



JIDeTEV
Jornadas de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UNA BOMBA CENTRIFUGA OPERANDO COMO TURBINA HIDRAULICA DE PEQUEÑA POTENCIA¹

Mg. Ing. Orlando A. AUDISIO²; Mariano Nicolás ROSSI³; Paul ALONSO³; Victor H. KURTZ⁴

^{2,3}Universidad Nacional del Comahue (UNCo) -

Dpto. de Mecánica Aplicada – Laboratorio de Máquinas Hidráulicas (LA.M.HI) Calle Buenos Aires 1400 –
(8300) Neuquén Capital – Patagonia Argentina

⁴U.Na.M - Fac. de Ing. Oberá Misiones

¹ Trabajo Final de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Univ. Nac. del Comahue (UNCo) desarrollado por los Alumnos Sr. M.N. Rossi y Sr. P. Alonso, bajo la dirección y Tutoría de Mg. Ing. O. A. AUDISIO vinculado al Proyecto de Investigación, Código 04/I229 U.N.Co. y 16/I142 U.Na.M

² Director y Tutor de Proyecto, orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar

³ Alumnos Tesistas del Proyecto, nanorossi74@hotmail.com alonsopaul89@hotmail.com

Resumen

El comportamiento fluidodinámico de una bomba centrífuga operando en sentido reverso cambia de manera apreciable, principalmente en lo inherente a sus pérdidas hidráulicas localizadas y distribuidas, como así también en cuanto a los perfiles de velocidades y presiones en puntos homólogos. Con estas consideraciones, resulta difícil poder inferir su comportamiento o performance en el modo turbina.

El presente trabajo es de índole experimental y desarrolla la caracterización funcional de una bomba centrífuga de tipo radial operando en sentido reverso como turbina hidráulica (BUTUs¹). Se exponen las curvas características de las máquinas hidráulica estudiada en el modo turbina con variación de parámetros operativos tales como velocidades de rotación, alturas, caudales. Con estos parámetros obtenidos en forma experimental, se hacen las comparativas y/o conclusiones que permita observar la influencia de los mismos sobre la performance de las BUTUs. Además se identifican y obtienen distintas curvas funcionales a salto constante, como así también, se hace una evaluación sobre las características que tiende a inferir el comportamiento en modo turbina a partir de parámetros del modo bomba.

Palabras Clave: *Turbinas Hidráulicas – BUTUs – Energía Hidráulica -*

¹ BUTUs: Bomba Utilizada como Turbinas.

Introducción

El funcionamiento en modo inverso de las turbomáquinas hidráulicas ha sido motivo de estudio por parte de destacados científicos en distintas épocas del siglo XX y del que estamos transitando. Sin embargo e inherente a la generación de energía eléctrica, lo que en otros tiempos constituía un ejercicio académico, cuando no una curiosidad, hoy ha cobrado especial interés como consecuencia de condicionantes ambientales, socioeconómicos y técnicas de recientes aparición.

En cuanto a aspectos técnicos y socioeconómicos, es de destacar el renovado interés por el aprovechamiento de los pequeños saltos y cauces hidráulicos en donde los costos que incurre el equipamiento hidromecánico, representa un porcentaje muy importante de la inversión total. En pequeñas y muy pequeñas centrales hidráulicas (menores a 100 kW) merece consideración la posibilidad de emplazar bombas centrifugas utilizadas como turbinas hidráulicas (BUTUs), pues a costa de la reducción del rendimiento global, se logra una relevante reducción de la inversión de maquinaria del orden de diez a uno y en ciertos casos muy particulares, se llega incluso, a más.

Estas aplicaciones son aún más interesantes gracias a los avances producidos en la tecnología de control y regulación de máquinas eléctricas, que permiten la regulación de accionamientos con velocidad, sentido de rotación y sentido de par; variables tanto en corriente continua como en alterna en su tipo monofásico y trifásico.

En base a lo expuesto es que se considera relevante la determinación de las características de la bombas centrifugas operando como turbinas. Para ello se ha diseñado, construido y caracterizado una banco de ensayos adecuado a tal fin, consistente básicamente en un circuito de tipo abierto conformado por una estación de bombeo de dos unidades que proporciona el salto y caudal requerido en el ensayo, y un depósito abierto que se utiliza también, para regulación. La bomba objeto de estudio es a eje libre y esta acoplada a un dinamómetro tipo “Corrientes parasitas o de Foucault”.

