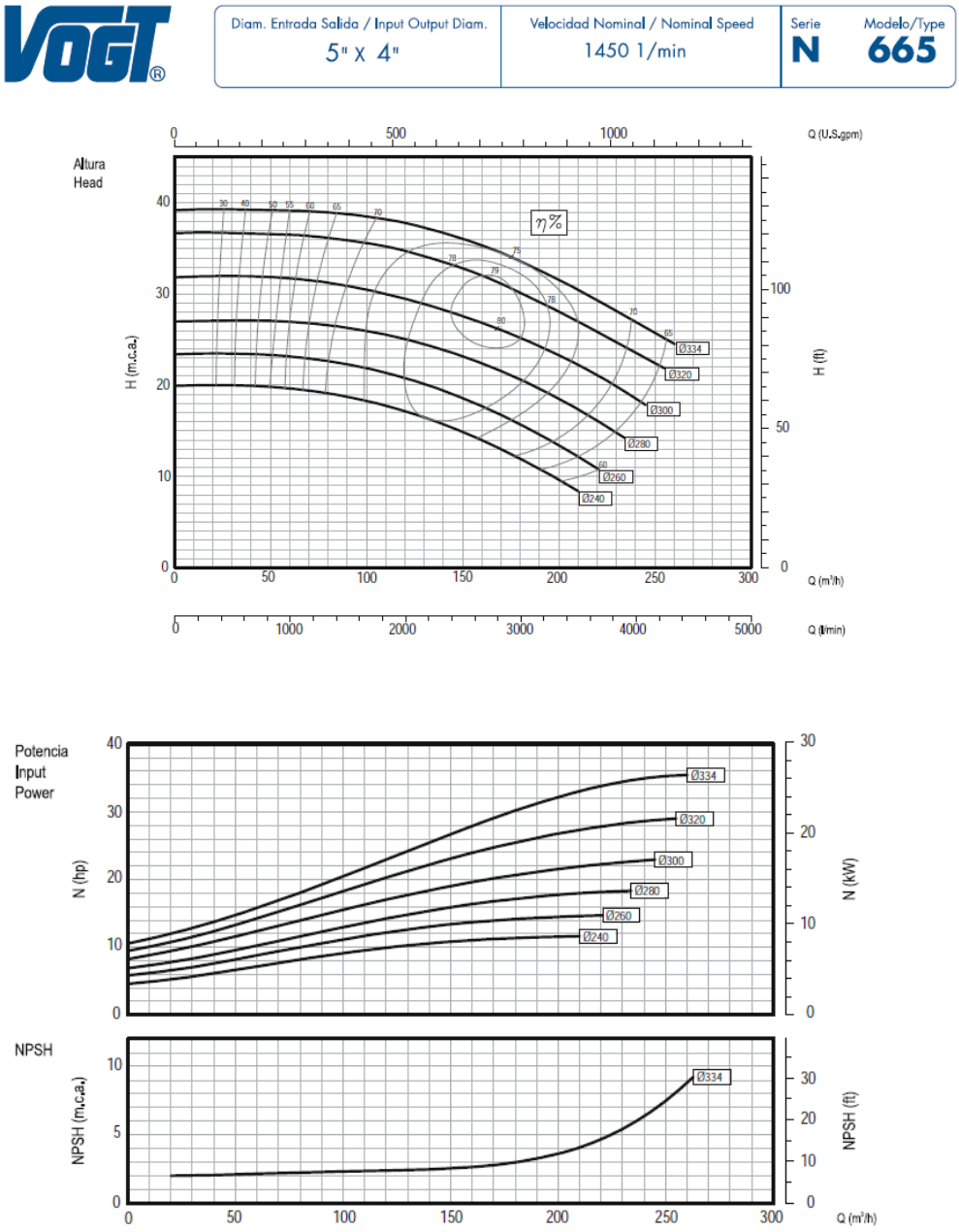


Figura 27 Curva característica Bomba Vogt N 665

Diam. Entrada Salida / Input Output Diam.	Velocidad Nominal / Nominal Speed	Serie	Modelo/Type
2 1/2" X 2"	1450 1/min	N	629B

