



UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL MECANICA

FACTIBILIDAD TECNICA DE LA UTILIZACION DE UNA BOMBA COMO TURBINA HIDRAULICA

Trabajo para optar al Título de:
Ingeniero Mecánico

Profesor Patrocinante:
Sr. Misael Fuentes Paredes
Ingeniero Mecánico

CRISTIAN MARCELO PUCHI GONZALEZ
Valdivia - Chile
2010

El Profesor Patrocinante y Profesores Informantes del Trabajo de Titulación Comunican al Director de la Escuela de Ingeniería Civil Mecánica de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería que el Trabajo de Titulación del Señor:

Cristian Marcelo Puchi Gonzalez

Ha sido aprobado en el examen de defensa rendido el día _____ como requisito para optar al Título de Ingeniero Mecánico. Y, para que así conste para todos los efectos firman:

Profesor Patrocinante:

Sr. Misael Fuentes P.

Profesores Informantes:

Sr. Claudio Bastidas C.

Sr. Marcelo Paredes C.

Director de Escuela:

Sr. Milton Lemarie O.

INDICE

CONTENIDO	Página.
RESUMEN.	1
SUMARY.	2
INTRODUCCION.	3
CAPITULO I:	
ANTECEDENTES DEL COMPORTAMIENTO DE BOMBAS UTILIZADAS COMO TURBINA.	6
I.1.- Generalidades.	6
I.2.- Utilización de una bomba como turbina.	7
I.2.a.- Aplicaciones.	7
I.2.b.- Limitantes.	8
I.3.- Campos de aplicación de bombas como turbina.	8
I.3.a.- La generación de energía como objetivo primario de la bomba.	8
I.3.b.- La recuperación de potencia hidráulica.	9
I.4.- Modificaciones en el diseño de la bomba para funcionar como turbina.	9
I.5.- Tipo de bomba y eficiencia en el modo turbina.	10
CAPITULO II:	
MONITOR DE ENSAYO.	12
II.1.- Características hidráulicas de sistema.	12

II.2.- Prueba Hidráulica.	15
II.3.- Resultados de ensayo.	17
CAPITULO III:	
ENSAYO DE BOMBA COMO TURBINA.	19
III.1.- Selección de bomba a ensayar como turbina.	19
III.1.a.- Tipo de bomba.	19
III.1.b.- Capacidad de bomba.	20
III.2.- Ensayo de bomba como turbina.	22
CAPITULO IV:	
RESULTADOS DEL ENSAYO DE BOMBA COMO TURBINA.	27
IV.1.- Datos obtenidos del ensayo.	27
IV.2.- Análisis de los datos.	30
CONCLUSIONES.	39
BIBLIOGRAFIA.	41
ANEXOS.	43
Anexo 1. Características de la bomba.	44
Anexo 2. Cálculo de caudal por medio de vertedero con contracción.	45
Anexo 3. Curvas característica de bomba a ensayar como turbina.	47
Anexo 4. Cálculo de energía a la entrada de la bomba-turbina.	48
Anexo 5. Cálculo de energía disponible en el eje de la bomba-turbina.	49
Anexo 6. Instrumentación.	51

RESUMEN

El presente trabajo muestra los ensayos realizados a una bomba centrífuga de álabes cerrados, funcionando como turbina hidráulica. Lo cual se logró usando la bomba en su sentido inverso, es decir, haciendo que por la salida de la bomba-turbina entrara agua a presión, proveniente de otra bomba, simulando de esta forma las condiciones de caída de agua y caudal, con los cuales una turbina funciona.

La bomba-turbina se ensayó a distintos saltos y caudales, tomando registro del caudal, la presión a la entrada, la velocidad de giro del eje y la potencia en el eje, esto para calcular el rendimiento de la bomba funcionando como turbina.

Todo esto para comprobar si es factible técnicamente usar una bomba como turbina hidráulica.

SUMMARY

The present work shows the tests realized to a centrifugal pump of closed blades, working as hydraulic turbine. Which I manage using the pump in his inverse sense, that is to say, doing that the exit of the bomb - turbine was entering water to pressure, from another pump, simulating of this form the conditions of water fall and caudally, with which a turbine works

The pump - turbine I test to different jumps and wealths, taking record of the wealth, the pressure at the entry, the speed of draft of the axis and the power in the axis, this to calculate the performance of the bomb working as turbine

All that to verify if is feasible technically to use a bomb as hydraulic turbine.

INTRODUCCION

Debido a la geografía que posee Chile, existen muchas partes del país donde el sistema interconectado de distribución eléctrica no es capaz de abarcar lo demandado, siendo esta la razón de que muchos de estos sectores posean generadores eléctricos a combustión interna, pequeñas hidroeléctricas o simplemente no poseen electricidad [9].

Es así, como hoy en día, las pequeñas hidroeléctricas son una muy buena forma de generar electricidad, gracias al abundante recurso hídrico con el que cuenta Chile, especialmente en la zona sur.

Es por esta razón que el presente trabajo tiene como objetivo principal ver la factibilidad técnica de usar una bomba centrífuga como turbina hidráulica para la generación de electricidad. Esto debido a la variedad de bombas existentes en el mercado nacional, a la disponibilidad de sus repuestos y a la mecánica básica con los que están contruidos estos equipos.

Para esto, se montará un laboratorio de ensayo, en el cual se ensayará una bomba centrífuga a distintos caudales y alturas, simulando las condiciones en que esta trabajaría en la realidad. Con los datos obtenidos (potencia de freno y RPM), se podrá verificar si es posible usar una bomba centrífuga como turbina hidráulica.

El gran problema que se espera solucionar con el presente proyecto es el dar otra opción para el desarrollo de minicentrales hidroeléctricas. La implementación de un proyecto de éste tipo es costoso debido al precio de la turbina, pero la verdadera complejidad de usar estas turbinas, es que al no existir productores nacionales, se deben importar, los repuestos en caso de avería, prácticamente son imposibles de conseguir en el mercado nacional, más aun para personas que viven en lugares aislados.

i. Objetivo general

- Comprobar si es factible, técnicamente, utilizar una bomba como turbina.

ii. Objetivos específicos

- Determinar características de la bomba a utilizar en el ensayo.
- Definir algoritmo del ensayo.
- Establecer equipamiento, maquinaria y/o materiales a utilizar.
- Montar el equipamiento para la realización de ensayo.
- Capturar y registrar parámetros de funcionamiento de una bomba funcionando como turbina (caudal, altura, rpm, potencia de freno).
- Determinar curva de rendimiento de bomba funcionando como turbina.

iii. Metodología del trabajo.

La metodología a utilizar, comenzará con la selección de una bomba que cumpla con los parámetros requeridos para este trabajo. Seleccionada la bomba a ensayar como turbina, se continuará con el montaje de laboratorio, en donde se ensayará la bomba. Luego de esto se analizarán los datos que se obtengan del experimento, para luego dar una conclusión al objetivo general del proyecto.

CAPITULO I: ANTECEDENTES DEL COMPORTAMIENTO DE BOMBAS USADAS COMO TURBINA.

I.1. Generalidades.

Las bombas centrífugas poseen características particulares que las hacen apropiadas para diversos usos, entre los cuales se puede nombrar el funcionamiento en sentido inverso, es decir, como turbina hidráulica. Esta particularidad de las bombas presenta una buena solución para el desarrollo de minicentrales hidroeléctricas y de bajo costo debido a la producción en serie de estos equipos, además poseen una simplicidad constructiva que reduce al mínimo los costos de mantenimiento.

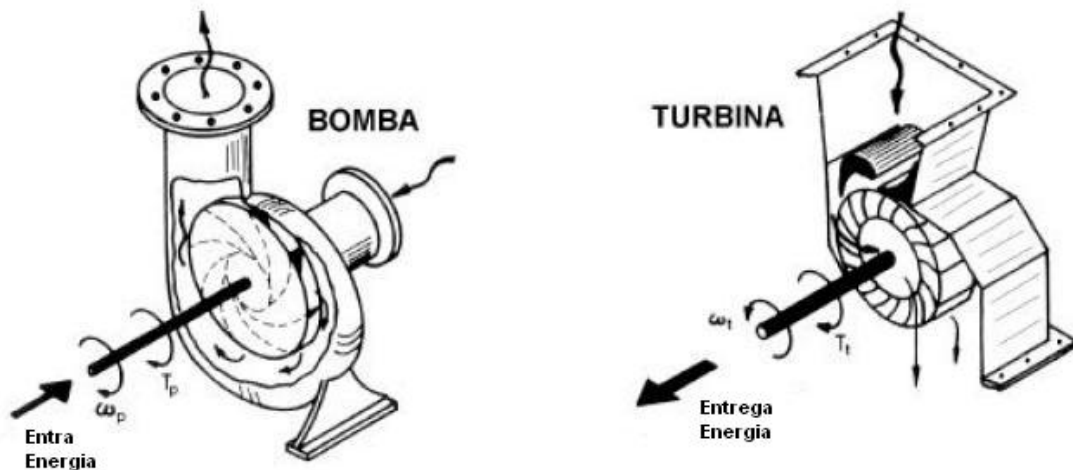


Figura N° 1 Comparación entre bomba y turbina.

Otra característica que hace a estas máquinas tan singulares al momento de funcionar como turbinas, es su amplio rango de caudales y alturas de funcionamiento al que pueden desempeñarse. También tienen la virtud de trabajar con grandes contrapresiones y presiones internas hasta de 300 [bar], así como la posibilidad de funcionar de forma segura en ambientes con alta concentración de polvo, como es el caso de las minas.

I.2. Uso de una bomba como turbina.

I.2.a) Aplicaciones.

- **Costos:** Los costos de una bomba que funcione como turbina, comparados con los de una turbina, puede hacer que los costos de un proyecto de minicentral de generación varíe notoriamente en este ítem.
- **Disponibilidad:** Debido al amplio campo de aplicación y uso masivo que tienen las bombas, éstas se encuentran en el mercado nacional con bastante facilidad. Lo mismo ocurre con los repuestos.
- **Mantenimiento:** Debido a su simplicidad, no se requiere de equipos especiales ni mano de obra calificada para la reparación y mantenimiento de las bombas.
- **Construcción:** La fabricación de una bomba es un proceso bastante más simple que el de una turbina, lo que significa una disminución en los costos de fabricación y en consecuencia en la venta de este producto.

I.2.b) Limitantes.