Así y previa calibración de todo el equipamiento e instrumentación (tacómetros, celda de carga, manómetros de columna, caudalímetros, etc.) se han obtenido las curvas características en el modo turbinas lo que permite hacer el estudio y/o la comparativa con las curvas en el modo bomba aportada por el fabricante de la misma. Así, se comparan los resultados con los estimados a partir de expresiones de comportamientos publicadas por diversos investigadores, lo que permite hacer una justificación de las diferencias existentes a través de la utilización de los parámetros fluidos dinámicos y geométricos. También se han determinados las curvas características a salto constante que permite la selección de turbinas y otros parámetros relevantes para este tipo de uso.

Funcionamiento en Modo Reverso.

El principal problema y el mayor desafío en la tecnología vinculada a las BUTUs está en la selección de la bomba más adecuada y disponible en el mercado para satisfacer una aplicación determinada como turbina. La selección presenta condiciones de bordes de entrada (*altura*), y de salidas (*caudal*), a las que se suman las condiciones que se asume para la carga mínima y de velocidad de rotación. Al haber tantos fabricantes de bombas y diseños no estandarizados, la selección de BUTUs presenta dificultades que en muchos casos hace desistir de esta opción.

Para reducir los impactos de una mala selección es necesario poner énfasis en el desarrollo de modelos (punto de vista científico), y técnica de aplicación con contrastación experimental. Un aspecto importante está relacionado con investigaciones que se hicieron vinculadas a las BUTUs; estas hacen énfasis en predecir condiciones para el punto de mejor rendimiento. Si se tiene la posibilidad de disponer de todas las características de la BUTUs, se puede evaluar el funcionamiento para otras condiciones diferentes respecto al punto de mejor performance.

Los estudios realizados hasta la fecha (Alatorre et al 1990), (Buse 1981) y [3] (Chapallaz et al 1998) estuvieron direccionado básicamente a intentar efectuar estimaciones de las prestaciones de bombas centrífugas en modo turbina a partir de las características en modo bomba, mediante la normalización de las curvas características y determinación de relaciones H_T/H_B y Q_T/Q_B , para las condiciones de máximo rendimiento y en función del número o velocidad específica [4] (Stepanoff 1957).

Sin embargo, son grandes las discrepancias observadas entre los datos aportados por distintos autores, lo que induce a creer que existen parámetros de diseño distintos a la velocidad específica que influyen en el comportamiento en modo turbina.

Uno de ellos, el valor relativo del entrehierro carcasa-rodete, ha sido muy estudiado por un equipo de investigación de la Universidad de Hannover. Se demuestra que el huelgo influye más en el funcionamiento normal en modo bomba que en el inverso en modo turbina, provocando descensos de rendimiento menores.

La mayoría de los estudios realizados se basan en la hipótesis de la similitud entre los rendimientos óptimos en ambos modos de operación, lo cual no es fácil de sostener, y en otro, de tipo de relaciones algebraicas en función del rendimiento. Todos ellos se han realizados considerando velocidades de rotación iguales en ambos modos de funcionamiento.

Se encuentra muy poca información sobre aspectos experimentales concretos en el que, para una bomba determinada, se estudien las variaciones del comportamiento en modo inverso frente a otros parámetros como ser altura, velocidad de rotación, caudales, etc.

Metodología: Banco de Ensayos

Los ensayos de rendimiento y determinación del campo de operación de la turbina fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue (LA.M.HI), a fin de determinar la performance, rendimiento y campo de operación de la misma. El ensayo se realizó para un rango de caudales a fin de determinar el campo de operación de la misma y los métodos de medición fueron aplicados conforme a las reglas que se emanan de las normas IEC, BSI, y la DIN. El procedimiento experimental involucra la medición de cuatro parámetros: Altura, Caudal, Velocidad de Rotación y torque en el eje de la BUTUs.

Para el estudio del comportamiento de la bomba a caracterizar, tanto en su modo normal como en modo turbina, se ha utilizado el banco de ensayo hidráulico mostrado y esquematizado en la Foto N° 01 y en Figura N° 01, respectivamente.