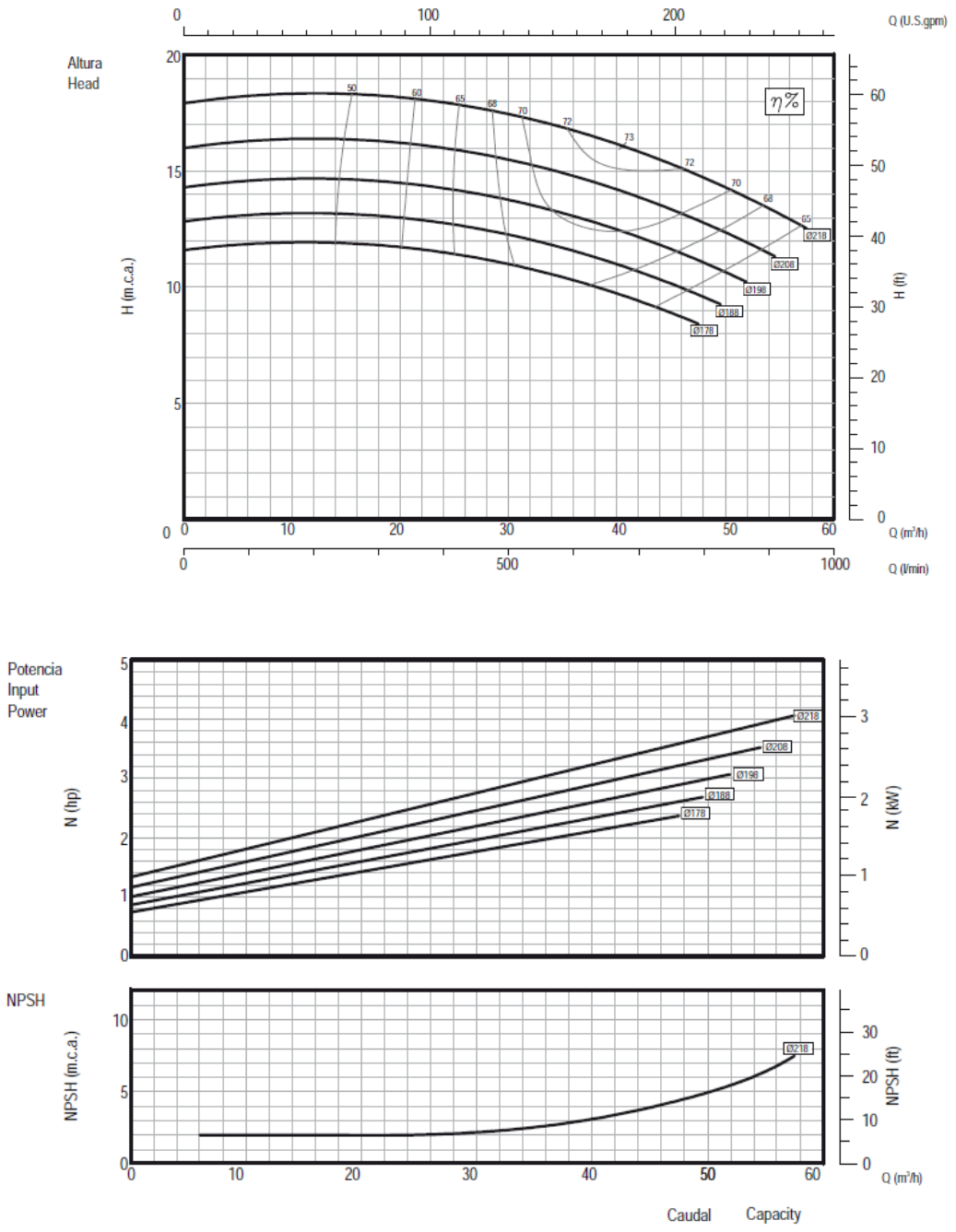


Figura 28 Curva característica Bomba Vogt N629B

7.5 Campo de aplicación de la