- **No tiene mecanismo de control hidráulico:** Se debe colocar una válvula de control en la tubería de entrada para hacer funcionar o detener la bomba-turbina, lo cual implica un aumento (pequeño) en los costos. Si la válvula se usa para controlar las variaciones de potencia de flujo, las pérdidas se incrementan notoriamente. Este inconveniente (ausencia de un dispositivo de regulación de flujo) hace que se aplique a proyectos con caudal constante a lo largo del año.

I.3. Campos de aplicación de bombas como turbina.

Se puede distinguir dos categorías para la aplicación práctica de bombas usadas como turbina:

I.3.a) La generación de energía como objetivo primario de la bomba.

Las bombas no fueron diseñadas intencionalmente para operar como turbinas, pero ahora se están usando cada vez más con el objetivo de operar como micro-centrales eléctricas para generar potencias de entre 5 a 500 KW, debido a las ventajas anteriormente mencionadas. Las aplicaciones pueden ir desde procesos agrarios y pequeñas industrias, hasta la generación de electricidad. Un ejemplo de bombas usadas como turbina, es el sistema de acumulación por bombeo, donde en la noche las bombas operan elevando agua a un lago de almacenamiento en altura, a una tarifa reducida de electricidad, y durante el día, generan electricidad a través de la misma máquina que opera en el modo de turbina, para así cubrir las horas de mayor demanda.

I.3.b) La recuperación de potencia hidráulica.

Un factor común de instalaciones que manejan fluidos, es la necesidad de reducir presión de un fluido al final de un proceso o antes de la aplicación o tratamiento del mismo. El tratamiento convencional disiparía esta presión sobrante en cualquier tipo de dispositivo como válvula, estanque, al río, etc. Usando una bomba como turbina para utilizar esta presión, se recupera esta energía a muy bajo costo, lo que mejora la eficiencia global de la planta. De ahí el gran interés que ha despertado recientemente este tipo de aplicaciones, principalmente a raíz del incremento en los precios de la energía y al conocimiento más profundo que ahora se tiene sobre la conservación de la energía y el medio ambiente.

I.4. Modificaciones en el diseño de la bomba para funcionar como turbina.

En la mayoría de los casos, no es necesario realizar ningún tipo de cambio o modificación en el diseño de una bomba que opera como una turbina, siempre y cuando en la selección se haya tenido en cuenta la altura superior de operación y la potencia de salida de la bomba en el modo de turbina y, por consiguiente, la velocidad nominal de la turbina se haya seleccionado por debajo de la velocidad máxima permisible de la bomba. Sin embargo, no está de más tener presente los diferentes puntos que a continuación se muestran, para así obtener un funcionamiento más seguro:

- Verificar que los componentes del eje no se puedan soltar.
- Evaluar el sentido de giro de los rodamientos.

- Verificar el esfuerzo sobre el eje debido al aumento de la potencia.
- Inspeccionar los efectos en los sellos del eje debido al aumento de la presión.

I.5. Tipo de bomba y eficiencia en el modo turbina.

Técnicamente cualquier tipo de bomba puede usarse como turbina, debido a que no hay ningún elemento de la bomba que impida el ingreso de agua por su salida y que ésta salga por la entrada de la bomba. Sin embargo, la ventaja principal de una bomba-turbina, es que su costo es inferior al de una turbina convencional. El vasto campo de las bombas con sus diferentes tipos y rangos de potencia, hace que una bomba como turbina sea conveniente para casi cualquier tipo de aplicación con alturas de aproximadamente 10 [m] a varios cientos de metros (multi-etapas). Para grandes flujos se pueden utilizar bombas de doble-flujo. Incluso pueden usarse bombas sumergibles como bomba-turbina, integrándolas en el curso de agua o sistema de cañería, lo que puede ser ventajoso desde el punto de vista ambiental o arquitectónico.

La eficiencia de una bomba en el modo turbina puede ser variado, esto va a depender principalmente del tipo de bomba a utilizar y el tipo de alabe. Esto por los resultados obtenidos en otros ensayos a múltiples tipos de bombas, donde los rendimientos han variado desde un 20%, hasta cerca del 70% [1] [2] [5].

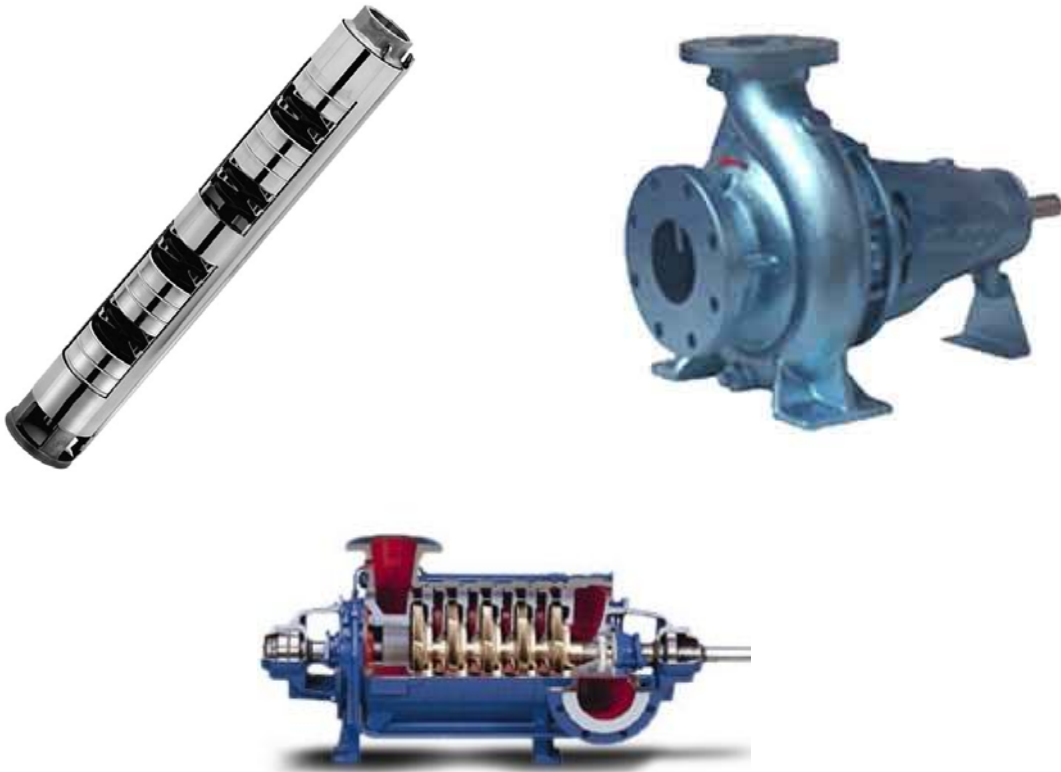


Figura N° 2 Distintos tipos de bombas que se pueden utilizar como turbinas.

CAPITULO II: MONITOR DE ENSAYO.

Para comenzar con el ensayo de una bomba-turbina, se debió pasar por varias etapas, antes de proceder con el ensayo. Por esta razón, que en el presente capítulo, se mostrarán todos los pasos que se siguieron para poder ensayar una bomba como turbina hidráulica.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Universidad Austral de Chile.

II.1. Características hidráulicas del laboratorio.

Para ensayar la bomba-turbina, es necesario simular las condiciones en las cuales una turbina funciona, es decir una caída de agua constante. Para lograr esto se realiza por medio de una bomba, la cual debe entregar el agua y la presión necesaria para simular éstas condiciones.

Debido a que la bomba a utilizar en el laboratorio no se conoce su curva característica, no es posible estimar la capacidad de la bomba, es decir, la cantidad de agua que esta es capaz de entregar. Es por esto que es necesario realizar una Prueba Hidráulica a la bomba, la cual entregará la curva característica de la bomba, conocida como la curva de Caudal v/s Presión.

Una prueba hidráulica consiste en hacer andar la bomba y hacer que circule agua por ella, a la salida de la bomba, por medio una válvula, se comienza a cerrar el paso en forma gradual, de esta forma se genera una presión en la entrada de la válvula, la cual es medida por un manómetro. Este procedimiento de cerrar la válvula se hace desde su posición abierta hasta

llegar a cerrarla completamente. En cada punto que se cierre la válvula, la presión y el caudal que pasan por la bomba variarán, estas variaciones son las que se registran y con ellas ya se está en condiciones de confeccionar la curva Caudal v/s Presión de la bomba.

Para lograr realizar este ensayo, se debe contar con un depósito de agua de donde extraer el agua, un manómetro para medir la presión que es capaz de generar la bomba, una válvula que obstruirá el paso del agua y un indicador de flujo, que para éste caso se utilizará un vertedero para calcular el caudal que entrega la bomba.

A continuación se muestra el esquema planteado para realizar la prueba hidráulica a la bomba.

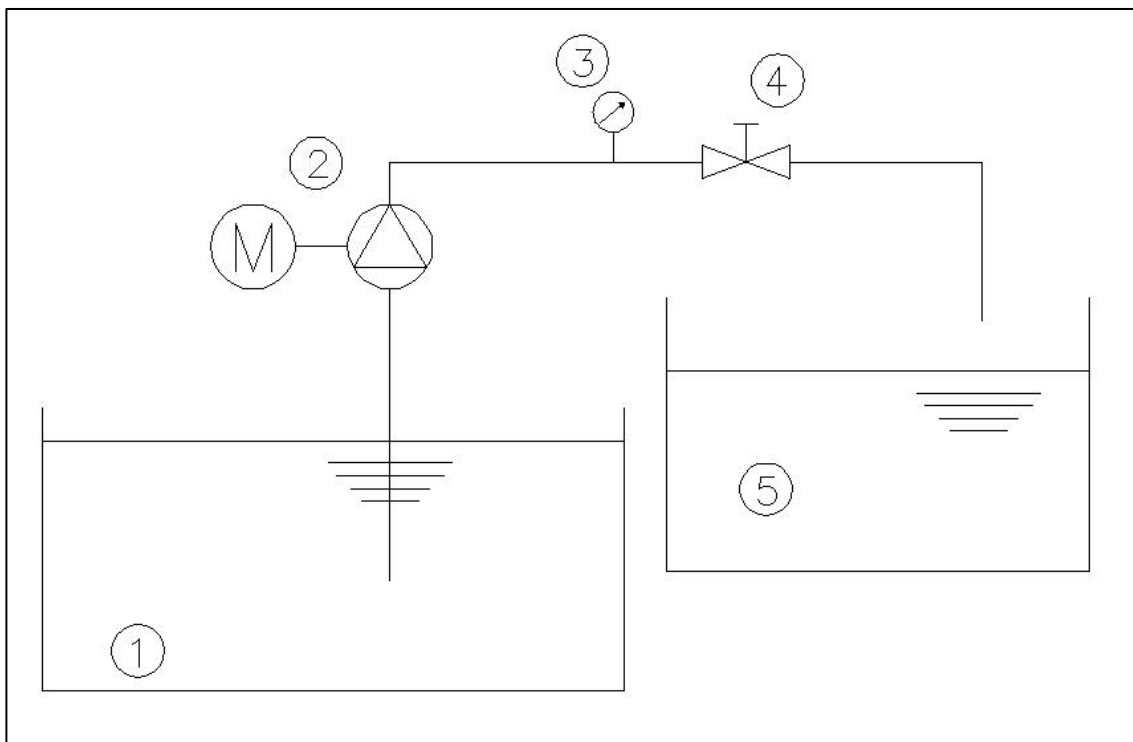


Figura N° 3 Esquema propuesto para prueba hidráulica

El esquema planteado cuenta con 5 partes, las cuales se definen a continuación:

- **Depósito de agua:** de éste depósito la bomba extraerá el agua para realizar el ensayo.
- **Bomba a ensayar:** ésta es la bomba a la cual se efectuó la prueba hidráulica, sus características se encuentran en el anexo 1.
- **Manómetro de entrada:** éste manómetro se encuentra antes de la válvula reguladora de caudal, será el encargado de indicar la presión que es capaz de generar la bomba. El manómetro contiene glicerina en su interior, para mantener lo más constante la medición de presión del agua.
- **Válvula de regulación de caudal:** ésta es una válvula de compuerta de bronce de 2 [pulg.], que será la encargada de ir obstruyendo el paso del agua por la cañería.
- **Vertedero rectangular:** aquí es en donde la bomba descargará el agua y éste a su vez, devolverá el agua al depósito principal, para de esta forma completar el circuito de agua. El vertedero se instaló para poder medir el caudal que está pasando por la bomba.

II.2. Prueba hidráulica.

En el apartado anterior se explicó la forma en que se realiza una prueba hidráulica a una bomba, a continuación se explica como se llevó a cabo en el laboratorio el ensayo.

Como se muestra en la Figura N° 4, se montó el laboratorio según el esquema planteado anteriormente (Figura N° 3), finalizado ésta parte se comienza con el ensayo.

Se hace andar la bomba, con la válvula completamente abierta y se verifica la presión en el manómetro, éste marca prácticamente 0 [bar]. Luego se comienza a cerrar la válvula, este procedimiento se realizó cada 0.5 [bar], hasta una presión de 5 [bar]



Figura N° 4 Ensayo a bomba para obtención curva Caudal v/s Presión.

Para cada punto de presión es necesario saber el caudal que está entregando la bomba, para esto se utilizó un vertedero rectangular con contracción (Anexo 2), el cual devuelve el agua al depósito principal. Para conocer la cantidad de agua que pasa por un vertedero de sección cuadrada, es necesario saber la altura del agua que sale por éste y para ello se instaló una regla en la pared del vertedero, ubicando el 0 en línea con la parte inferior de la salida del vertedero. De ésta forma por cada punto de presión que marcaba el manómetro, la altura del agua es medida por medio de la regla y de las fórmulas del Anexo 2 se calcula el caudal.

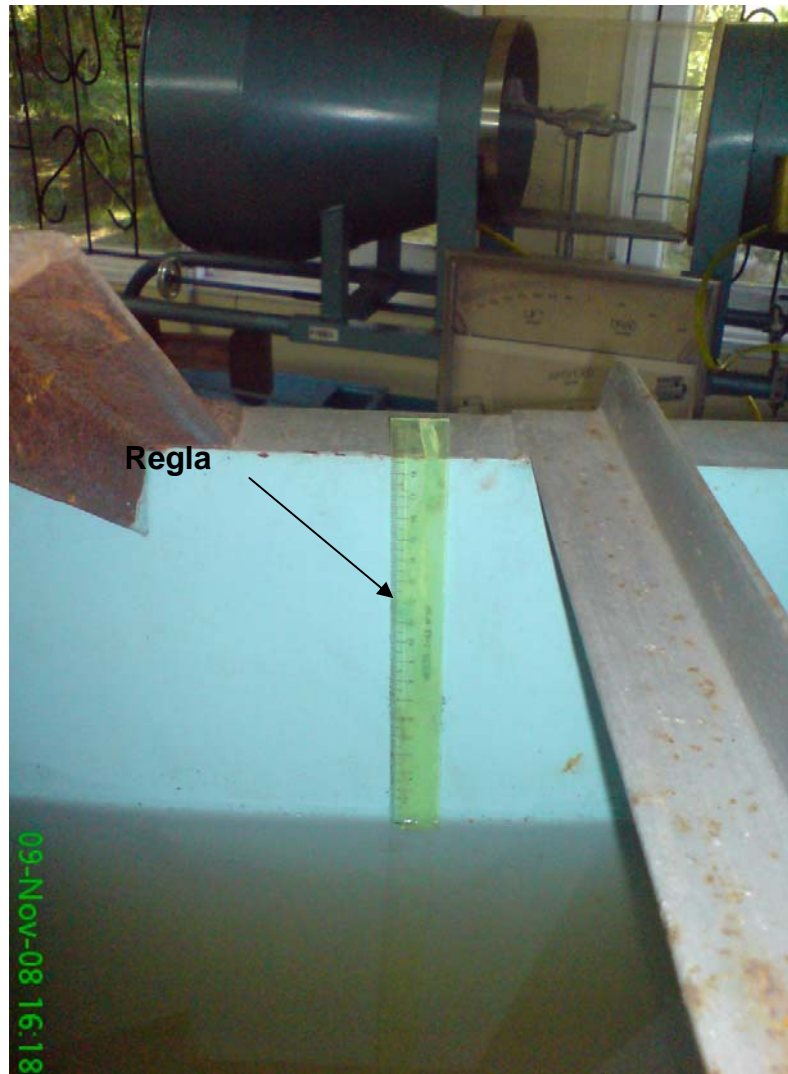


Figura N° 5 Medición de altura de agua en vertedero.

II.3. Resultados de ensayo.

Los valores mostrados en la Tabla N° 1 son los arrojados en la prueba hidráulica hecha a la bomba que será la encargada de simular las condiciones de salto de agua.

La primera columna indica la presión que marca el manómetro, la segunda columna muestra la altura de agua que esta pasando por el vertedero, la cual es necesaria para el cálculo del caudal de la bomba. La tercera columna muestra un factor adimensional utilizado para el cálculo de caudal de vertederos cuadrados y la cuarta columna indica el caudal de la bomba.

Presión [bar]	H [mm]	Cq	Caudal [lt/min]
0,5	65	0,64	349,5
1	64	0,64	341,8
1,5	63	0,64	334,1
2	62	0,64	326,5
2,5	61	0,64	318,9
3	60	0,64	311,4
3,5	57	0,64	289,3
4	55	0,64	274,8
4,5	52	0,65	253,7
5	48	0,65	226,4

Tabla N° 1 Valores de ensayo para curva característica.

Con estos valores ya se está en condiciones de confeccionar la curva característica de la bomba Caudal v/s Presión, la cual se muestra a continuación:

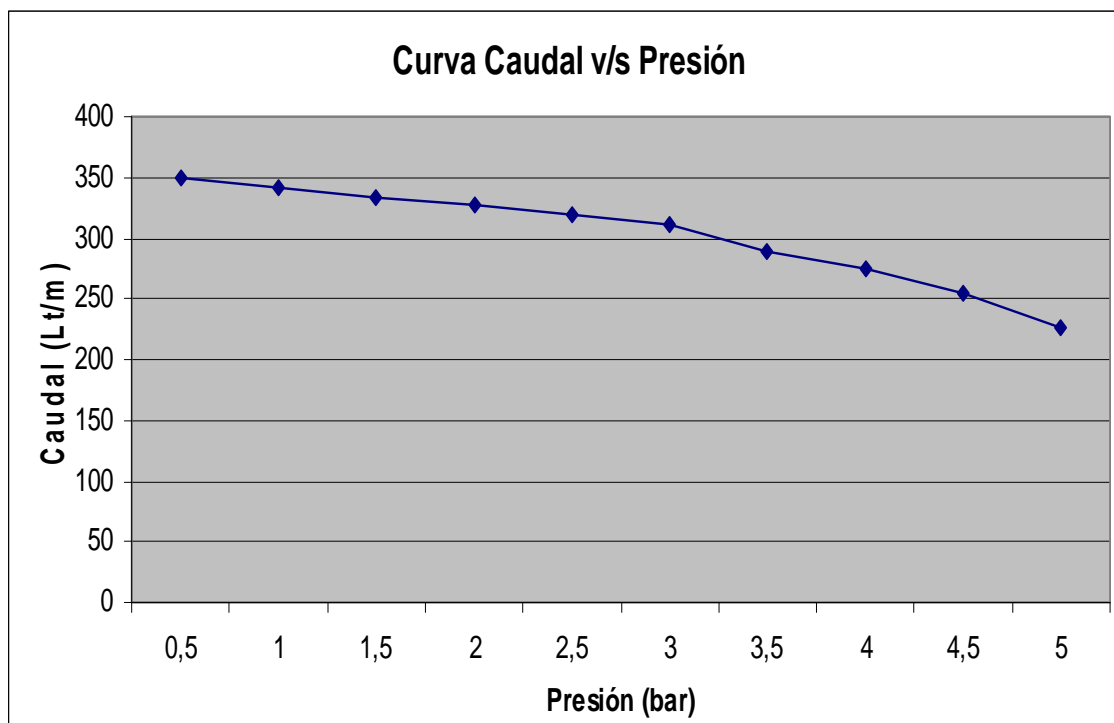


Gráfico N° 1 Curva característica bomba.

Obtenida la curva característica, se selecciona un punto de funcionamiento para las pruebas de la bomba-turbina, el punto de funcionamiento seleccionado es el de 3 [bar], que equivale a 30 [mca], y por la Tabla N° 1 se tiene que el caudal para ese punto de funcionamiento es de 311,4 [lt/min].

Con las características hidráulicas del sistema, se comienza a seleccionar la bomba a utilizar como turbina.

CAPITULO III: ENSAYO DE BOMBA COMO TURBINA.

III.1. Selección de bomba a ensayar como turbina.

La empresa VOGT S.A. fue quien facilitó la bomba a ensayar como turbina.

Para la selección de la bomba, se consideraron 2 ítems, que son el tipo de bomba y la capacidad de la bomba.