Foto N° 01: Banco de Ensayos para Maquinas Hidráulicas - Univ. Nac. del Comahue (Patagonia Argentina)

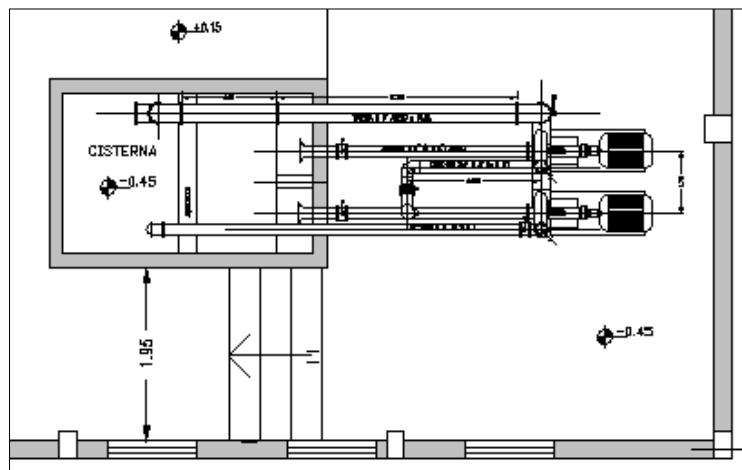


Figure N° 01: Vista en Planta Banco de Ensayos - Univ. Nac. del Comahue (Patagonia Argentina)

Se trata de instalaciones hidromecánicas donde el salto y el caudal requerido es proporcionado por una estación de bombeo conformada por dos unidades tipo centrifuga de eje horizontal y una potencia unitaria de 18 kW (25 HP) y 1500 RPM. Las bombas toman libremente desde una cisterna abierta a la atmosfera y con sendas válvulas tipo globo en la descarga de las mismas. Por un sistema de válvulas y tuberías con una disposición para tal fin, el flujo ingresa a la bomba en estudio, cediendo parte de la energía a la misma y retornando a la cisterna a través del tubo de aspiración que tiene la bomba que es operada en el modo turbina.

Este modelo es controlado por un freno a corrientes parasitas o de Foucault según los requerimientos del ensayo y a través de un tablero de comando que controla al freno a través de la corriente eléctrica suministrada.

El caudal circulante a través de la BUTUs es medido mediante medidor electromagnético o en su defecto, por una placa orificio normalizada según BS y calibrado. El salto o altura de elevación es medida a través de un manómetro en “U” a columna de mercurio. La altura

estática así obtenida se complementa con las correcciones pertinente por diferencias de cotas existentes y con el aporte de energía cinética para así determinar la energía específica por unidad de masa intercambiada en el ensayo.

La medición del par se la realiza con un tacómetro óptico y una celda de cargas acoplada, ambos al freno dinamométrico, lo que permite determinar la potencia mecánica entregada por la BUTUs.

Resultados Experimentales

Se ha procedido a la caracterización experimental de una Bomba Centrífuga de tipo radial estandarizada marca *Peerlees* Serie C&F Type 820A 2x2½x8- *Peerless Pump Company Indianapolis, IN 46207-7026- (Sterling Fluid Systems USA, Inc)* cuyas características nominales indicada en el catálogo del fabricante son: Caudal Nominal de 150 U.S.GPM, Altura Neta Total Nominal de 52 Feet, Rendimiento Efectivo de 70%, Velocidad de Rotación de 1750 RPM y Diámetro Rotor de 8 pulgadas (el medido sobre el equipo fue de 203,60 mm). Además, se han relevado sobre esta unidad de bombeo un ancho neto de descarga del impulsor de 8,50 mm, Diámetro Neto de Entrada Impulsor de 63,60 mm y el impulsor tiene 8 alabes.

Siguiendo los procedimiento expuestos, se han obtenidos distintas variables de funcionamiento para puntos de velocidad e giro identificables como ser 250 RPM, 500 RPM, 750 RPM, 1000 RPM, 1250 RPM, 1500 RPM 1750 RPM y 2000 RPM. Para estas velocidades se procedió a identificar el caudal de operación, presión estática de admisión y descarga, y torque al freno, que conjuntamente con la velocidad de giro son los cuatro parámetros de operación prescindibles para poder identificar las distintas curvas de performance de esta bomba trabajando en su modo turbina.

