

ENSAYO DE UNA PICOTURBINA PELTON COMPACTA, DE FABRICACION LOCAL

Víctor H. Kurtz^{(*)(**)}; Ariel R. Marchegiani^(**); Orlando A. Audisio y Fernando Botterón^{(*)(***)}

(*) UNIVERSIDAD NACIONAL DE
MISIONES

Facultad de Ingeniería - Dpto. de
Electrónica
Juan Manuel de Rosas 324
OBERA - MISIONES - ARGENTINA
E-Mails: kurtzvh@fio.unam.edu.ar;
botteron@fio.unam.edu.ar

(**) UNIVERSIDAD NACIONAL
DEL COMAHUE

Facultad de Ingeniería - Lab. de
Máquinas Hidráulicas (L.A.M.HI.) -
Buenos Aires 1400
(Q8300BCX) - NEUQUEN
ARGENTINA
E-Mails: oaudisio@uncoma.edu.ar;
marchegi@uncoma.edu.ar

(***) Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y
Técnicas CONICET -
ARGENTINA

Palabras Claves (Key Words): Pico turbinas hidroeléctricas, Alternadores asincrónicos, Pequeñas turbinas hidráulicas. Medición de potencia eléctrica.

RESUMEN

Se presenta en este trabajo los ensayos de una pico turbina tipo PELTON, llevados a cabo en el Banco de Ensayos para Pequeñas Turbinas, instalado en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería, dependiente de la Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina.

Los ensayos fueron realizados, con el fin de determinar la performance, campo de operación y punto óptimo de trabajo, de una turbomáquina generatriz compacta, del tipo Pelton. Se determinó además el campo de operación de la máquina para alturas y caudales distintos de los de diseño.

El rodete de la turbina analizada, se encuentra montado directamente sobre el eje de un motor eléctrico común, del tipo a inducción o jaula de ardilla, que auspicia de generador asincrónico de bajo costo.

Dada las características constructivas del grupo turbogenerador; no fue posible aplicar algún tipo de freno mecánico, para determinar la potencia mecánica en el eje. Por esta razón, y a fin de tener un panorama general de comportamiento del conjunto turbina-generador, el ensayo se realizó midiendo la potencia eléctrica generada, utilizando lámparas incandescentes como carga, y adaptando las mediciones a este conjunto, por lo que se midieron variables eléctricas y mecánico-hidráulicas mediante técnicas adaptadas ad-hoc.

Los resultados fueron altamente satisfactorios poniendo de manifiesto un funcionamiento estable y de buena calidad, en un amplio rango de caudales.

INTRODUCCIÓN

Dada las características constructivas del grupo turbogenerador; no es posible o se hace muy complicado, aplicar algún tipo de freno mecánico, para determinar la potencia mecánica disponible en el eje. Por esta razón, y a fin de tener un panorama general de comportamiento

del conjunto turbina-generator, el ensayo se realizó midiendo la potencia eléctrica generada, utilizando lámparas incandescentes como carga, y adaptando las mediciones a este conjunto.

En el diagrama en bloque de la figura 1, se representan las magnitudes en juego para el sistema bajo ensayo.

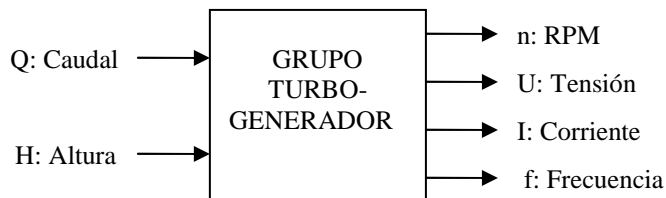


Figura 1: Diagrama en bloque de las variables a medir.

Con el valor medido del caudal y altura, es posible determinar la potencia hidráulica P_h . Mientras que con la intensidad de corriente y tensión generada, se determina la potencia generada P_g . 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 maquina.

FUNDAMENTOS TEORICOS

Potencia Eléctrica

La expresión más simple de la potencia en juego en un circuito eléctrico, está dada por la expresión:

$$P = U.I \quad (1)$$

La expresión anterior es válida para circuitos que trabajan en corriente continua. Cuando la corriente es alternada, con cargas lineales (sin armónicos), como en este caso, la ecuación 1 se le afecta de un factor denominado $\cos \phi$, coseno de “ ϕ ” o factor de potencia.

