



INFLUENCIA DEL MOTOR COMO GENERADOR EN UNA BOMBA MONOBLOCK USADA COMO TURBINA

Audisio, Orlando Aníbal¹, Marchegiani, Ariel Ricardo² y Kurtz, Victor Hugo³

^{1,2} Laboratorio de Maquinas Hidráulicas (La.M.Hi.), Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400 - (Q8300IBX)
Neuquén Capital - Neuquén Argentina.

Correo-e: orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar - ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar
³ Departamento de Ingeniería Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, N3360 - Oberá, Misiones, Argentina
Correo-e: kurtzvh@fio.unam.edu.ar

RESUMEN

Se presenta en este trabajo, una evaluación de las ventajas y desventajas de la utilización de bombas centrífugas tipo monoblock como turbinas hidráulicas. Se llevaron a cabo varios ensayos experimentales de laboratorio, tanto del conjunto motor-bomba como de la bomba solamente, comparando los resultados obtenidos en las dos modalidades.

En una primera etapa, se estudió el comportamiento del motogenerador, tomando como variable de entrada; La potencia hidráulica y variable de salida; La potencia eléctrica generada.

En otra oportunidad se ensayó el equipo como maquina hidráulica solamente. Esto es: Variable de entrada; La potencia hidráulica y variable de salida; La potencia mecánica obtenida.

Finalmente se repitieron los ensayos de la primera etapa. Compararon los resultados obtenidos, para cada caso.

La principal conclusión de este análisis experimental está relacionada a la baja potencia que se obtiene de este monoblock si se quiere generar en corriente alterna, garantizando calidad de energía en cuanto a frecuencia y tensión; esto motivado, principalmente, por la imposibilidad de modificar la velocidad de rotación del motor eléctrico en el modo turbina.

Palabras Claves: Bomba Reversa, PCH, Energía renovable, Turbinas, Generación Asincrónica, BUTUs



1. INTRODUCCIÓN

Cuando se considera la situación energética en países en desarrollo y, en especial en áreas rurales, las pequeñas centrales hidráulicas (PCH) juegan un importante rol en el desarrollo de las mismas. Sin embargo, el costo de inversión inicial que requiere una PCH es considerado relativamente alto y esto ha restringido, en algunos países más que en otros, el desarrollo de estas potenciales energías renovables. El uso de Bombas Centrífugas Standard como Turbinas (BUTUs) puede ofrecer una alternativa técnica y con una apreciable ventaja económica. [1]

Llevando este concepto un poco más adelante, sobre todo en potencias muy bajas, sería muy conveniente utilizar una bomba monoblock (conjunto bomba-motor acoplados en un solo conjunto desde fábrica) como turbina, ya que los costos del equipamiento electromecánico se reducirían enormemente, debido a que se estaría utilizando, además, el motor asíncrono como generador. [2]

Dada las condiciones geométricas fijas de una bomba centrífuga, cuando esta está operando en sentido reverso, las características del flujo en la carcasa y el impulsor producen un muy bajo rendimiento; esto se torna muy marcado a cargas parciales. Este es uno de los problemas más difíciles de manejar para un sistema en una PCH sobre la base de una BUTUs. Por este motivo, una bomba operando como una turbina es muy sensible a los cambios de parámetros tales como altura y caudal. En consecuencia, una errónea selección de la bomba dará lugar a un punto de trabajo no óptimo y una entrega de la potencia insuficiente, sobre todo cuando el uso de su motor como generador impone condiciones adicionales.

2. ANÁLISIS DE LA BOMBA COMO TURBINA A EJE LIBRE

Ensayo del equipo como máquina hidráulica solamente. Esto es: Variable de entrada; *La potencia hidráulica* y variable de salida; *La potencia mecánica obtenida*.

Los ensayos de rendimiento y determinación del campo de operación de la bomba como turbina fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, a fin de determinar la performance, rendimiento y campo de operación de la misma.

