



## **Picotubina Michell-Banki como Máquina Impulsora de Alternador Automotriz. Estudio de Factibilidad para el Funcionamiento sin Regulador de Carga.**

A. R. Marchegiani <sup>a</sup>, V. H. Kurtz <sup>b</sup>, O. A. Audisio <sup>c</sup>

<sup>a,c</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue (UNCo)  
Laboratorio de Maquinas Hidráulicas (LA.M.HI.)  
Calle Buenos Aires 1400 – Q8300 BCX Neuquen Capital – Patagonia Argentina  
Proyecto de Investigación: 04/I229*

<sup>b</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM)  
Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE).  
Departamento de Electrónica. Calle Juan M. de Rosas 325 – Oberá - Misiones – Argentina  
Proyecto de Investigación: 16/II120-PI*

*e-mail: ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar, kurtz.unam@gmail.com, orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar*

---

### **Resumen**

En este trabajo se analiza la utilización de una picotubina Michell-Banki como máquina impulsora de alternador automotriz y su factibilidad de funcionamiento sin regulador de carga.

La idea principal es el diseño y desarrollo de un pequeño grupo turbo generador hidráulico que pueda ser fabricado íntegramente por la industria local y equipado con elementos fácilmente disponibles, destinado a pequeños consumidores localizados en zonas poco pobladas y con recursos hídricos a su alcance y de esta manera permitir que estos accedan a la energía hidroeléctrica que generaría esta máquina. Se pensó, esencialmente, en una operación y mantenimiento sencillo, y en una disminución de costos con respecto a los arreglos tradicionales de este tipo de aprovechamiento. El campo de aplicación apunta a una gama específica de potencias necesarias en consumidores domésticos y pequeños establecimientos industriales que no tienen fácil acceso a la energía eléctrica.

**Palabras Clave** – Alternador automotriz, Picoturbina, Pequeña turbina hidráulica, PCH, Turbina Banki.

### **1. Introducción**

Una instalación hidroeléctrica se caracteriza, desde el punto de vista económico-financiero, por su elevado costo de inversión inicial y su bajo costo operativo frente a su alternativa de comparación, en general una central térmica convencional, la que posee un elevado costo de funcionamiento y mantenimiento.

Este elevado costo inicial y un real sentido de la disponibilidad de los recursos, hizo que en un principio solo los sitios que ofrecían condiciones óptimas desde los puntos de vista hidráulicos, hidrológicos, geológicos, etc., fueran aprovechados como emplazamientos para generar hidroelectricidad. Sin embargo, el agotamiento de estos lugares, la conciencia de que los recursos no renovables realmente no se renuevan y, por último, unas escaladas de costos en el precio de los combustibles líquidos, cuyo tope no se vislumbra, han hecho revertir las premisas iniciales y así en la actualidad, recursos que anteriormente eran desechados, son nuevamente analizados a la luz de elementos cambiantes de evaluación económica.

La República Argentina, posee recursos hídricos de gran potencial para ser desarrollados a través de pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, como una alternativa para la producción de

energía eléctrica confiable y a bajo costo en sitios aislados, incluso en muy pequeñas potencias. En este contexto juegan un papel fundamental las máquinas de fabricación local y análisis de las diferentes alternativas que tiendan a disminuir los costos de las inversiones iniciales.

Es por eso por lo que en este trabajo se analiza la posibilidad de la utilización de un grupo turbogenerador compuesto por una turbina hidráulica de flujo cruzado o Michell-Banki y un alternador automotriz sin regulador de carga, lo que implicaría una importante reducción de costos y sencillez del sistema de control de la generación.

### 1.1. Alcance del análisis

Para determinar la potencia de un pequeño aprovechamiento hidroenergético se utiliza la siguiente expresión:

$$P_{total} = \eta_{global} \cdot \gamma \cdot Q \cdot H_b \quad (1)$$

Donde:

$P_{total}$  : Potencia total obtenida [W]

$\eta_{global}$ : Rendimiento global del aprovechamiento

$\gamma$ : peso específico del agua [N/m<sup>3</sup>]

$Q$ : caudal volumétrico [m<sup>3</sup>/s]

$H_b$ : Altura o salto bruto [m]

El rendimiento global estará compuesto de distintos rendimientos que evalúan las pérdidas de cada componente del aprovechamiento, se la siguiente manera:

$$\eta_{global} = \eta_{obra\ civil} \cdot \eta_{tuberia} \cdot \eta_{global\ turbina} \cdot \eta_{generador} \cdot \eta_{linea\ electrica} \quad (2)$$

Los valores típicos de estos rendimientos son mostrados en la tabla 1.