III.1.a) Tipo de bomba.

Para la selección del tipo de bomba, se consideró los resultados obtenidos en la referencia bibliográfica [1], en donde sus mejores resultados fueron obtenidos con una bomba centrífuga de álabe cerrado.

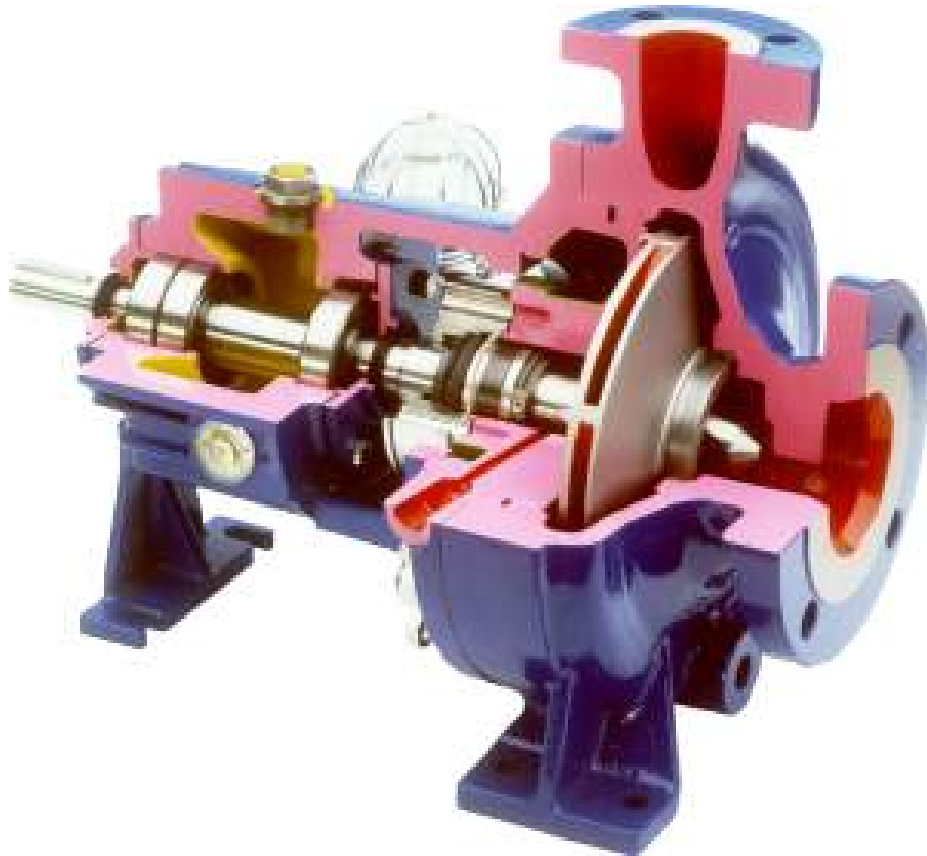


Figura N° 6 Tipo de bomba y alabe a utilizar.

III.1.b) Capacidad de bomba.

Para saber la capacidad de bomba que se debía utilizar según las características del laboratorio, se consultó a Don Jaime Espinoza Silva, Profesor de la Universidad Técnica Federico Santa María, quien posee conocimiento en el desarrollo de Minicentrales Hidroeléctricas a través de bombas, quien recomienda utilizar una bomba un 30% a 50% más pequeña del caudal que se dispone (entre 217 y 155 [lt/min]) y con la misma presión que se cuenta, es decir, a 30 [mca].

La bomba seleccionada es marca Vogt, serie H, modelo 610, sus características principales son:

- Altura de elevación : 28.5 [m]
- Caudal : 255 [lt/mim]
- Rendimiento óptimo : 63 %

La bomba seleccionada es de más caudal del que se requiere, esto para tener un rango más amplio de ensayos.

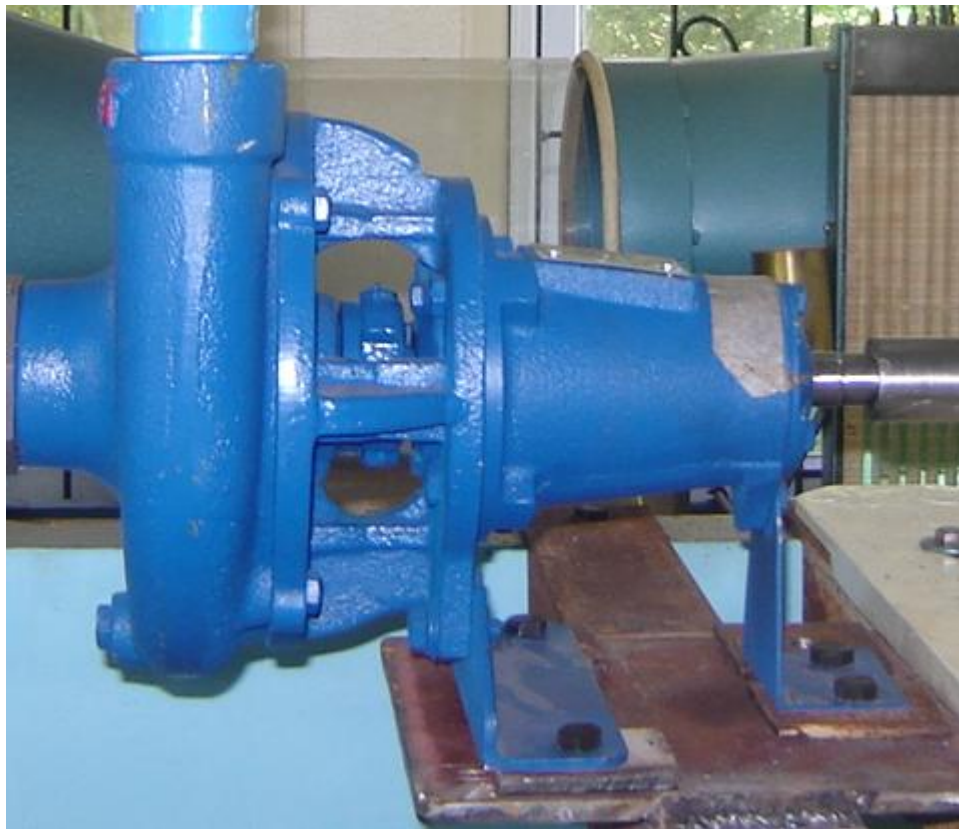


Figura N° 7 Bomba a ensayar como turbina.

III.2 Ensayo de bomba como turbina.

Éste ensayo consiste en simular una caída de agua constante a distintos caudales, para de ésta forma con el freno prony, frenar el eje de la bomba y medir la fuerza que ésta es capaz de generar y así calcular la potencia que se obtiene y el rendimiento que es capaz de generar la bomba funcionando como turbina.

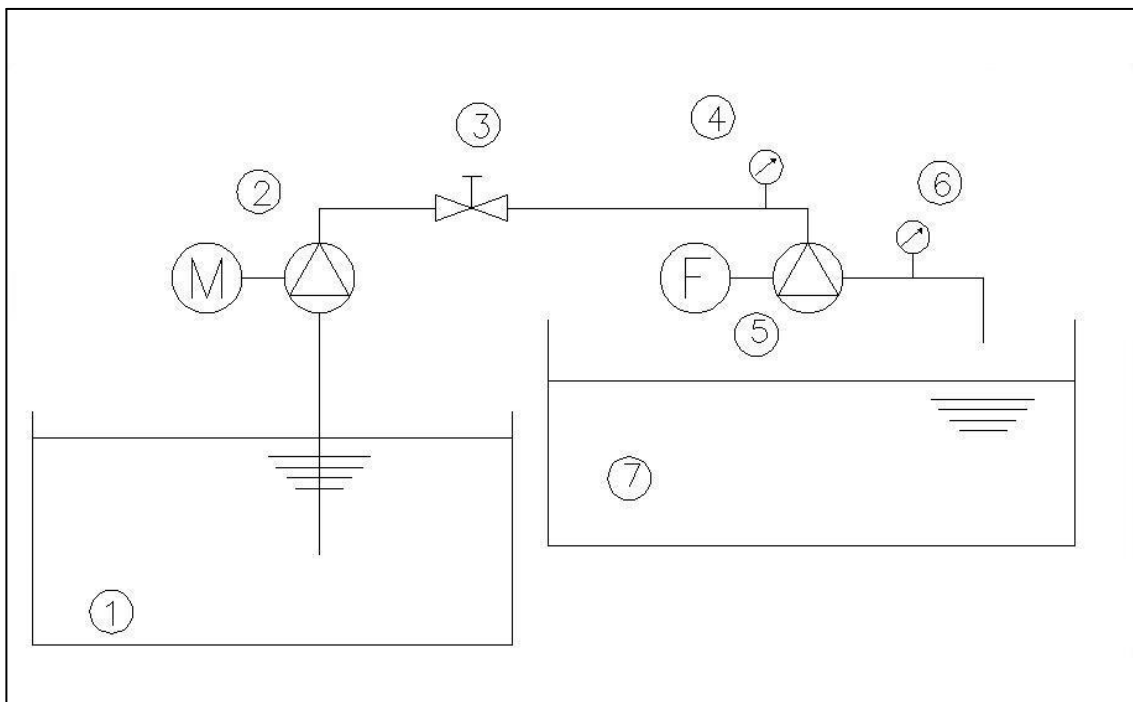


Figura N° 8 Esquema de instalación de equipos para ensayos.

En la Figura N° 8 se muestra el esquema planteado para el ensayo de la bomba como turbina, el cual cuenta con las siguientes partes:

- **Depósito de agua:** de aquí la bomba impulsora sacará el agua para alimentar a la bomba como turbina.

- **Bomba encargada de entregar presión al sistema:** ésta bomba impulsora, mencionada anteriormente, será la encargada de entregar la presión al banco de ensayo. En la succión de la bomba se instaló una válvula uniflujo, para mantener siempre el sistema con agua.
- **Válvula de regulación de caudal:** ésta es una válvula de compuerta de bronce de 2 [pulg.], ésta será la encargada de variar el caudal de entrada a la bomba a ensayar como turbina, esto se logra abriendo o cerrando la válvula.
- **Manómetro de entrada:** éste manómetro se encuentra a la entrada de la bomba como turbina (salida de bomba), éste indicará la presión a la entrada de la bomba. El manómetro contiene glicerina en su interior, para mantener lo más constante la medición de presión del agua.
- **Bomba a ensayar como turbina:** ésta bomba, cuya descripción está mencionada anteriormente, será la que se ensayará como turbina, a la cual en su eje se acopló una pieza para lograr conectar el freno prony, el cual entregará la fuerza disponible en el eje.
- **Manómetro en U de agua (salida):** éste es un manómetro de columna de agua en U, el cual indicará la presión a la salida de la bomba-turbina, sea positiva o negativa.
- **Vertedero rectangular:** aquí es en donde la bomba descargará el agua y éste a su vez devolverá el agua al depósito principal, y por medio de esta, completar el circuito de agua. El vertedero se instaló para poder medir el caudal que esta pasando por la bomba-turbina.