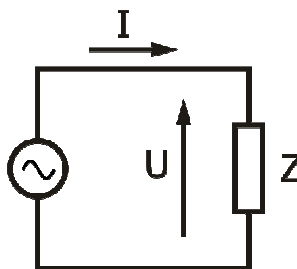


Figura 2: Circuito básico

$$P = U.I.\cos \phi \quad (2)$$

Donde:

- $P =$ Potencia eléctrica [W]
- $U =$ Tensión o Voltaje [V]
- $I =$ Intensidad de Corriente [A]

$\cos \phi =$ Factor de potencia

En los equipos que funcionan con corriente alterna, como por ejemplo motores, generadores, transformadores, coexisten tres tipos diferentes de potencia.

- *Potencia activa*
- *Potencia reactiva*
- *Potencia aparente*

Potencia activa

La denominada “potencia activa” representa en realidad la “potencia útil”, o sea, la energía que realmente se aprovecha cuando se pone a funcionar un equipo eléctrico y realiza un trabajo.

Potencia reactiva

La potencia reactiva es la consumen los motores, transformadores y todos los dispositivos o aparatos eléctricos que poseen algún tipo de bobina o enrollado para crear un campo electromagnético.

Potencia aparente

La potencia aparente o potencia total es la suma vectorial de la potencia activa y la aparente. Estas dos potencias representan la potencia que se toma de la red de distribución eléctrica, que es igual a toda la potencia que entregan los generadores en las plantas eléctricas.

Potencia en Circuitos Trifásicos

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

$$P = \sum_{i=0}^{i=3} P_i \tag{3}$$

$$P = \sum_{i=0}^{i=3} P_i = P_{z1} + P_{z2} + P_{z3} \tag{4}$$

$$P = U_1 \cdot I_1 \cos \phi_1 + U_2 \cdot I_2 \cos \phi_2 + U_3 \cdot I_3 \cos \phi_3 \tag{5}$$

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

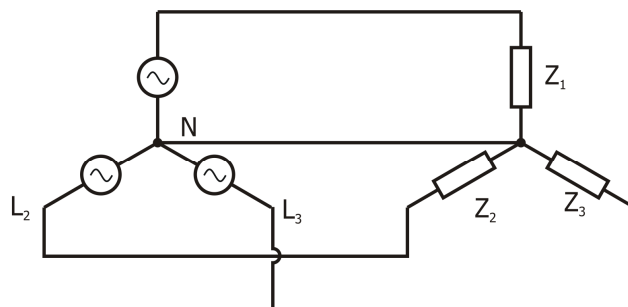


Figura 3.: Circuito trifásico

Para el caso de cargas conectadas en estrella equilibrada. Las tres tensiones son iguales y las tres corrientes también, la expresión de la potencia activa es.

$$P_Y = 3U_f \cdot I_f \cos \phi_f \quad (6)$$

Donde:

- $P_Y =$ Potencia eléctrica, en configuración trifásica en conexión estrella [W]
- $U_f =$ Tensión o Voltaje simple o de fase [V]
- $I_f =$ Intensidad de Corriente por fase [A]
- $\cos \phi_f =$ Factor de potencia de cualquiera de una de las fases.

Para el caso particular, en que las cargas sean resistivas puras (circuito ohmico), el factor de potencia es igual o próximo a 1, la ecuación 6 se reduce a:

$$P = 3U_f \cdot I_f \quad (7)$$

Que conforme a la ecuación 5 queda:

$$P = U_{f1} \cdot I_1 + U_{f2} \cdot I_2 + U_{f3} \cdot I_3 \quad (8)$$

Medición de la Potencia.

En este caso, la medición de la potencia consumida por la carga, se puede realizar, utilizando tres voltímetros y tres amperímetros, conectado como se indica en la figura 4.

Por otro lado, tomando cuidado en cargar en forma equilibrada al generador, es posible reducir los instrumentos de medición a tres voltímetros y un amperímetro, sin cometer mucho error (método muy apropiado para mediciones en campo).

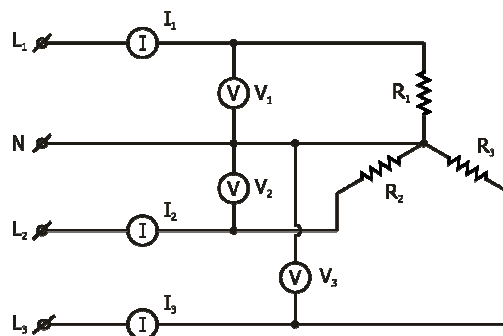


Figura 4: Esquema de conexión para la medición de la potencia generada.