El equipo que fue ensayado se trata de una bomba centrífuga de una sola etapa tipo monoblock marca IRUMA Modelo 60/5 (FB-2) con brida de entrada de \varnothing_1 60 mm y brida de salida \varnothing_2 60 mm. En la estandarización de ANSI se trata de una unidad tipo *single stage, end-suction pump*. Esta bomba tiene una velocidad específica media n_{sq} de 36,90. Los parámetros de diseño son mostrados en la Tabla 1.

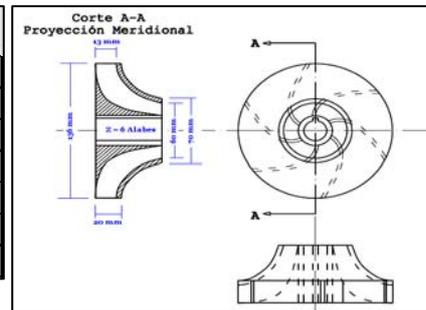


5 al 7 de Octubre de 2016

Tabla 1: Datos Técnicos Bomba IRUMA E-60/5

Q	23	31	37,5	41,8	45	48	Potencia Motor Electrico 3 kW (4 HP)
H	20	18	16	14	12	10	
PA Electrica [HP]	2,8	3,1	3,2	3,4	3,5	3,6	
PA Electrica [kW]	2,088	2,312	2,386	2,535	2,61	2,685	
η	0,600	0,658	0,685	0,629	0,564	0,487	
ns	24,43	30,69	36,87	43,03	50,11	59,34	

Impulsor:		
Diametro exterior	136	mm
Diametro Interior	70	mm
Diametro Neto Interior	60	mm
Ancho Salida	20	mm
Ancho Neto Salida	13	mm
Numero de Alabes	6	
Velocidad de Rotacion	2890	RPM



En la Figura 1 se observa la máquina ensayada acoplada a un freno dinamométrico.



Figura 1: Bomba centrífuga acoplada a freno dinamométrico.

El ensayo se realizó para un rango de caudales a fin de determinar el campo de operación de la misma. Los métodos de medición fueron aplicados conforme a las reglas de la IEC, la BSI, y la DIN [7] y [9].

Se determinaron el rendimiento óptimo de la máquina a eje libre, es decir sin incluir el motor como generador, con su correspondiente punto de operación y, el campo de operación de la máquina para distintos caudales. Los resultados fueron analizados y combinados en distintos diagramas que dan un conocimiento acabado del funcionamiento en el modo turbina.

Para ello, y con una presión de entrada constante, se midió con un caudalímetro tipo electromagnético el caudal o descarga, la presión aguas arriba de la turbina, p_1^T , la presión



aguas abajo de la turbina, p_2^T , el torque o par torsor en el eje de la turbina, y la velocidad de rotación de la turbina. Con estos datos se determinaron la altura neta para el modo turbina, energía hidráulica y eficiencia de la turbina, de la siguiente manera:

- Altura Neta o Energía Específica

$$H_N^T = H_1^T - H_2^T = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} + \frac{p_1^T - p_2^T}{\rho g} + \Delta z \quad [\text{m}] \quad (1)$$

- Potencias Hidráulica

$$P_{\text{hid}}^T = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_N^T \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

- La eficiencia de una turbina hidráulica es medida por su rendimiento. En general el rendimiento es una indicación de que porcentaje de la potencia entregada por el agua a la turbina es transformada en potencia mecánica en el eje, es decir:

$$\eta_g^T = \frac{P_{\text{eje}}^T}{P_{\text{hid}}^T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

O sea,

$$\eta_g^T = \frac{P_{\text{eje}}^T}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_N^T} \quad (4)$$

Donde ρ es la densidad del agua, Q es el caudal, y H_N^T es la altura neta de la turbina, y P_{eje}^T es la potencia en el eje de la turbina, dada por:

$$P_{\text{eje}}^T = T \cdot \omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot T \quad [\text{kW}] \quad (5)$$

Donde T es el torque en el eje de la turbina y n es la velocidad de rotación de la misma [5], [6] y [8].