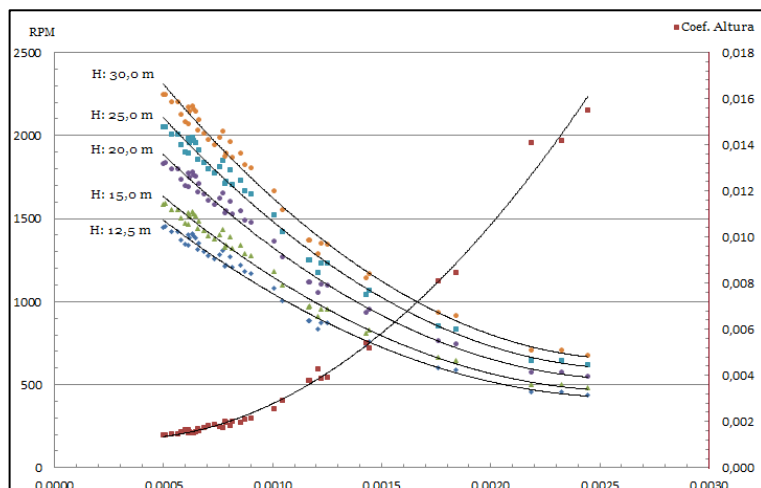


Gráfico N°
[RPM] y Coef.
de Caudal –

01: Vel. Rotación
Altura vs. Coeficiente
Modo Turbina

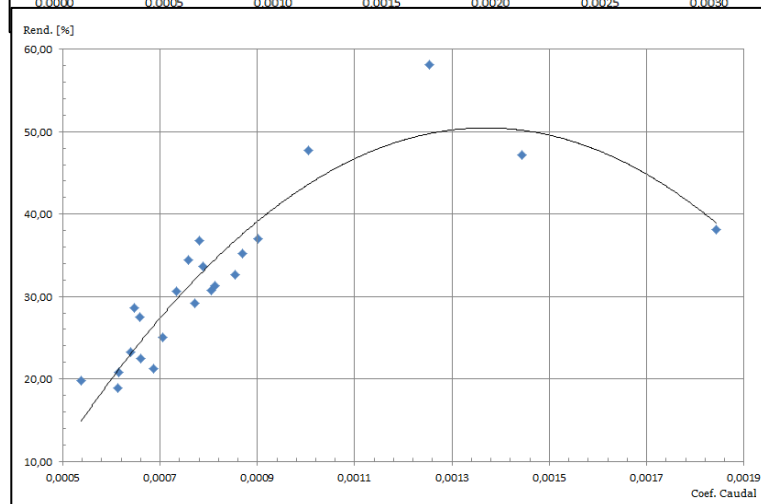


Grafico N° 02: Rendimiento Global vs. Coeficiente de Caudal – Modo Turbina

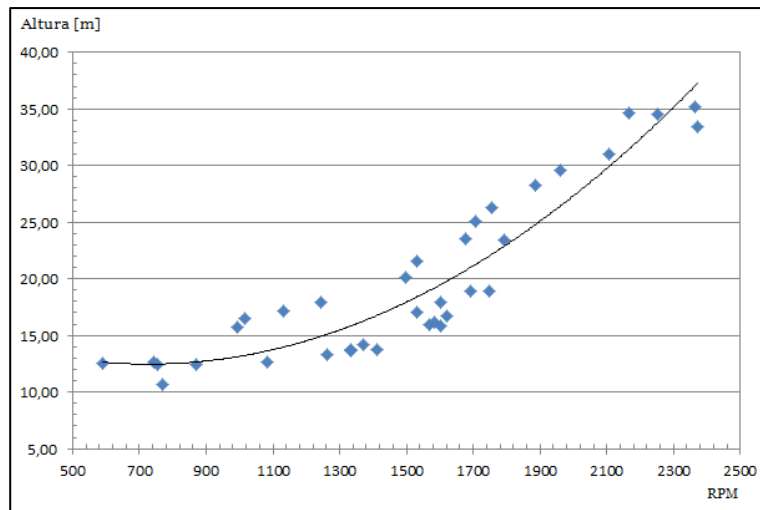


Grafico N° 03: Altura Neta vs. Velocidad de Rotación [RPM] – Modo Turbina

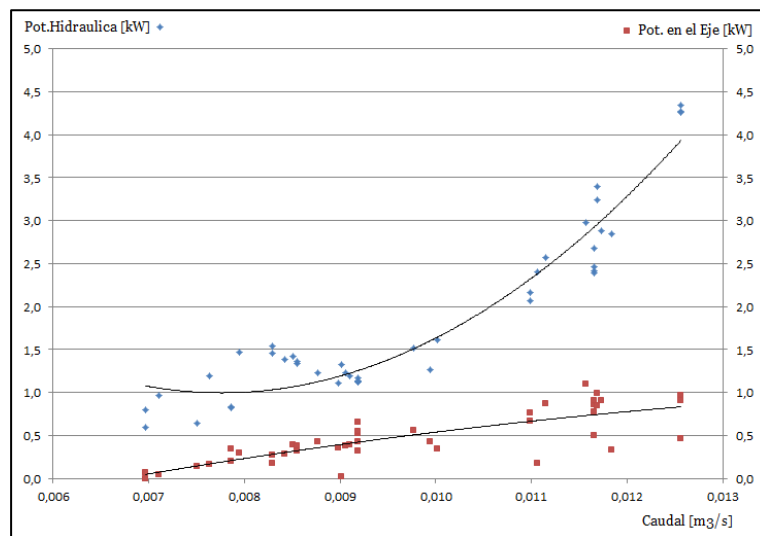


Grafico N° 04: Pot. Hid. Entrada y Pot. Mec. Salida en Eje vs. Caudal de Operación [m³/s] – Modo Turbina

Análisis de Resultados Experimentales

La caracterización de la maquina en su modo bomba y de acuerdo a las curvas proporcionada por el fabricante, podemos inferir que esta presenta una curva H vs. Q con alta estabilidad.