**Tabla 1:** valores de rendimientos típicos por componente de una PCH

Componente	Rendimiento
Obra Civil	85%
Tubería	90%
Turbina (hidráulico-mecánico)	60-80%
Generador	85%
Línea eléctrica (incl. transf.)	86%

En este caso en particular, el análisis comprende los puntos que se refieren a la Turbina y el Generador. El generador, en esta oportunidad es un alternador utilizado en automóviles.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la conformación del grupo turbogenerador estará compuesta por una turbina hidráulica de flujo cruzado o Michell-Banki y un alternador automotriz sin regulador de carga [1].

El diseño y desarrollo de este pequeño grupo generador estará orientado siguiendo las siguientes premisas básicas:

- a) Diseño sencillo y económico.
- b) Rendimiento aceptable.
- c) Posibilidades de fabricación en establecimientos industriales locales.
- d) Fácil montaje, mantenimiento y operación de esta.

Todas estas pautas se encuadran dentro del concepto de "Tecnología Apropriada"; este término fue tomado en cuenta seriamente y como objetivo básico es el de un diseño apropiado y adaptado a la capacidad de los pequeños talleres industriales.

### 1.2. De la Turbomáquina Impulsora

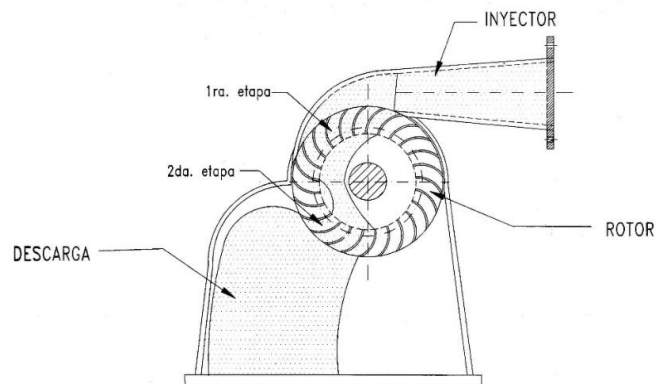
La turbina de Flujo cruzado o turbina Mitchell-Banki es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Basa sus ventajas fundamentalmente en un sencillo diseño y fácil construcción lo que la hace especialmente atractiva en el balance económico de un aprovechamiento en pequeña escala. [2]

Las principales características de esta máquina son las siguientes:

- La velocidad de giro puede ser seleccionada en un amplio rango.
- El diámetro de la turbina no depende del caudal.
- Se alcanza un aceptable nivel de rendimiento con pequeñas turbinas.

El rendimiento máximo de este tipo de turbinas es inferior al 80%, pero mantiene buenas eficiencias cuando el caudal desciende hasta el 20-25 % del nominal, y tiene un mínimo técnico inferior al 10% del caudal de diseño.

La turbina de flujo transversal es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. La turbina consiste fundamentalmente en un rotor de forma cilíndrica que descansa sobre un eje horizontal. Los álabes del rodete están sobre la periferia de este; una tobera de sección rectangular guía el agua hacia el rodete, ya sea vertical u horizontalmente (figura 1).



**Fig. 1. Turbina de flujo transversal. [4]**

Se fijó un rango de alturas y caudales que permita una amplia aplicación en cuanto a recursos disponibles comúnmente. Es así como se fijó un rango de alturas entre 8 y 20 m y un rango de caudales de entre 10 y 100 l/s.

Se han fijado, además, ciertos parámetros límites en cuanto a las características de los elementos que se pretende usar, como ser el rango de potencias de generación no superior a los 5 kW, y por otro lado la velocidad de rotación del alternador que no debe ser inferior a las 1200 r.p.m, teniendo en cuenta la posibilidad de usar un acoplamiento que permita una relación de transmisión de 1:3, por ejemplo, para un acoplamiento por poleas y correas.

### *1.3. Del Generador*

El generador, en esta oportunidad es un alternador utilizado en automóviles equipados como motores de combustión interna, para cargar el acumulador (batería) que suministra el sistema eléctrico del vehículo.

Un alternador vehicular (AVh) o de automotor puede reemplazar las funciones de un generador asincrónico con controlador de tensión y frecuencia de la energía eléctrica, generada en un PAH (*Pequeño Aprovechamiento Hidroeléctrico*), por un conjunto AVh, banco de baterías y conversor DC-AC (*Corriente Continua a Corriente Alterna*). Esto resultara fácil de proyectar, con costos acordes a la potencia del emprendimiento y con tecnología apropiada

En la generación tradicional con máquinas síncronas o asíncronas, accionadas por PCH se deben controlar como mínimo tres variables: caudal, tensión y frecuencia, en cambio con la utilización de Alternador Vehicular (AVh) se debe controlar únicamente la tensión de generación: Esta única variable a controlar hace económico el regulador de tensión [3] [6] [7].