Motor Asíncrono como Generador.

Para que un motor asíncrono tipo jaula de ardilla, funcione como generador, es necesario conectar capacitores en paralelo con los bornes del motor.

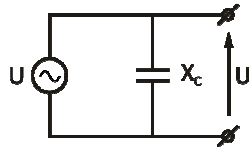


Fig. 5: Motor como generador y capacitor de excitación.

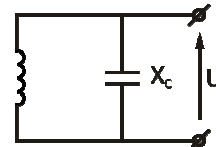


Fig. 6: Circuito esquemático del generador.

La conexión de los capacitores, en un circuito trifásico pueden ser en estrella “Y” o en triángulo “Δ “. La potencia reactiva para cada caso se puede expresar, partiendo de la ec.9.

$$Q_{Cap} = C.\omega.U^2 \quad (9)$$

Donde:

Q_{Cap} = Potencia reactiva capacitiva [VA]

C = Capacidad [μ F]

ω = Pulsación; $\omega = 2.\pi.f$

U = Tensión en los bornes del capacitor.

$$Q_Y = 3.U_f^2.\omega.C_Y \quad (10)$$

$$Q_\Delta = 3.U_f^2.\omega.C_\Delta \quad (11)$$

La relación entre la potencia activa y la reactiva es:

$$Q = P.tg\phi \quad (12)$$

Despejando C_Δ (11) y C_Y (10) y reemplazando en (12), se tiene.

$$C_Y = \frac{P.tg\phi}{3.U_f^2.\omega} = \frac{P.tg\phi}{U^2.\omega} \quad (13)$$

$$C_\Delta = \frac{P.tg\phi}{3.U_L^2.\omega} \quad (14)$$

Relacionado las ec. 13 y 14, queda.

$$C_\Delta = \frac{C_Y}{3} \quad (15)$$

De donde se deduce que las capacidades conectadas en triángulo “Δ “, son tres veces mas pequeñas que las conectadas en estrella “Y”. Pero la tensión de servicio debe ser $\sqrt{3}$ veces mayor.

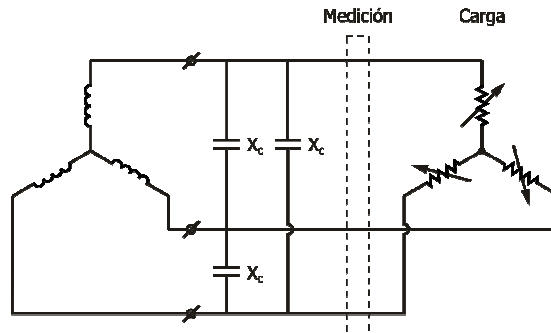


Fig. 6: Circuito completo del ensayo del motor como generador

Determinación del Capacitor de Excitación

Para la determinación del valor del capacitor conectado al motor como generador, se puede determinar recurriendo al siguiente razonamiento [2].

Conociendo la intensidad de la corriente que toma el generador conectado como motor, sin carga I_0 . Se elige un capacitor que consuma igual o menor corriente por fase.

$$X_{Cap} = \frac{1}{\omega.C} \quad (16)$$

$$I_{Cap} = U_{Cap}.\omega.C \quad (17)$$

$$\omega = 2.\pi.f \quad (18)$$

$$I_{Cap} = U_{Cap}.2\pi.f.C \quad (19)$$

Despejando C, de (19)

$$C = \frac{I_{Cap}}{U_{Cap} 2\pi.f} \quad (20)$$

Donde:

- C = Capacitor [μ F]
- I_{Cap} = Corriente nominal del capacitor [A]
- U_{Cap} = Tensión en los bornes del capacitor [V]
- f = Frecuencia [Hz]

Como

$$I_0 = I_{Cap} \quad (21)$$

$$U_{Gen} = U_{Cap} \quad (22)$$

Reemplazando (21) y (22) en (20), se tiene:

$$C = \frac{I_0}{U_{Gen} 2\pi.f} \quad [\mu\text{F}] \quad (23)$$

Determinación de la Máxima Potencia Generada

Un motor a inducción conectado como generador, proporciona menor potencia, que la que consume como motor.