bombas centrífugas.

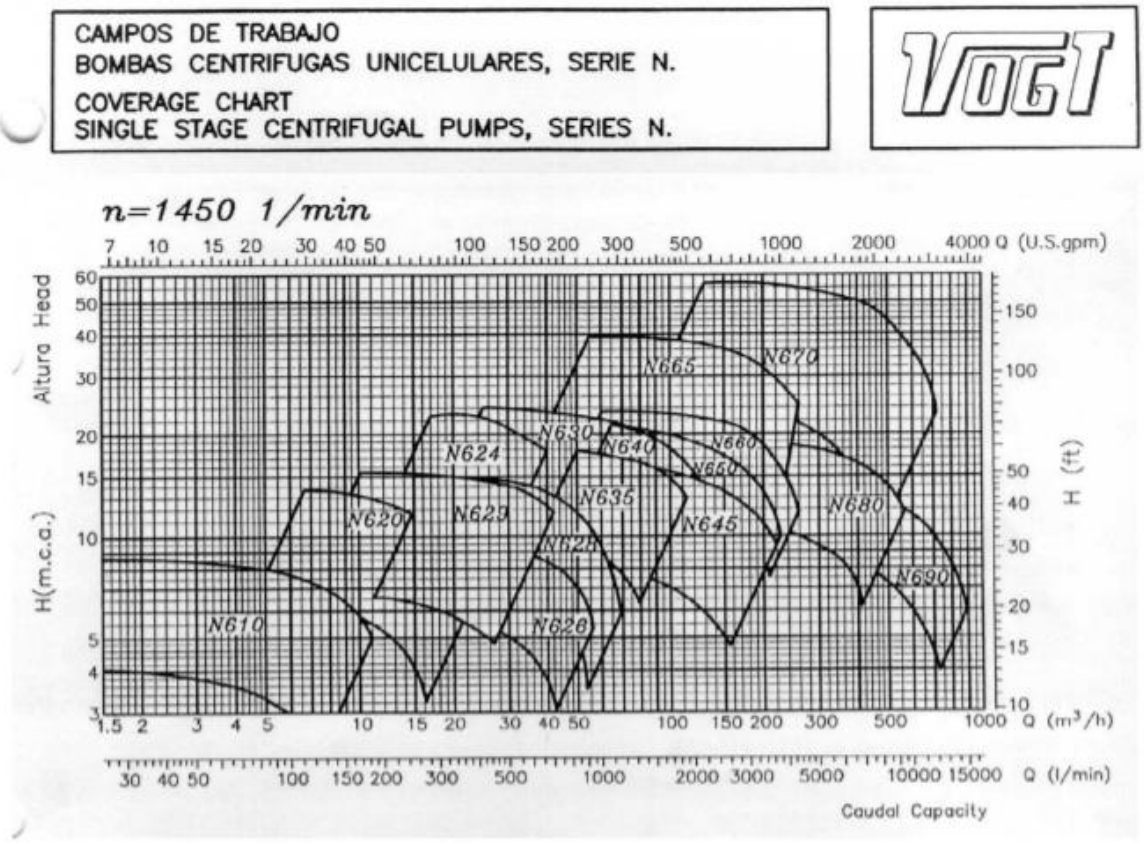


Figura 29 Campo de trabajo bombas centrifugas Vogt.

.