Por las características propias del alternador automotriz de poder generar tensión regulada en un muy amplio rango de velocidades, del orden de 1200 a 20000 r.p.m, hacen innecesario el uso de un controlador de caudal turbinado y como la generación es en corriente continua no necesita regulador de frecuencia y, por último, dada las particularidades del AVh, tampoco hace necesario el uso de un limitador de corriente de carga de las baterías. Ver Fig. 4.

En la tabla 1, presenta un rendimiento del generador del 85%, pero se refiere a un generador de corriente alterna sincrónico. Para el caso de un Alternador Vehicular (AVH) o Alternador Automotriz (AAM) el rendimiento promedio es del orden del 70% a 72%.

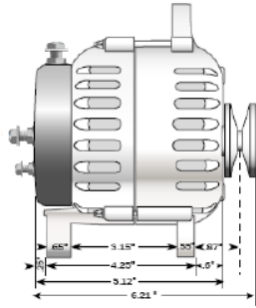


Fig. 2. Alternador automotriz, Victron Energy [9]



Fig. 3. Alternador automotriz, marcas Victron Energy

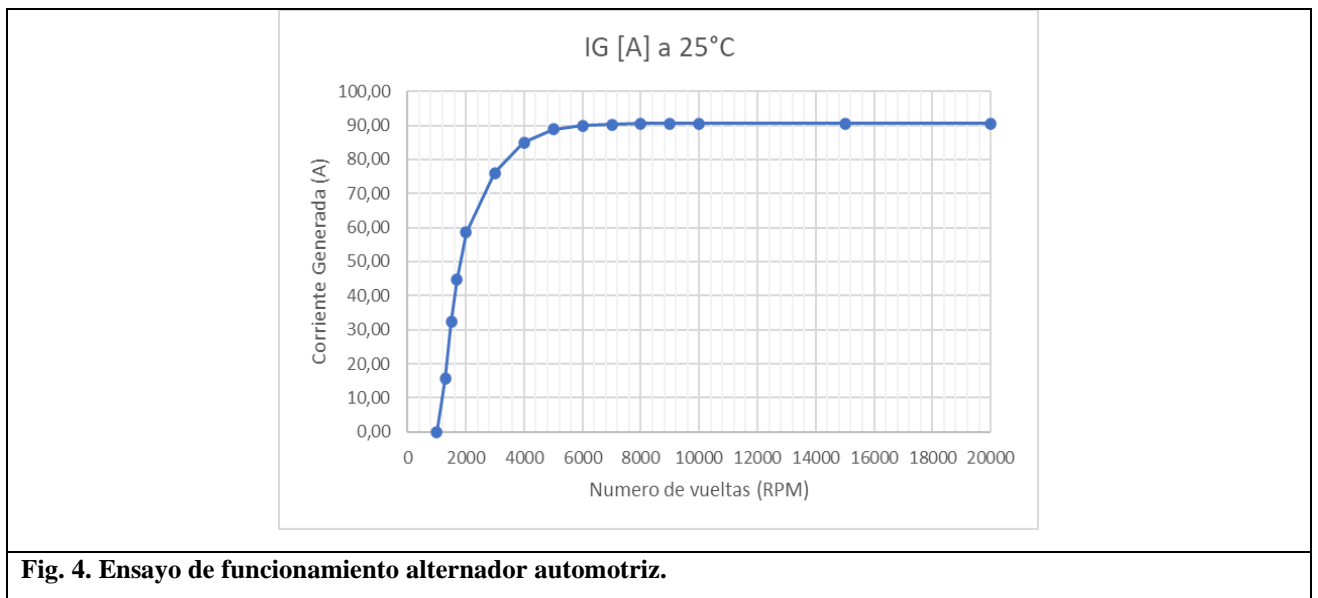


Fig. 4. Ensayo de funcionamiento alternador automotriz.