Existen varias técnicas para determinar la potencia máxima, que puede generar un motor conectado como generador. En este caso se opta por el método de la diferencia de corriente [2], esto es; La diferencia de corriente que toma el generador como motor en vacío, respecto a la que toma a plena carga por fase.

$$I_{Gen} = I_N - I_O \quad (24)$$

Donde:

- I_{Gen} = Máxima corriente que puede generar.
- I_N = Corriente nominal consumida como motor, (valor tomado de la placa de características del motor)
- I_O = Corriente en vacío, que toma la máquina a inducción, conectado como motor (magnitud medida).

Por lo tanto, la potencia útil máxima que es posible generar, asumiendo cargas resistivas pura, está dado por.

$$P_{Gen} = 3U_f \cdot I_{Gen.f} \quad (25)$$

Velocidad de Rotación

En grupos hidrogeneradores compactos, donde la máquina hidráulica se encuentra directamente acoplada al eje del generador, la velocidad de rotación de la turbomáquina será igual a la del generador.

Para este caso, como se trata de una electromáquina asincrónica, el equivalente de la velocidad del campo rotante, es distinta a la velocidad de rotación del eje.

La velocidad de giro de la turbina, se puede determinar, entonces, con la ayuda de la ecuación 26.

$$n_{rotación} = n_{hs} = (n_s - n_p) + n_s \quad (26)$$

Donde:

- $n_{rotación}$ = Velocidad de rotación como generador.
- n_{hs} = Velocidad hipsincrónica.
- n_s = Velocidad sincrónica o del campo rotante; $n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$
- n_p = Velocidad de rotación del eje a plena potencia, máquina conectada como motor (Se toma de la placa de características del motor).

Potencia Hidráulica

La expresión de la potencia hidráulica en juego, en una turbomáquina está dada por la ec.27

$$P_h = \gamma \cdot Q \cdot H_n \quad (27)$$

Donde:

- P_h = Potencia hidráulica.
- γ = Pesos específico (del agua)
- Q = Caudal
- H_n = Salto o Altura neta.

El salto o altura neta, H_n , se define con la diferencia de las energías por unidad de peso, entre la entrada y la salida de la turbomáquina, que es la energía que se le entrega a la misma (turbina).

Rendimiento del Sistema

El rendimiento del grupo turbogenerador, se obtiene relacionando la potencia de entrada al sistema (potencia hidráulica) P_h , respecto a la potencia de salida (potencia eléctrica generada) P_g , conforme se indica en la fig. 7 y la ec. 28.

$$\eta = \frac{P_g}{P_h} \quad (28)$$

Donde:

- η = Rendimiento del sistema turbogenerador.
- P_h = Potencia de entrada al sistema (potencia hidráulica).
- P_g = Potencia de salida (potencia eléctrica generada).

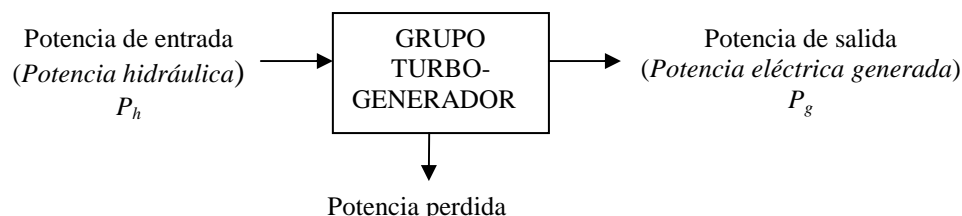


Figura 7: Rendimiento del sistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

El procedimiento experimental, contempló la realización de ensayos de rendimiento para distintas velocidades de rotación y saltos de 45m, 50m y 55m, y la determinación del punto de óptimo rendimiento. Esto es a fin de determinar los parámetros óptimos de funcionamiento de la máquina.

Para la determinación de la potencia eléctrica generada, se utilizó el circuito presentado en la figura 6, con los instrumentos de medición conectados como muestra la figura 4.

En la figura 8, se observan el circuito utilizado y el banco de cargas con sus respectivos instrumentos de medición.