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Utilizando los resultados del ensayo para el modo turbina a eje libre, se determinaron las curvas de performance que se muestran en las Figuras 2 y 3, tales como:

$$\begin{aligned} H_N^T &= H_1^T(Q); & P_{\text{hid}}^T &= H_{\text{hid}}^T(Q); & \eta_g^T &= \eta_g^T(Q); \\ \varphi_g^T &= \varphi_g^T(Q); & \psi_g^T &= \psi_g^T(Q); & \pi_g^T &= \pi_g^T(Q) \end{aligned}$$



Donde:

$$\varphi = \text{Coeficiente Caudal} = Q/nD^3 \text{ [---]},$$

$$\psi = \text{Coeficiente Altura} = gH/n^2D^2 \text{ [---]},$$

$$\pi = \text{Coeficiente Potencia} = P_{eje}/(\rho n^3 D^5) \text{ [---]}$$

Tabla 2: Características de la Bomba Centrífuga Ensayada en modo Turbina

	Torque	RPM	Caudal	Altura	Pot.Mec	Pot.Hid	Rendi	Diam	U ₂	Cof.Caudal	Cof.Presio n	Cof.Potencia	Cof.Diame tro
	[kg m]	[RPM]	[U/s]	[m]	[kW]	[kW]	[---]	[mm]	[m/s]	[---]	[---]	[---]	[---]
Bomba como Turbina	0,55	2810	11,5	25	1,588	2,820	0,56	136	20,01	0,1220	0,6125	0,04286	2,533
	1,15	760	12,17	25	0,898	2,985	0,30	136	5,41	0,4863	8,3735	1,22501	2,439
	0,56	2648	12,49	25	1,523	3,063	0,50	136	18,86	0,1432	0,6898	0,04914	2,408
	1,17	827	12,54	25	0,994	3,075	0,32	136	5,89	0,4605	7,0717	1,05255	2,403
	1,26	1164	12,6	25	1,507	3,090	0,49	136	8,29	0,3287	3,5697	0,57218	2,397
	0,67	2502	12,9	25	1,722	3,164	0,54	136	17,82	0,1566	0,7726	0,06585	2,369
	1,18	1330	13,35	25	1,612	3,274	0,49	136	9,47	0,3048	2,7342	0,41044	2,329