Figura N° 9 Laboratorio de ensayo bomba-turbina.



Figura N° 10 Bomba a ensayar como turbina montada para experimento.

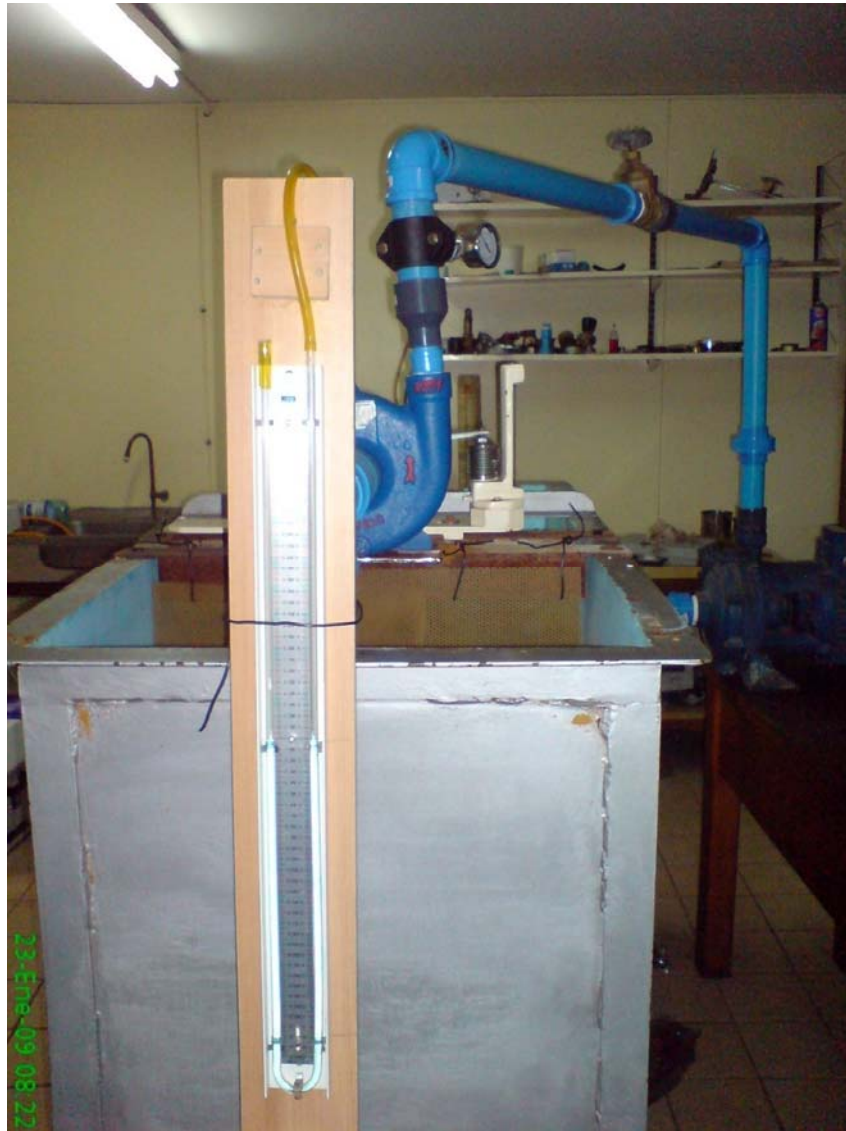


Figura N° 11 Manómetro de columna utilizado en ensayo bomba-turbina.

Para hacer todas las conexiones entre la bomba impulsora y la bomba-turbina, se utilizó PVC Hidráulico, debido a que es sencillo pegar las tuberías y conexiones, y por lo bien que trabaja con presión.

El ensayo realizado consta del siguiente método, se hizo funcionar la bomba impulsora y se abrió la válvula hasta que el manómetro a la entrada de la bomba-turbina indicó los 0.5 [bar], que equivale a 5 [mca], y se tomó registro

de la velocidad a la que gira el eje, la fuerza que indique el freno prony, la presión de salida y la altura en la regla del vertedero para el cálculo del caudal.

Si todo sale bien y el eje de la bomba-turbina gira, se aumentará la apertura de la válvula y se apretará el freno hasta que el manómetro a la entrada de la bomba-turbina vuelva a marcar los 0.5 [bar] y así sucesivamente hasta que ya el apriete del freno no deje girar más el eje de la bomba.

Este ensayo se realizó cada 0.5 [bar], hasta una presión máxima de 3.5 [bar], ya que según las indicaciones del fabricante, se recomienda no superar en un 15% la presión nominal de la bomba, para evitar que los sellos revienten.

Los resultados del ensayo se encuentran descritos en el siguiente capítulo.

CAPITULO IV: RESULTADOS DEL ENSAYO DE BOMBA COMO TURBINA.

IV.1. Datos obtenidos del ensayo.

Realizados los ensayos a la bomba funcionando como turbina, los datos que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla resultados para 0.5 [bar]

Nº	RPM	Fuerza [N]	Presión salida [mmca]	h [mm]
1	1235	0	-140	24
2	1180	0,5	-143	25
3	1130	1	-149	27
4	650	2	-122	29

Tabla Nº 2 Resultados para presión de 0.5 [bar].

Tabla resultados para 1.0 [bar]

Nº	RPM	Fuerza [N]	Presión salida [mm.c.a]	h [mm]
1	1570	0	-115	25
2	1460	1	-150	29
3	1445	2	-153	31
4	1410	2,5	-149	34
5	1335	3	-130	35
6	1080	3,5	-125	36
7	220	4	-65	36

Tabla Nº 3 Resultados para presión de 1.0 [bar].

Tabla resultados para 1.5 [bar]

Nº	RPM	Fuerza [N]	Presión salida [mm.c.a]	h [mm]
1	1950	0	-102	29
2	1830	1,5	-140	35
3	1780	2,5	-148	38
4	1735	3,5	-130	40
5	1535	4,5	-83	42
6	1475	5,5	-75	43
7	995	6,5	-68	44
8	585	7	-28	45

Tabla Nº 4 Resultados para presión de 1.5 [bar].

Tabla resultados para 2.0 [bar]

Nº	RPM	Fuerza [N]	Presión salida [mm.c.a]	h [mm]
1	2220	0	-54	34
2	2170	1,5	-95	37
3	2090	2,5	-108	39
4	1995	4	-136	42
5	1820	6	-68	45
6	1310	6,5	-54	47
7	1050	7	27	48
8	720	8	40	59

Tabla Nº 5 Resultados para presión de 2.0 [bar].

Tabla resultados para 2.5 [bar]

Nº	RPM	Fuerza [N]	Presión salida [mm.c.a]	h [mm]
1	2320	0	-27	34
2	2270	3,5	-68	42
3	2170	4	-108	44
4	2130	5,5	-108	48
5	1245	8	-40	51
6	970	9,5	140	52
7	700	11	149	54

Tabla Nº 6 Resultados para presión de 2.5 [bar].

Como primer resultado, cabe mencionar que la bomba comienza a girar a una presión de 4 [bar] y a un caudal de 66 [lt/min], también se pudo verificar que el sentido de giro de la bomba-turbina es inverso al sentido de giro al estar funcionando como bomba, es decir, en sentido horario.

IV.2 Análisis de los datos.

Para poder visualizar el funcionamiento de la bomba-turbina, es necesario realizar ciertos cálculos, ya que de esta forma se podrá comprobar de qué forma se comporta una bomba funcionando como turbina.

Lo primero que se hace necesario es calcular la energía disponible a la entrada de la bomba-turbina, ver Anexo 4.

Con el dato de la energía a la entrada de la bomba ya claro, se hace necesario conocer la energía que es capaz de captar la bomba-turbina proveniente del fluido, esto se logra calculando la energía que entrega la bomba-turbina en su eje, ver Anexo 5.

Todo esto para determinar el rendimiento de la bomba-turbina, el cual viene dado por:

$$\eta = \frac{E_E}{E_S} \quad (1)$$

- E_E = Energía disponible a la entrada de la bomba-turbina.
- E_S = Energía que entrega la bomba-turbina, medida en su eje.

A continuación, se muestran las tablas de análisis de los datos obtenidos en el ensayo realizado a la bomba-turbina:

Tabla de análisis para 0.5 [bar]

Caudal [lt/min]	Potencia Entrada [W]	RPM	Vel. Angular [rad/s]	Fuerza [N]	Torque [N/m]	Potencia [W]	Rendimiento
84	70,90	1235	129,26	0	0,000	0,00	0,00%
90	74,91	1180	123,51	0,5	0,082	10,07	13,44%
102	83,14	1130	118,27	1	0,163	19,28	23,19%
114	91,65	650	68,03	2	0,326	22,18	24,20%

Tabla N° 7 Análisis de resultados a 0.5 [bar].

Tabla de análisis para 1.0 [bar]

Caudal [lt/min]	Potencia Entrada [W]	RPM	Vel. Angular [rad/s]	Fuerza [N]	Torque [N/m]	Potencia [W]	Rendimiento
90	149,82	1570	164,33	0	0,000	0,00	0,00%
114	183,30	1460	152,81	1	0,163	24,91	13,59%
120	200,86	1445	151,24	2	0,326	49,31	24,55%
138	228,17	1410	147,58	2,5	0,408	60,14	26,36%
144	237,53	1335	139,73	3	0,489	68,33	28,77%
150	247,01	1080	113,04	3,5	0,571	64,49	26,11%
150	247,01	220	23,03	4	0,652	15,01	6,08%

Tabla N° 8 Análisis de resultados a 1.0 [bar].