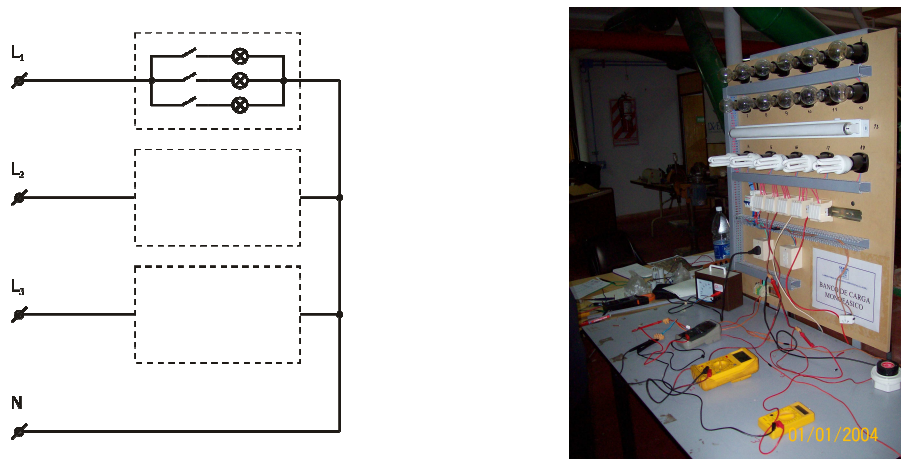


Figura 8: Control de carga, circuito utilizado, Banco de cargas

Para la determinación de la altura neta, H_n , se tomaron las presiones referidas a la salida de la máquina ensayada y se consideran los valores de presión relativa a la atmósfera. Utilizando un manómetro diferencial de columna de mercurio abierto a la atmósfera y con escala calibrada para tal fin. El rango de medición de 0 a 4000 mmHg, disponible en el banco de ensayos.

El caudal fue medido con una placa orificio de diámetro 6". La presión diferencial a través de las placas orificio se midió mediante manómetros diferenciales de 200 mm Hg de escala. La medición del caudal se realiza directamente sobre la escala del manómetro.

La velocidad de rotación de la turbomáquina se midió con un taquímetro digital, equipado con un sensor de proximidad magnética, marca RHOMBERG –BRASLER, modelo R14-1805FNO-NTC.

El sensor magnético de rotación, del medidor electrónico de RPM, se montó de forma tal que detecte el pasaje de una lengüeta metálica sujeta provisoriamente al ventilador del motor que auspicia como generador, al cual se le quitó provisoriamente la cubierta protectora de dicho ventilador.

CARACTERISITICAS DE LA MAQUINA ENSAYADA

Entre las principales características de la maquina ensayada, se pueden destacar: Altura Neta $H_N = 60\text{m}$, Caudal $Q = 2.5 \text{ l/s}$, Nro. de revoluciones $n = 910 \text{ RPM}$, Potencia prevista en eje $P_e: 500\text{W}$, Diámetro primitivo de 120 mm, 1 inyector, y 16 álabes. La turbina no posee inyector con regulación por lo que el ensayo se tomó como apertura de inyector, fija de 100%, es decir $A_0 = A_{0 \text{ max}} = 100\%$ (figura 9). El motor utilizado como generador, es del tipo asincrónico, jaula de ardilla, marca WEG de 1HP (0.75kW) y 910 RPM., conectado en forma trifásica en configuración estrella con acceso a neutro. El conjunto se acopló un banco de capacitores compuestos por tres unidades de $16\mu\text{F} \times 400\text{V}$, conectados en triángulo (conexión delta).



Figura 9: Turbina ensayada

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos en los ensayos con saltos de de 45m, 50m y 55m se analizaron agrupándolos, según la variable o parámetro cuyo estudio de detalle quisiera realizarse.

En la Tabla 1 se da un ejemplo de los datos relevados durante el ensayo, y en la figura 10 se observan los resultados de potencias y rendimientos, obtenidos para diferentes velocidades de rotación de la turbina.

La frecuencia no se pudo mantener en valores standards, alcanzándose valores entre 58 y 62 Hz para los mejores rendimientos y potencias, dependiendo del salto de ensayo.