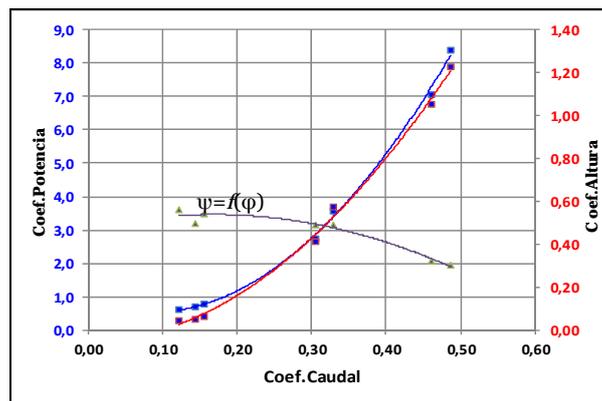


Figura 2: Coeficientes de Potencia y Altura en función del coeficiente de caudal

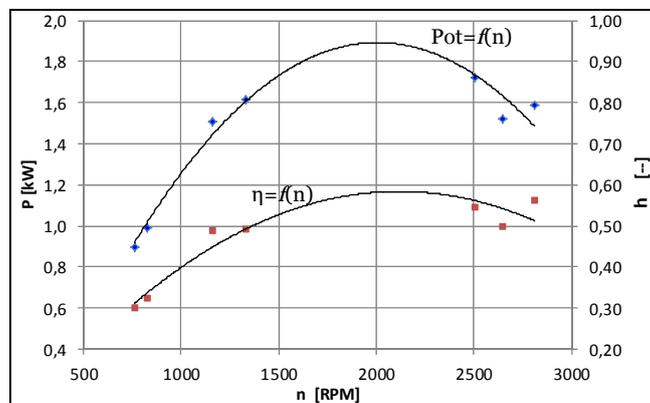


Figura 3: Potencia y rendimiento en función de la velocidad de rotación



3. ENSAYOS ELECTRICOS

El estudio del comportamiento del motogenerador, fue desarrollado tomando como variable de entrada la *potencia hidráulica* y como variable de salida la *potencia eléctrica generada*. Como se ve en la figura 4.

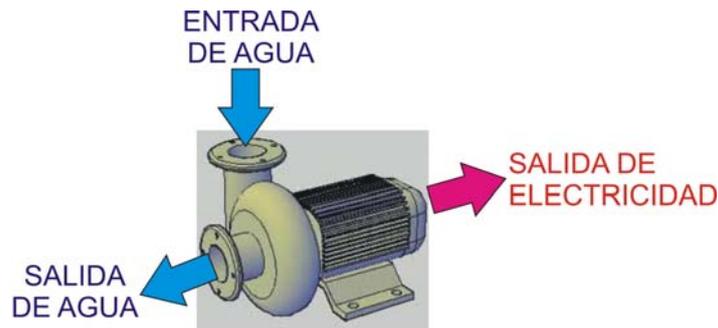


Figura 4: Entrada potencia hidráulica, salida potencia eléctrica generada

3.1 Ensayo en Vacío

Para determinar algunos de los parámetros del electromotor, no indicados en la placa de características del mismo, se conectó inicialmente el motor sin carga a la red de alimentación comercial.

Por otro lado, para el cálculo de los capacitores de excitación necesarios para que el motor funcione como generador asincrónico (conforme al método utilizado) [3]. Se hace necesario conocer, entre otros parámetros, la corriente que consume el motor en vacío.

La mayoría de los parámetros del motor necesarios para el cálculo de los capacitores de excitación, se obtienen de la hoja de datos técnicos o de la placa característica del motor. Pero no así la corriente en vacío que, generalmente, se tiene que medir. El procedimiento de medición fue el mismo que para la bomba como turbina y el motor como generador, indicado en párrafo 3.1.1.

3.1.1 Medición de la Corriente en Vacío del Motor

El motor en configuración estrella, se conectó a la red eléctrica comercial de 220/380 Vac., midiendo las corrientes de fase y, las tensiones de línea y de fase.

Al momento del ensayo eléctrico en vacío, el motor se encontraba acoplado a la bomba, ya que forman una sola unidad. Se tomó como hipótesis inicial, que la bomba acoplada al motor sin carga no presenta par antagónico. Esta hipótesis fue corroborada posteriormente.



La consideración hipotética expuesta en el párrafo anterior, también fue utilizada en el ensayo del equipo como maquina hidráulica solamente. Esto es, tomando como variable de entrada la *potencia hidráulica* y como variable de salida la *potencia mecánica obtenida*. Además, se asumía que el motor no representaba carga para el sistema ensayado.

3.2 Ensayo como Turbogenerador

Ensayo del equipo como generador: **Variable de entrada:** Potencia hidráulica. **Variable de salida:** Potencia eléctrica generada (Fig. 5).



Figura 5: Variables medidas

Con el valor medido del caudal y altura, es posible determinar la potencia hidráulica P_h (entrada), mientras que con la intensidad de corriente, la tensión generada y el factor de potencia, la potencia generada P_g (salida). Relacionando ambas potencias, se halla el rendimiento del sistema.

La velocidad de rotación se compara con el valor de la frecuencia generada, con el fin de establecer el punto de trabajo de la máquina.