7.6 Layout del panel del controlador de carga ¨A2¨

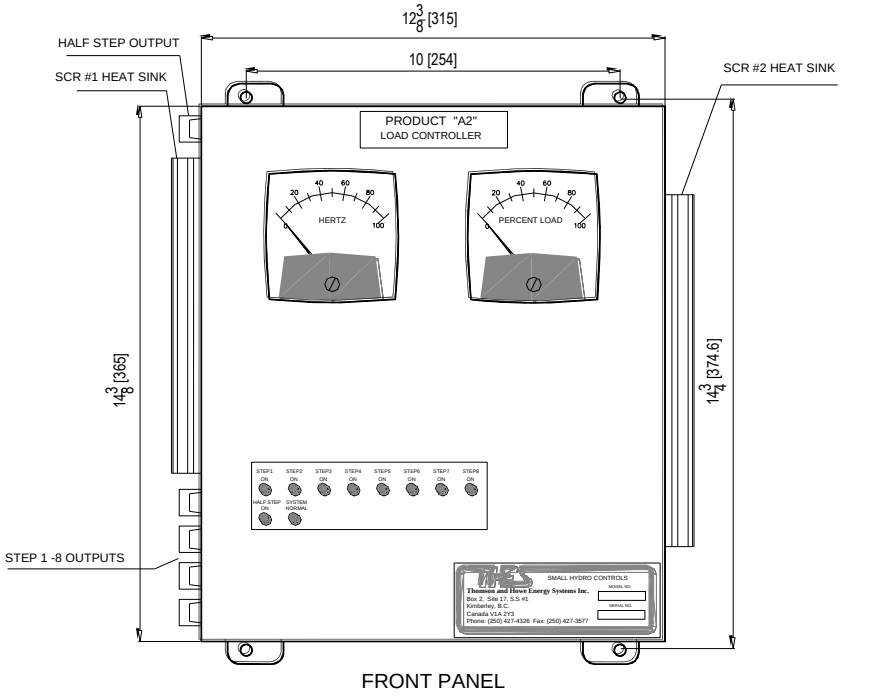


Figura 30 Layout controlador de carga "A2"

7.7 Layout panel controlador de carga ¨J3¨

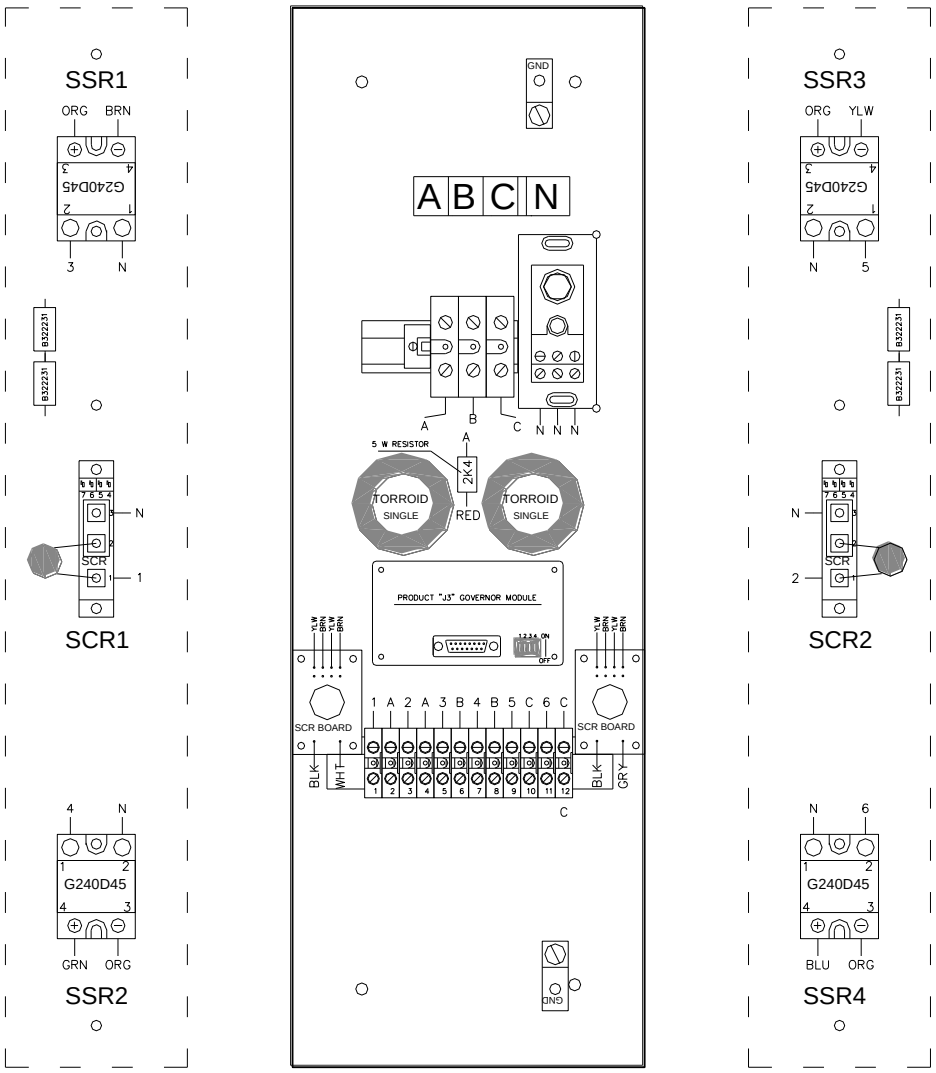


Figura 31 Layout controlador de carga "J3"