Tabla 1

Hn[m]		50								
Q [l/s]		3								
CARGA		vacío	1	2	3	4	5	6	7	8
n [r.p.m]		2022	1908	1873	1857	1832	1811	1807	1814	1842
fase1	V1 [Volt]	298	259	244	236	222	205	188	177	158
	A1 [Amp]	0	0,4	0,5666	0,666	0,8333	1	1,1333	1,2333	1,333
fase2	V2 [Volt]	306	266	250	241	226	208	193	180	163
	A2 [Amp]	0	0,3666	0,5666	0,6333	0,8	0,966	1,1	1,1666	1,2666
fase3	V3 [Volt]	302	263	248	240	226	207	191	179	160
	A3 [Amp]	0	0,38	0,5666	0,6333	0,8	0,967	1,12	1,2	1,3
Potencia		0	301,06	420,42	461,79	546,59	606,10	639,28	643,08	625,07
frecuencia		67,40	63,60	62,43	61,90	61,07	60,37	60,23	60,47	61,40
rendimiento		-	0,20	0,29	0,31	0,37	0,41	0,43	0,44	0,43

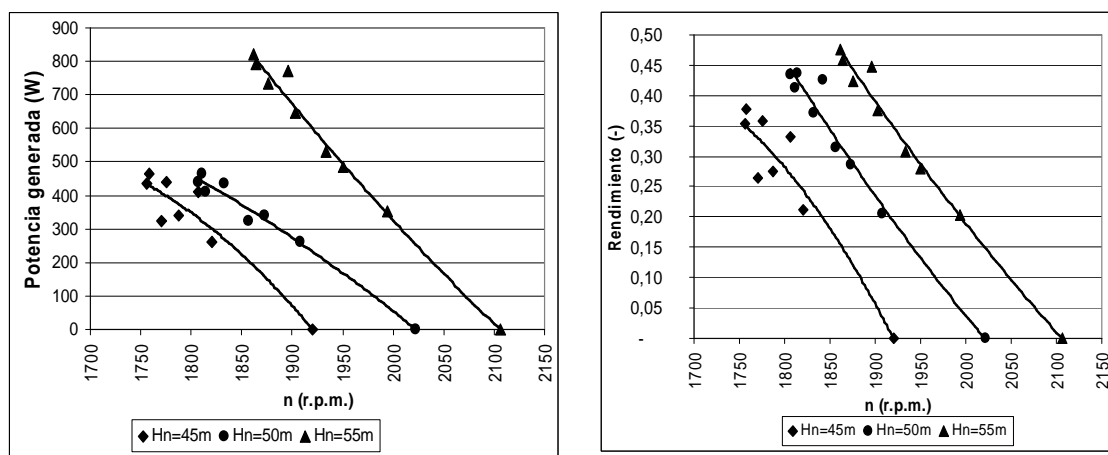


Figura 10: Resultados de los ensayos

CONCLUSIONES

Los rendimientos observados relativamente bajos pueden deberse a que se utilizó un motor como generador, con la consabida reducción del rendimiento cuando se utiliza de esta forma.

Sin embargo, los resultados fueron altamente satisfactorios poniendo de manifiesto un funcionamiento estable y de buena calidad, en un amplio rango de caudales.

Por otro lado, se estima que el grupo hidrogenerador ensayado, tomando en cuenta, de manera preliminar, el costo del sistema, representa una interesante solución para el caso que se utilice como cargador de baterías (acumuladores), ya que a pesar de los valores de rendimientos obtenidos, estos son mayores que si se utiliza una dinamo o alternado de automóvil como generador y cargador.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] SOBREVILA, Marcelo A. – Circuitos Eléctricos y Magnéticos. Ediciones Marymar. 1978
- [2] BIKOVICH, Juan – Tecnología del Generador de Energía Asíncrono, Un Aporte para la Promoción Energética en el País – Preg. Misionero 1986.
- [3] Marchegiani, Ariel R.; Audisio, Orlando A., Ensayo para la determinación del campo de operación de una turbina tipo Pelton , Reporte final LAMHI-1108/11-2, Laboratorio de Maquinas Hidráulicas (La.M.Hi.), Universidad Nacional Del Comahue, Noviembre de 2008
- [4] E. Spinadel, “Circuitos Eléctricos y Magnéticos. Temas Especiales”, Nueva Librería, Buenos Aires, 1982, Caps. 3, 11 y 12.
- [5] Terlecki A., Kurtz, V. H., Botterón, Fernando. Medición de frecuencia de la tensión generada en una pico central hidroéctrica, con elementos de bajo costo. CRICTE 2006 –Ijuí Brasil