3.2.1 Potencia Eléctrica Generada

La potencia activa desarrollada por un sistema de tres fases, con cargas lineales alimentadas con fuentes sinusoidales, se puede expresar conforme al teorema de Boucherot [4], como la suma de las potencias desarrolladas por cada una de las fases.

$$P = \sum_{i=0}^{i=3} P_i \quad (6)$$

$$P = \sum_{i=0}^{i=3} P_i = P_{z1} + P_{z2} + P_{z3} \quad (7)$$



$$P = U_1 \cdot I_1 \cos \phi_1 + U_2 \cdot I_2 \cos \phi_2 + U_3 \cdot I_3 \cos \phi_3 \quad (8)$$

Los subíndices 1, 2 y 3, corresponden a las tres impedancias de cargas, sin importar la forma en que estén conectadas.

A la izquierda del esquema (Fig. 6) está representado el motor como generador. Mientras que a la derecha las cargas eléctricas.

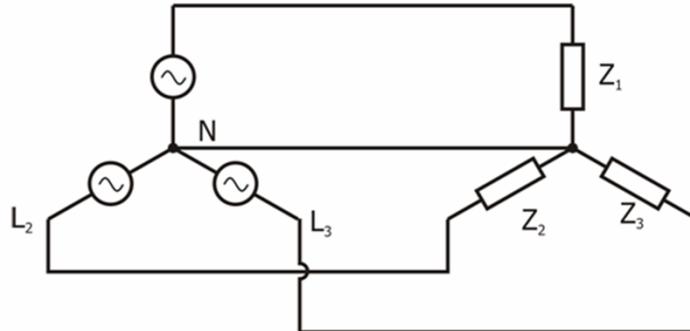


Figura 6: Circuito trifásico, motor como generador.

Para la medición de la frecuencia de la tensión generada, se utilizó un frecuencímetro de aguja.

Mientras que para la medición de las tres intensidades de corrientes, las seis tensiones eléctricas y los tres factores de potencia a la salida del motor actuando como generador. Se usó un polímetro electrónico digital.

Se emplearon lámparas incandescentes como carga eléctrica, en la configuración estrella con acceso a neutro.

En la Figura 7 se observa la máquina ensayada como generador de energía eléctrica. Es posible ver los capacitores de excitación en la parte inferior de la imagen.



Figura 7: Bomba centrífuga como unidad generadora.



En la Figura 8 se muestra la máquina ensayada, los equipos de medición y el tablero de control de cargas.



Figura 8: Ensayo de la bomba centrífuga generando, tablero de mediciones y cargas.

3.3 Resultados de las Mediciones Eléctricas

Tabla 3: Características del equipo ensayado en modo turbogenerador a altura constante

Velocidad [rpm]	Caudal [l/s]	Altura [m]	Pot. Eléctrica [W]	Pot. Hidráulica [W]	Rendimiento [...]	Observaciones
3139	12	27	1400	3179	0,44	V = 224 V ; f = 52 Hz
3155	12	27	1525	3178	0,48	V = 210 V ; f = 52 Hz
3017	13,8	27	1430	3655	0,39	V = 196 V ; f = 50 Hz
3024	14	27	1460	3720	0,38	V = 190 V ; f = 50 Hz
3006	14	27	1300	3708	0,35	V = 150 V ; f = 50 Hz

Tabla 4: Características del equipo turbogenerador a altura variable.

Velocidad [rpm]	Caudal [l/s]	Altura [m]	Pot. Eléctrica [W]	Pot. Hidráulica [W]	Rendimiento [...]	Observaciones
3155	17,5	32,5	1938	5579	0,35	V = 220 V ; f = 52 Hz
3122	16,5	30	1814	4856	0,37	V = 210 V ; f = 52 Hz
3033	15	26,5	1255	3899	0,32	V = 210 V ; f = 50 Hz
3149	16,5	30	1487	4856	0,31	V = 199 V ; f = 50 Hz
3024	14	27	1460	3720	0,38	V = 190 V ; f = 51 Hz



En la tabla 3, se muestran los resultados de los ensayos efectuados a la motobomba actuando como hidrogenerador eléctrico. En esta primera etapa, se realizaron las pruebas a altura constante.