Tabla de análisis para 1.5 [bar]

Caudal [lt/min]	Potencia Entrada [W]	RPM	Vel. Angular [rad/s]	Fuerza [N]	Torque [N/m]	Potencia [W]	Rendimiento
114	274,96	1950	204,10	0	0,000	0,00	0,00%
144	356,29	1830	191,54	1,5	0,245	46,83	13,14%
162	399,51	1780	186,31	2,5	0,408	75,92	19,00%
174	429,24	1735	181,60	3,5	0,571	103,60	24,14%
186	459,68	1535	160,66	4,5	0,734	117,85	25,64%
192	475,16	1475	154,38	5,5	0,897	138,40	29,13%
198	490,82	995	104,14	6,5	1,060	110,34	22,48%
204	506,64	585	61,23	7	1,141	69,86	13,79%

Tabla N° 9 Análisis de resultados a 1.5 [bar].

Tabla de análisis para 2.0 [bar]

Caudal [lt/min]	Potencia Entrada [W]	RPM	Vel. Angular [rad/s]	Fuerza [N]	Torque [N/m]	Potencia [W]	Rendimiento
138	456,34	2220	232,36	0	0,000	0,00	0,00%
156	513,23	2170	227,13	1,5	0,245	55,53	10,82%
168	552,38	2090	218,75	2,5	0,408	89,14	16,14%
186	612,91	1995	208,81	4	0,652	136,14	22,21%
204	675,53	1820	190,49	6	0,978	186,30	27,58%
222	718,41	1310	137,11	6,5	1,060	145,27	20,22%
228	740,19	1050	109,90	7	1,141	125,40	16,94%
306	994,00	720	75,36	8	1,304	98,27	9,89%

Tabla N° 10 Análisis de resultados a 2.0 [bar].

Tabla de análisis para 2.5 [bar]

Caudal [lt/min]	Potencia Entrada [W]	RPM	Vel. Angular [rad/s]	Fuerza [N]	Torque [N/m]	Potencia [W]	Rendimiento
138	570,42	2320	242,83	0	0,000	0,00	0,00%
186	766,13	2270	237,59	3,5	0,571	135,55	17,69%
198	818,03	2170	227,13	4	0,652	148,09	18,10%
228	925,24	2130	222,94	5,5	0,897	199,87	21,60%
246	1008,56	1245	130,31	8	1,304	169,92	16,85%
252	1036,87	970	101,53	9,5	1,549	157,21	15,16%
270	1094,31	700	73,27	11	1,793	131,37	12,00%

Tabla Nº 11 Análisis de resultados a 2.5 [bar].

A continuación se muestra el gráfico de potencia obtenida a distintos caudales para diferentes alturas de salto.

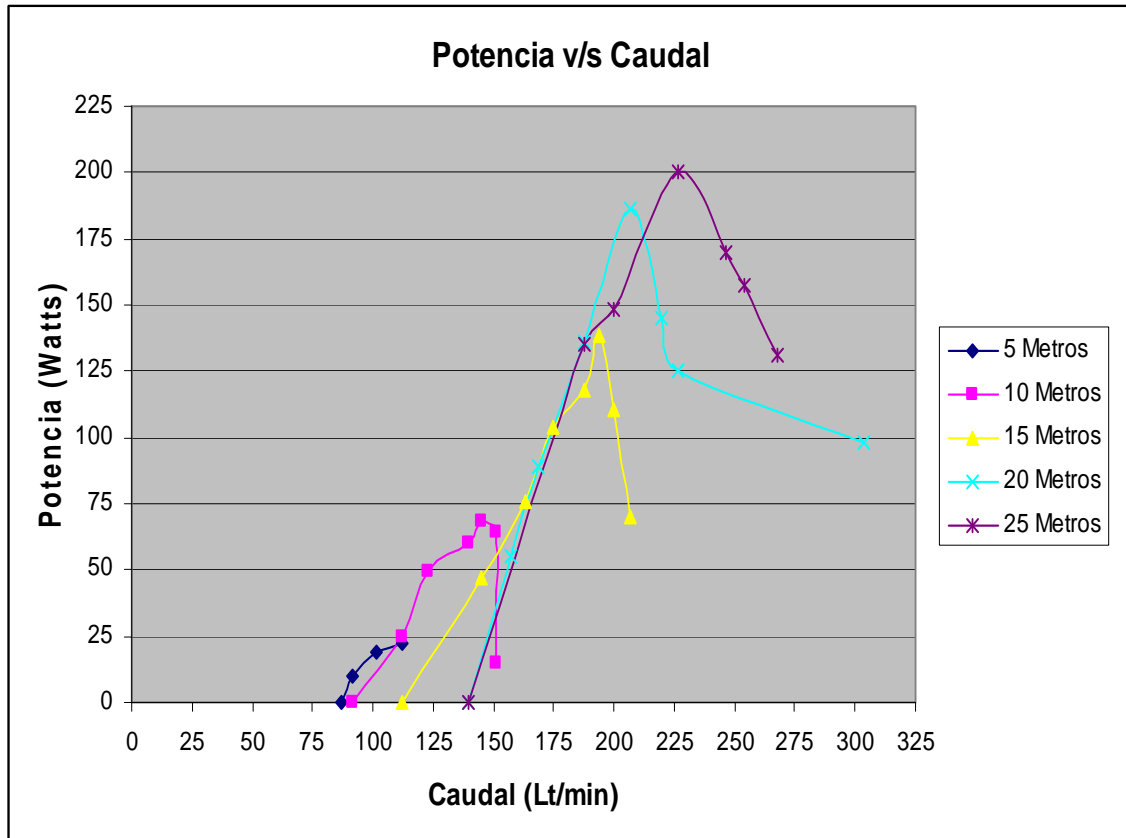


Gráfico N° 2 Curva Potencia v/s Caudal para distintos saltos.

Como se aprecia en el gráfico anterior, la bomba-turbina se comportó de la misma forma que lo hace una turbina.

Esto por que cada curva de potencia comienza desde la potencia de 0 [W] con un caudal mínimo, para luego ir en aumento la potencia a medida que aumenta el caudal, hasta llegar a un máximo de potencia, para luego caer nuevamente.

Las potencias máximas por cada altura de agua se muestran en el siguiente cuadro resumen:

Altura [m]	Potencia [W]	Caudal [lt/min]
5	22,2	114
10	68,3	144
15	138,4	192
20	186,3	204
25	199,9	228

Tabla Nº 12 Máximas potencias por cada salto.

Como se puede ver en el Gráfico Nº 2 y en la Tabla Nº 12, la potencia máxima se obtuvo a la altura de 25 [m].

Es así como, a medida que se aumenta la altura de caída de agua, también aumenta la potencia entregada por la bomba-turbina, esto por que aumenta la energía potencial del agua, es decir, la potencia a la entrada de la bomba. Lo mismo no se puede decir, del rendimiento, ya que el máximo rendimiento no se obtuvo al máximo caudal al cual se ensayó la bomba (Tabla Nº 13).ó

A continuación se muestra el gráfico de rendimiento obtenido para los distintos saltos:

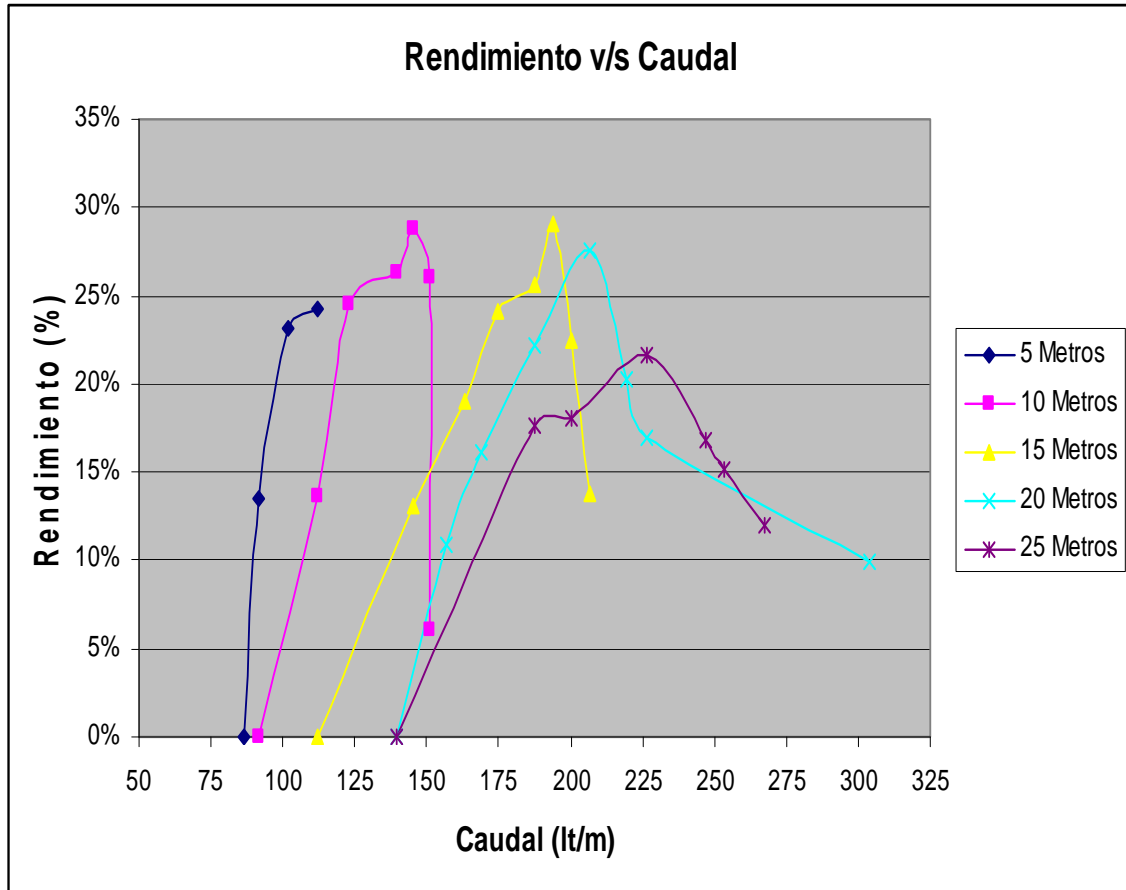


Gráfico N° 3 Curva Rendimiento v/s Caudal.

Como se puede ver en el Gráfico N° 3, los máximos rendimientos se alcanzaron en los puntos en donde la potencia también es máxima, para cada salto que se ensayo la bomba-turbina.

Los rendimientos máximos para cada salto, se muestran en la siguiente tabla:

Altura [m]	Rendimiento [%]	Caudal [lt/s]
5	24,2%	114
10	28,8%	144
15	29,1%	192
20	27,6%	204
25	21,6%	228

Tabla N° 13 Máximos rendimientos por cada salto.