7.8 Tablas datos ensayados.

7.8.1 Datos Ensayos Generador Monofásico

Pent[Bar]	RPM	A[A]	V[V]	Psal[Bar]	Q[L/m]	N°amps	Pot[KW]	Pot.Teo[KW]	Efic[%]	% Carga
3,2	1502	0	218	-0,2	400	0	0	2,266666667	0%	0%
3,2	1501	0,3	219	-0,2	412	1	0,0657	2,334666667	3%	7%
3,2	1503	1	218	-0,2	456	2	0,218	2,584	8%	14%
3,2	1502	1,5	217	-0,1	460	3	0,3255	2,53	13%	21%
3,2	1500	2	220	-0,1	495	4	0,44	2,7225	16%	29%
3,2	1503	2,8	224	-0,1	517	5	0,6272	2,8435	22%	36%
3,2	1507	3,2	225	0	560	6	0,72	2,986666667	24%	43%
3,2	1502	3,4	225	-0,1	555	7	0,765	3,0525	25%	50%
3,2	1505	3,6	228	0	570	8	0,8208	3,04	27%	57%
3,2	1503	4,4	233	0	605	9	1,0252	3,226666667	32%	64%
3,2	1503	4,9	234	0	627	10	1,1466	3,344	34%	71%
3,2	1505	5,4	235	0	648	11	1,269	3,456	37%	79%
3,2	1505	6,2	236	0	669	12	1,4632	3,568	41%	86%
3,2	1500	6,7	238	0	704	13	1,5946	3,754666667	42%	93%
3,2	1453	7,6	228	0	716	14	1,7328	3,818666667	45%	100%

Tabla 3 Ensayos a 3.2 [bar]- 1500[rpm] generador monofásico

Pent[Bar]	RPM	A[A]	V[V]	Psal[Bar]	Q[L/m]	N°amps	P[KW]	Pot.Teo[KW]	Efic[%]	% Carga
3,8	1501	0	208	-0,2	377	0	0	2,513333333	0%	0%
3,8	1502	0,3	210	-0,2	401	1	0,063	2,673333333	2%	6%
3,8	1500	1	211	-0,2	422	2	0,211	2,813333333	8%	12%
3,8	1501	1,5	213	-0,2	474	3	0,3195	3,16	10%	18%
3,8	1502	2	215	-0,2	494	4	0,43	3,293333333	13%	24%
3,8	1500	2,7	219	-0,2	534	5	0,5913	3,56	17%	29%
3,8	1500	3,2	222	0	555	6	0,7104	3,515	20%	35%
3,8	1500	4,3	230	0	623	7	0,989	3,945666667	25%	41%
3,8	1504	4,8	233	0	634	8	1,1184	4,015333333	28%	47%
3,8	1500	5,6	232	0	658	9	1,2992	4,167333333	31%	53%
3,8	1505	6,1	238	0	685	10	1,4518	4,338333333	33%	59%
3,8	1499	6,6	235	0	703	11	1,551	4,452333333	35%	65%
3,8	1498	7,3	235	0	722	12	1,7155	4,572666667	38%	71%
3,8	1504	7,8	238	0	746	13	1,8564	4,724666667	39%	76%
3,8	1501	7,7	236	0	750	14	1,8172	4,75	38%	82%
3,8	1503	8,2	236	0	766	15	1,9352	4,851333333	40%	88%
3,8	1506	8,9	236	0	783	16	2,1004	4,959	42%	94%
3,8	1467	9,2	229	0	793	17	2,1068	5,022333333	42%	100%