Se puede ver en la tabla 3, que es prácticamente imposible obtener tensión nominal y frecuencia nominal al mismo tiempo. Esta situación es típica de los generadores a inducción.

De los ensayos a altura variable, mostrados en la tabla 4, dejan ver que el máximo rendimiento, se tiene a una tensión relativamente baja y a frecuencia algo mayor a la nominal.

4. CONCLUSIONES

La principal conclusión de este análisis experimental está relacionada a la baja potencia que se obtiene de este *monoblock*, si se quiere generar en corriente alterna garantizando calidad de energía en cuanto a frecuencia y tensión; esto motivado, principalmente, por la imposibilidad de modificar la velocidad de rotación del motor eléctrico en el modo turbina.

Al utilizar el motor de la bomba como generador, se está imponiendo una velocidad de giro para el modo turbinas, lo que implica que si esta no es el que se corresponde con el de mejor performance del modo turbina, tendremos una máquina trabajando en un rendimiento lejos del óptimo; aspecto este que se pone de manifiesto a partir del post-procesamiento de los datos experimentales obtenidos.

A pesar de lo expuesto en el párrafo anterior, los rendimientos observados estuvieron por encima de lo esperado y, la bomba operando como turbina, presentó un funcionamiento estable, silencioso y de buena calidad.

Por otro lado, la BUTUs ensayada, tomando en cuenta de manera preliminar el costo del sistema, representa, y confirma, una interesante solución para la generación hidroeléctrica.

Asimismo, este ensayo posibilitó validar las expresiones teóricas, obtenidas a partir de trabajos propios y de investigación de bombas centrifugas operando como turbinas hidráulicas y de la generación eléctrica utilizando motores a inducción como generador.

5. REFERENCIAS

- [1] Audisio O. A. *Correlación en el Uso de la Bomba Centrifuga Operando como Turbina en Pequeños Aprovechamientos Hidráulicos*. IV CAIM 2014 – Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. Resistencia - Del 2 al 5 de septiembre. Resistencia, Chaco.
- [2] Kurtz V. H. *Bombas Centrifugas Monoblock Utilizadas Como Turbinas Hidráulicas*. Argentina. Posadas - Misiones. 2013. Libro. Artículo Completo. Jornada. Jornada Científica Tecnológica UNaM 2013 – 40 Aniversario. Universidad Nacional de Misiones.



- [3] Marchegiani A, Kurtz V.H. *Ensayo de Una Picoturbina Pelton Compacta, de Fabricación Local*. Perú. Cajamarca. 2009. Revista. Resumen. Encuentro. XIII Encuentro Latinoamericano y del Caribe.
- [4] E. Spinadel, “*Circuitos Eléctricos y Magnéticos. Temas Especiales*”, Nueva Librería, Buenos Aires, 1982, Caps. 3, 11 y 12.
- [5] Stepanoff, A.J.; *Centrifugal and Axial Flow Pumps* – New York: John Wiley and Sons, Incorporated (1957)
- [6] Chapallaz, J.; Eichenberger, P.; Fischer, G. *Manual on induction motors used as generators*. Braunschweig: Vieweg, 1992. ISBN 3-528-02068-7.
- [7] EUROPEAN SMALL HYDRO ASSOCIATION (2004). *Guide on how to develop a small hydropower plant. Bruxelles: Alteneer Programme* - European Small Hydro Association.-
- [8] Gülich, Johann F. – *Centrifugal Pumps* – ISBN 978-3-540-73694-3 – Springer Berlin Heidelberg New York. - 2008
- [9] *PROCESS PUMP SELECTION - A SYSTEMS APPROACH* - Edited by John Davidson IMechE for the Process Industries (MEP) - ISBN 0 85298 602 5 – 1986.

Nota: Es posible ver parte de los ensayos iniciales de la bomba como turbina en:
<https://www.youtube.com/watch?v=W08mZg3HwcE>