El máximo rendimiento se obtuvo a los 15 [m], siendo éste de 29%, por el contrario, el menor rendimiento de la bomba-turbina se obtuvo a los 25 [m], que es en donde se alcanzó la mayor potencia.

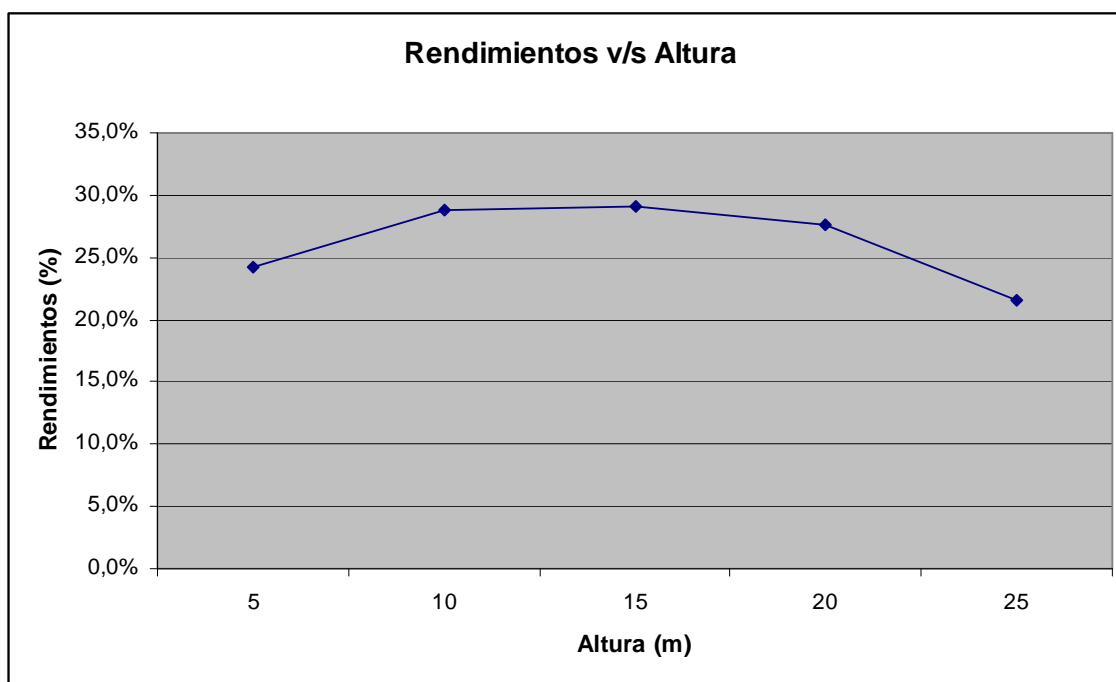


Gráfico N° 4 Máximos rendimientos por altura.

Como se pudo apreciar, sólo se ensayó la bomba como turbina hasta una presión de 2,5 [bar] (25 metros), debido a que al tratar de superar esta presión, el freno comenzaba a vibrar sobre el acoplamiento, lo que hacía que la bomba también comenzara a vibrar. Esta vibración producía que el sistema se volviera inestable y que no se pudiese lograr regular la presión a la entrada de la bomba, ya que la velocidad de giro era muy irregular.

CONCLUSIONES

Como se pudo comprobar, una bomba centrífuga de álabe cerrado es técnicamente factible utilizarla como turbina. Esto por que al hacer que entre agua por la salida de la bomba, esta gira, pero en su sentido inverso, es decir, en sentido horario y es capaz de generar las suficientes RPM y torque en su eje.

La inercia de la bomba se venció a una presión de 4 [bar] y a un caudal de 66 [lt/min], en este punto es en donde la bomba comienza a girar en su sentido inverso y a trabajar como turbina.

Si se analizan los 5 rendimientos máximos obtenidos en las distintas alturas ensayadas, se puede ver que estos comienzan a crecer, hasta llegar a un punto de inflexión, en donde se obtiene el máximo rendimiento de la bomba-turbina, para luego comenzar a decrecer (gráfico N° 3). El punto de máximo rendimiento de la bomba-turbina se obtuvo a los 15 [m] de altura y a un caudal de 192 [lt/min], llegando éste a un 29 % de rendimiento. El menor rendimiento se obtuvo a la máxima altura ensayada, esto fue a los 25 [m] de altura y a un caudal de 226 [lt/min], obteniéndose un rendimiento de 21 %.

Considerando que una bomba es una máquina destinada a entregar energía a los fluidos, su comportamiento como turbina es bastante óptimo, esto debido a que a los resultados obtenidos se alcanzaron rendimientos cercanos al 30 %, sin hacer ningún tipo de modificación a la bomba.

Cabe destacar, que si bien, las turbinas tienen un dispositivo de regulación de caudal, las bombas no lo poseen, por lo cual para su funcionamiento es sumamente necesario que el caudal sea constante, o bien, utilizar un dispositivo que cumpla esta función, como lo es una válvula.

También se debe tener en consideración no superar la presión nominal de la bomba, para así evitar la rotura de los sellos internos de la bomba, evitando pérdidas de presión en el interior de la bomba, producto de fugas.

Además, es importante mencionar la ventaja comparativa que tiene una bomba como turbina, frente a una turbina propiamente tal, que es la simplicidad de su uso e instalación, el precio, el costo de mantención y la capacidad de adquisición de este producto y sus repuestos en el mercado nacional.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A Llamas. B Treviño. J. L. López. Plantas mini hidroeléctricas con bombas centrífugas y motores de inducción. Centro de estudios de energía - ITESM, Campus Monterrey Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey I.P.D. Disponible en:
<http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/enovables/GEN-09.pdf>
- [2] A. N. Carvalho, F. J. Horta. Bombas de Fluxo Operando Como Turbinas. Procedimento de Seleção. Curso de Engenharia Hídrica. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Disponible en :
<http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/AGRENER2002/pdf/0098.pdf>
- [3] C. Mataix. 1986. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2 Edición. Madrid, España. Ediciones del Castillo S.A.
- [4] O Audisio, Bombas Utilizadas Como Turbinas. Laboratorio de Máquinas Hidráulicas (LA.M.HI.). Universidad Nacional del Comahue. Disponible en:
<http://fain.uncoma.edu.ar/centraleshidraulicas/archivos/PCH-BOMBAS%20COMO%20TURBINAS.PDF>
- [5] R. Carlos, L. Balarim, J. Targa, A. Virgens, G. Wiecheteck (2004). Custo de Bombas Centrífugas Funcionando Como Turbinas em Microcentrais Hidrelétricas. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.24, n.1, p.219-225, jan./abr. 200. Disponible en:
<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v24n1/v24n01a25.pdf>

- [6] R López. , F Morato, R Percy, J Nascimento e C Barreira. O Uso de BFT'S acionando geradores de indução como solução de baixo custo e eficiência no que se refere a micro e mine centrais hidrelétricas. Centro de pesquisas em Hidráulia e Recursos Hídricos. Disponible en:
<http://www.cph.eng.ufmg.br/docscph/matevento39.pdf>
- [7] R Lopez. F Morato, R Percy, J Nascimento e C Barreira. Um estudo sobre o uso de BFT'S em potenciassis residuais. Centro de pesquisas em Hidráulia e Recursos Hídricos. Disponible en:
<http://www.cph.eng.ufmg.br/docscph/matevento40.pdf>
- [8] R. Ortiz Flórez, J. A. Abella Jiménez. Máquinas Hidráulicas Reversibles Aplicadas a Micro Centrales Hidroeléctricas. Revista IEEE América Latina, Vol. 6, NO. 2, Junio 2008. Disponible en:
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol6/vol6issue2June2008/6TLA2_07OrtizFlorezROF.pdf
- [9] www.ine.cl

ANEXOS

ANEXO 1**Características bomba**

- Marca : Regio
- Modelo : KB 750
- Caudal : 100 – 50 [lt/min]
- Altura : 74 – 36 [m]
- Potencia motor : 7.5 HP – 5.5 KW
- Velocidad : 2900
- Diámetro de succión : 2 ½ [pulg]
- Diámetro de descarga : 1 ¼ [pulg]

ANEXO 2

Cálculo de caudal por medio de vertedero con contracción.

El cálculo del caudal por vertedero rectangular se utiliza la siguiente expresión:

$$Q = Cq \frac{2}{3} b h \sqrt{2gh} \quad (2)$$

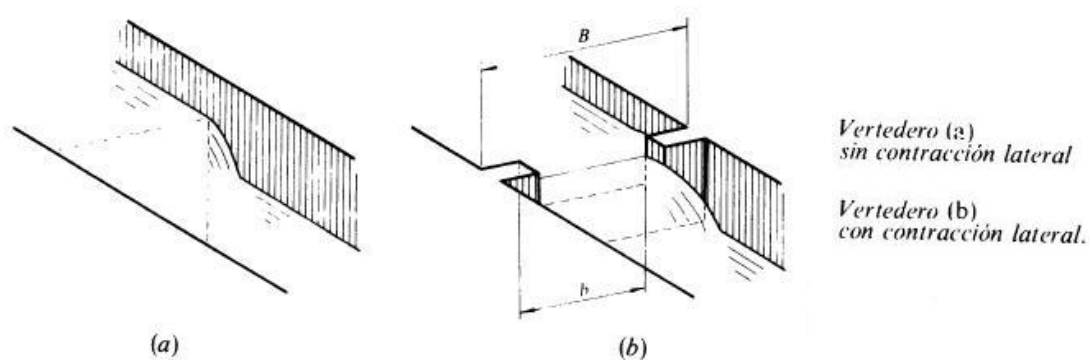


Figura N° 12 Tipos de vertederos rectangulares.

En donde Cq es un factor adimensional, que varia entre 0,64 y 0,79, que para este caso que se trata de un vertedero con contracción lateral el Cq se calcula con la siguiente expresión:

$$Cq = \left[0,578 + 0,037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3,615 - 3 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{h + 1,6} \right] \left[1 + 0,5 \left(\frac{b}{B} \right) \left(\frac{h}{h + Z_c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

En la cual las longitudes tienen que estar en milímetros.