Tabla 4 Ensayos a 3.8 [bar]- 1500[rpm] generador monofásico

Pent[Bar]	RPM	A[A]	V[V]	Psal[Bar]	Q[L/m]	N°amps	Pot[KW]	Pot.Teo[KW]	Efic[%]	% Carga
4,4	1500	0	220	-0,3	422	0	0	3,305666667	0%	0%
4,4	1500	0,3	214	-0,3	412	1	0,0642	3,227333333	2%	5%
4,4	1501	0,8	216	-0,3	433	2	0,1728	3,391833333	5%	10%
4,4	1507	1,3	218	-0,2	460	3	0,2834	3,526666667	8%	15%
4,4	1510	1,8	221	-0,2	484	4	0,3978	3,710666667	11%	20%
4,4	1500	2,1	220	-0,1	513	5	0,462	3,8475	12%	25%
4,4	1509	2,6	223	0	527	6	0,5798	3,864666667	15%	30%
4,4	1508	3,2	226	0	564	7	0,7232	4,136	17%	35%
4,4	1507	3,9	230	0	597	8	0,897	4,378	20%	40%
4,4	1502	4,2	231	0	616	9	0,9702	4,517333333	21%	45%
4,4	1505	5,2	236	0	649	10	1,2272	4,759333333	26%	50%
4,4	1510	5,4	237	0	670	11	1,2798	4,913333333	26%	55%
4,4	1500	6,5	237	0	702	12	1,5405	5,148	30%	60%
4,4	1501	6,6	239	0	716	13	1,5774	5,250666667	30%	65%
4,4	1505	7,7	238	0	758	14	1,8326	5,558666667	33%	70%
4,4	1507	8,2	236	0	784	15	1,9352	5,749333333	34%	75%
4,4	1500	9,2	237	0	800	16	2,1804	5,866666667	37%	80%
4,4	1501	9,5	236	0	819	17	2,242	6,006	37%	85%
4,4	1500	10,4	236	0	849	18	2,4544	6,226	39%	90%
4,4	1504	10,5	235	0	867	19	2,4675	6,358	39%	95%
4,4	1480	11,2	231	0	887	20	2,5872	6,504666667	40%	100%

Tabla 5 Ensayos a 4.4 [bar]- 1500[rpm] generador monofásico

7.8.2 Datos Ensayos Generador Trifásico

Pent[Bar]	RPM	A[A]	V[V]	Psal[Bar]	Q[L/m]	F[HZ]	Pot[KW]	Pot.Teo[KW]	Efic[%]
4,4	1502	0	413	-0,2	1917	50	0	14,697	0%
4,3	1500	7,5	406	-0,2	2312	50	5,27394	17,34	30%
4,2	1504	15,4	413	-0,2	3257	50	11,0158664	23,8846667	46%
4	1501	19,4	414	-0,2	3557	50	13,9107312	24,899	56%
3,8	1352	24	375	-0,2	3778	45	15,588	25,1866667	62%

Tabla 6 Ensayos a 1500 [rpm] generador trifásico.

7.9 Imágenes implementación Banco de Ensayos Bombas Funcionando como Turbina

Figura 32 Instalación tuberías banco ensayo.

Figura 33 Soldadura codo-tee con tubería.

Figura 34 Conexión sistema codo-tee con flange tubería

Figura 35 Soldadura reducción

Figura 36 Instalación codo en sistema de tuberías banco de ensayo.

.

Figura 37 vista implementación banco de ensayos

.

Figura 38 Conexión válvula PAT.

Figura 39Pintado base PAT.

Figura 40 Banco de ensayos

Figura 41 Conexión Piping y PAT terminado.

Figura 42 Sistema eléctrico y controlador de frecuencia generador trifásico

Figura 43 Descarga Pat

Figura 44 Banco ensayos final.

7.10 Imágenes sistema de control, bancos de carga y tableros eléctricos.

7.10.1 Tablero eléctrico sistema de alimentación.

Figura 45Tablero eléctrico sistema de alimentación circuito

7.10.2 Tablero eléctrico y controlador de frecuencia generador monofásico.

Figura 46 Tablero eléctrico y controlador de frecuencia generador monofásico

7.10.3 Tablero eléctrico y controlador de frecuencia generador trifásico.

Figura 47Tablero eléctrico y controlador de frecuencia generador trifásico.

7.10.4 Banco de resistencias generador trifásico.

Figura 48 Banco de resistencia generador trifásico