En cuanto al funcionamiento en su modo turbina, es posible observar a partir de la grafica N° 01, que los ensayos muestran una curva con tendencia igual a los que fijan los preceptos teóricos y experimentales desarrollados por otros investigadores del tema.

En cuanto al funcionamiento en modo turbina, se puede observar de la gráfica N° 01 como varia la velocidad de rotación en función de la variación del caudal y para saltos constante, así que se trata de un conjunto de curvas que no pasan por el origen y esto nos pone de manifiesto que es necesario contar con un caudal y una carga mínima a la entrada, para que la maquina pueda comenzar a girar.

En la grafica N° 02 se muestra la variación del rendimiento de la turbina en función de caudal. Por una parte se destaca el aumento del rendimiento con la variación del caudal hasta un máximo, para después volver a decaer y describir para todo el rango de caudales, una variación de tipo parabólica, totalmente concordante con las consideraciones teorías aplicada a este tipo de turbomáquinas.

En la grafica N° 04 es posible apreciar la variación de la potencia hidráulica de entrada y la potencia obtenida en el eje de la turbina para una variación determinada de caudal. En la misma se puede ver como se manifiesta un aumento de ambas potencias con el aumento de caudal. Aspecto este que es compatible con los desarrollos teóricos basado en la aplicación de la ecuación fundamental de la turbomáquinas o ecuación de Euler.

Por último, es posible concluir que esta bomba centrifuga puede funcionar en su modo turbina con parámetros nominales de Altura Neta de 12,50 m; Caudal Nominal de 9,29 l/s y velocidad de rotación de 870 RPM, aunque este último parámetro puede estar dentro de un rango que va desde 750 a 110 RPM.

Conclusiones

Se ha caracterizado el comportamiento de una bomba centrifuga operando en sentido reverso; modo Turbina. Este comportamiento fue realizado con variación de velocidad de rotación y la distorsión de las correspondientes curvas adimensionales, provocada por el mejor comportamiento del rodete con números Reynolds elevado, así como un mejor direccionamiento de la corriente en la cámara espiral.

Las curvas a salto constante permiten la selección de la velocidad de rotación del generador y, en caso de utilizar maquinas factibles de variación del régimen, se obtiene un criterio de explotación con caudal variable.

La continuación de este trabajo debe dirigirse hacia varios objetivos, entre los que se puede citar el desarrollo de modelos de flujos en los distintos cuadrantes, el estudio experimental de las zonas de disipación de salto con consumo de accionamiento directo e inverso, el estudio de la variación del diámetro del impulsor, la determinación de la curva de cavitación y el funcionamiento a cargas parciales.

Bibliografía y Referencias Bibliograficas

[1] Alatorre-Frenk, C. and Thomas, T. H. The pumps as turbines approach to small hydropower.

World congress on renewable energy, September 1990. (Alatorre et al 1990)

- [2] Buse, F. Using centrifugal pumps as hydraulic turbines. Chemical Engineering, January 1981, pp 113-117. (Buse 1981)
- [3] Chapallaz Jean-Marc, Eichenberger Peter, Fischer Gerhard. Manual on pumps used as turbines. MHPG Series Harnessing Water Power On a Small Scale. Volume 11.] (Chapallaz et al 1998)
- [4] Stepanoff, A.J.. Centrifugal and axial flow pumps, John Wiley and Sons, New York. – 1957 (Stepanoff 1957)
- [5] Williams, A.- Pumps as turbines a user's guide, intermediate Technology publications, London. - 1995. (Williams 1995)
- [6] Mateus Ricardo - Estudo de grupos moto-bomba operando como grupos geradores em microcentrais hidrelétricas – Itajubá (MG) – Brasil - 2007.- (Mateus 2007)
- [7] Johann F. Gülich – Centrifugal Pumps – ISBN 978-3-540-73694 – Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008 - (Gülich 2008)
- [8] Thoma, D. , Vorgaenge beim Ausfallen des Antriebes von Kreiselpumpen; Mitt. Hyd. Inst. Tech. Hochschule, Muenchen, Vol. 4, pp 102-104. -1931 - (Thoma 1931)