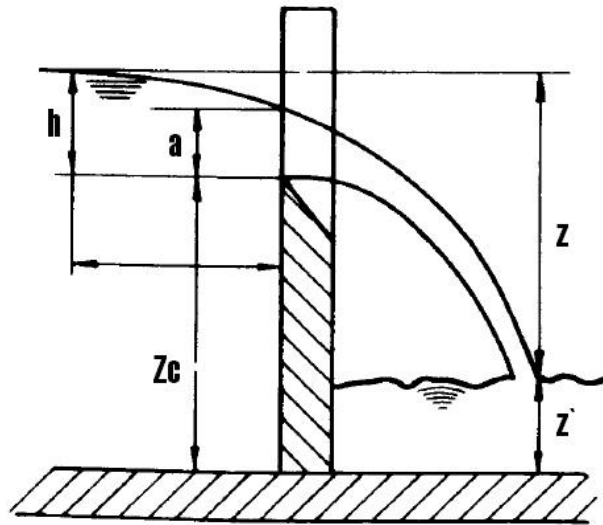


Figura N° 13 Variables de un vertedero

En donde:

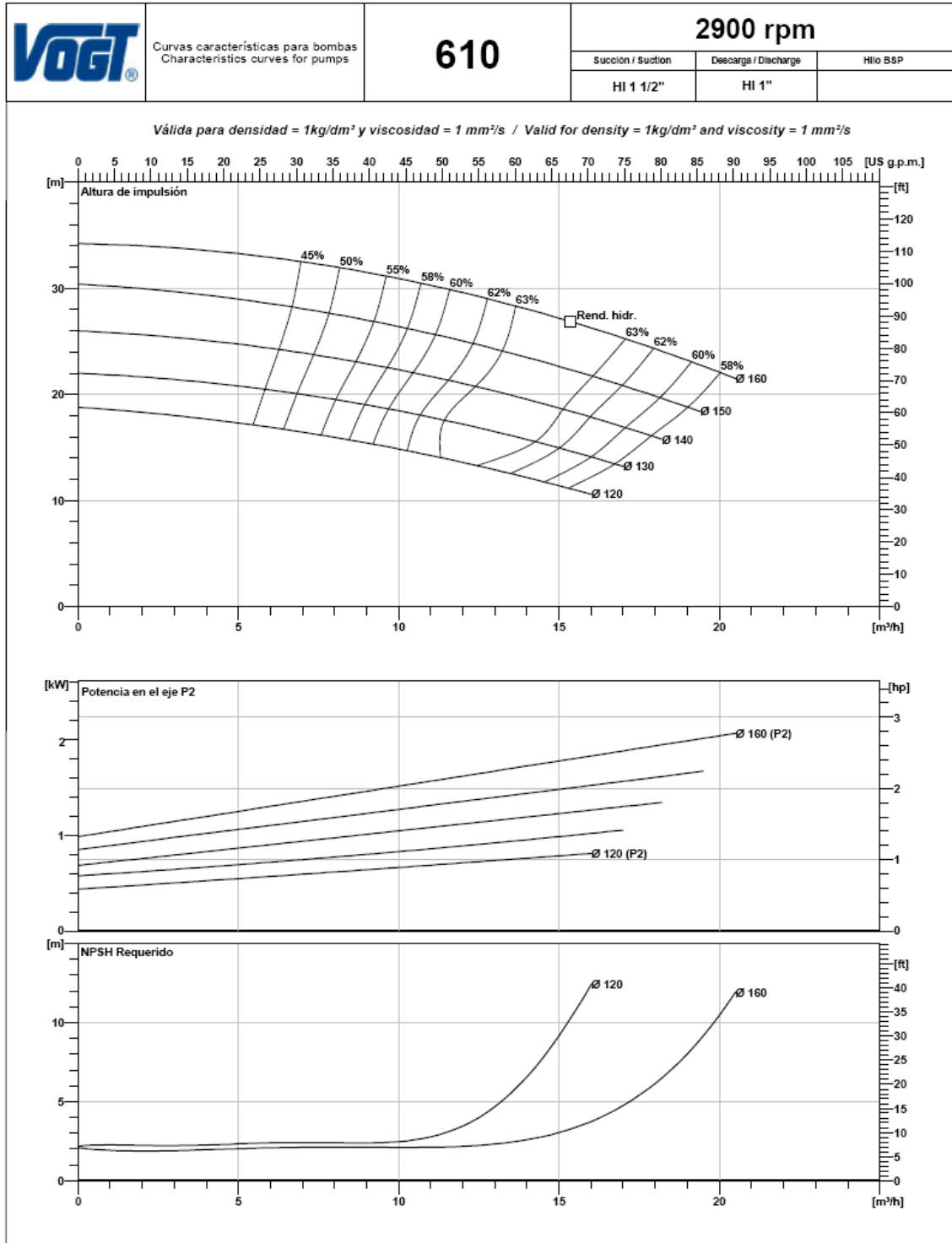
- B** : es el ancho máximo de vertedero.
- b** : es el ancho de la contracción.
- Z_c** : es la altura entre el fondo del vertedero y la boca de la contracción del vertedero.
- h** : es la altura del agua que sale por el vertedero.

Para las condiciones del vertedero, las constantes tienen los siguientes valores:

- B** : 602 [mm]
- b** : 261 [mm]
- Z_c** : 224[mm]

ANEXO 3

Curvas características de bomba ensayada como turbina.



ANEXO 4

Cálculo de energía a la entrada de la bomba-turbina.

Para calcular la energía que existe a la entrada de la bomba-turbina, se hace a través de la siguiente formula:

$$P = Q * \rho * g * H \quad (4)$$

En donde:

- Q = caudal que entra a la bomba bomba-turbina en $[m^3/s]$.
- ρ = densidad del agua $[kg/m^3]$
- g = fuerza gravitatoria $[m/s^2]$.
- H = altura neta o salto, que en esta caso es la presión a la entrada de la bomba en $[m]$.

Así con esta formula se obtiene la potencia en kilowatts $[kw]$, disponible a la entrada de la bomba.

ANEXO 5

Cálculo de energía disponible en el eje de la bomba-turbina.

Para conocer la energía que se obtiene de la bomba-turbina, es necesario conocer la energía que esta es capaz de captar del agua, esto se hace calculando la energía disponible en su eje.

La potencia en el eje de la bomba se calcula con la siguiente formula:

$$P = \omega * \tau \quad (5)$$

En donde

- ω = velocidad angular del eje en [rad/s], la cual se calcula de la siguiente forma:

$$\omega = \frac{RPM * 2 * \pi}{60} \quad (6)$$

- τ = torque en el eje en [N/m],

Para calcular el torque en el eje, se instalo un freno, el cual tiene un brazo el que aplica presión sobre un indicador de fuerza, este señala la fuerza que se esta generando en un nivel de mercurio.

$$\tau = F * b \quad (7)$$

Como se muestra en la ecuación anterior, el torque es el producto de una fuerza por un brazo, para este caso el brazo mide 163 [cm], ya con estos datos se puede calcular el torque en el eje de la bomba-turbina.

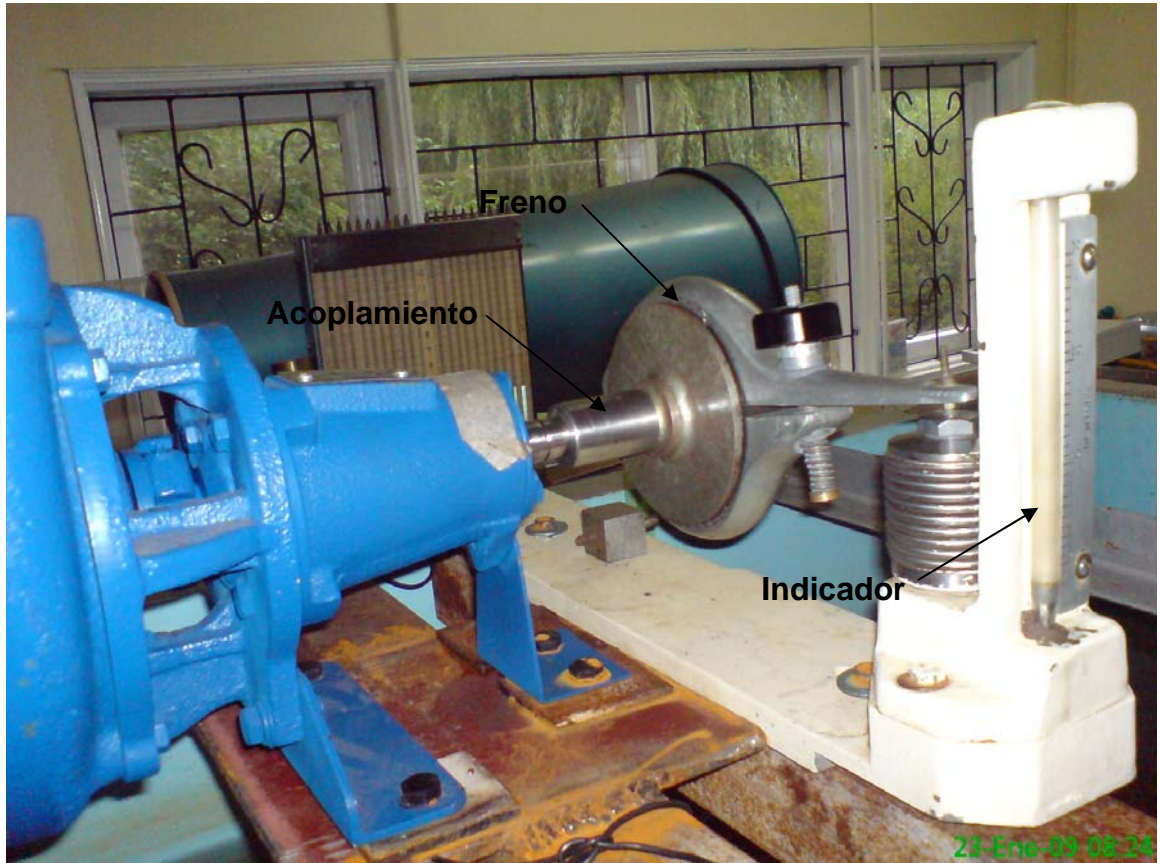


Figura N° 14 Indicador de Fuerza (Freno Prony).

ANEXO 6

Instrumentación.

Para la validación experimental de resultados obtenidos en los ensayos se contó con los siguientes instrumentos.

- **Tacómetro**

Marca : Extech Instruments.
Rango : 0 – 10000 [rpm]
Resolución : 0,1 [rpm]

- **Manómetro**

Marca : Koslan
Rango : 0 – 6 [bar]
Resolución : 0,1 [bar]

- **Manómetro de columna de agua**

Marca : Veto
Rango : -30 – 30 [mmca]
Resolución : 1 [mm]

- **Freno Prony**

Rango : 0 – 30 [N]
Resolución : 1 [N]