Gráficos de los ensayos realizados en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNaM, en el entorno del Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE). [8]

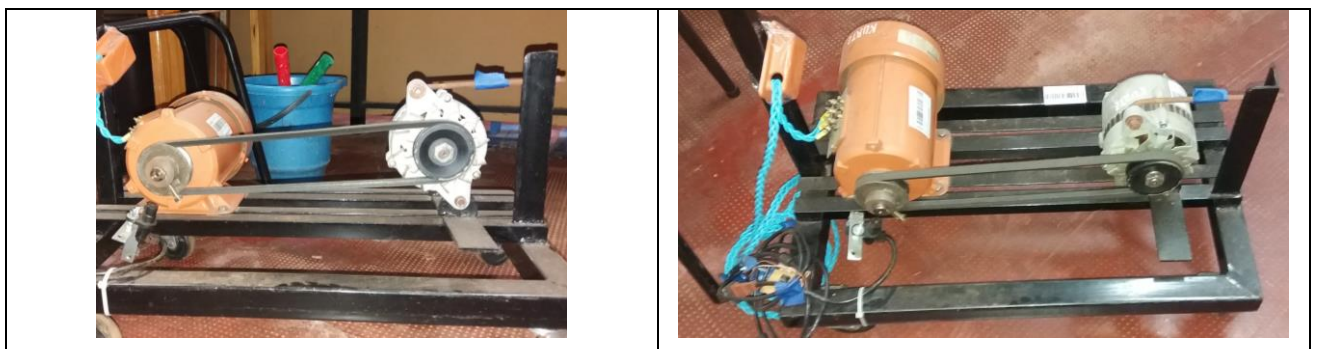
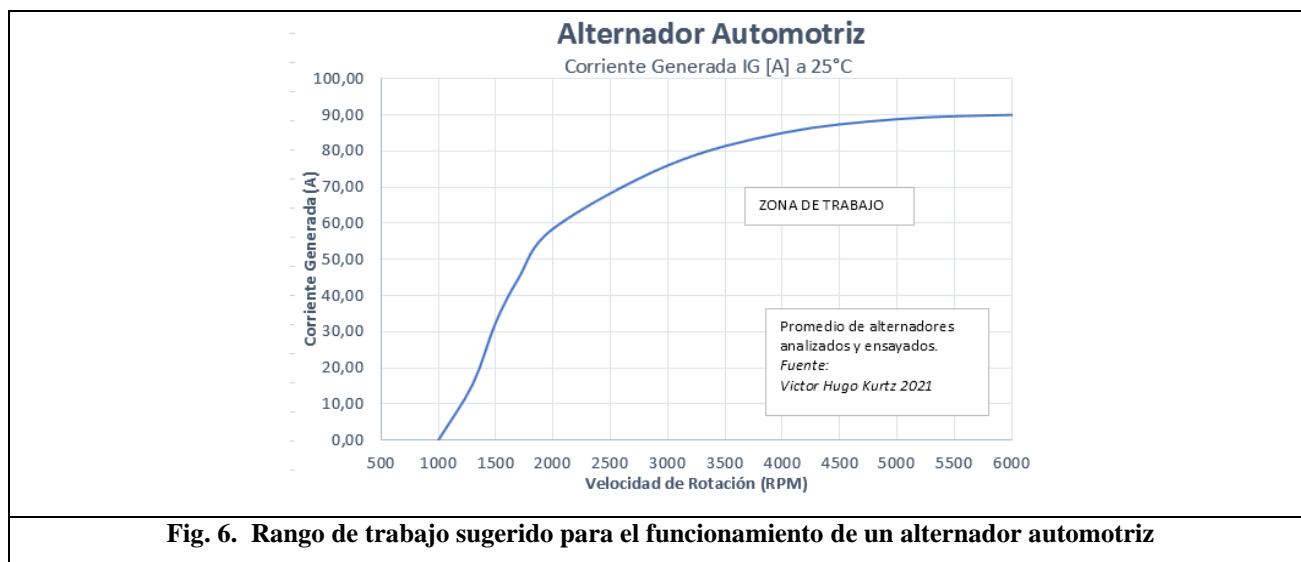


Fig. 5. Vista parcial del banco de ensayo de funcionamiento alternador automotriz.



## 2. Funcionamiento fuera de régimen

Dado que la propuesta es hacer funcionar el Alternador Automotriz (AAM) en todo el rango posible de operación, se hace indispensable un análisis detallado del comportamiento de la máquina impulsora (turbina hidráulica en este caso), para distintas velocidades de operación.

De los valores que componen la expresión (2) surge que el rendimiento global de un microaprovechamiento normalmente es 0.5.

Ésta es una regla aproximada muy útil cuando se considera a las turbinas funcionando con los caudales de diseño, pero no puede aplicarse cuando hay menos agua disponible y la turbina funciona con caudales parciales (por ejemplo, en la estación seca).

Al funcionar con caudales parciales puede haber una reducción en el rendimiento de cada componente, estas ineficacias reducidas se combinan para dar un rendimiento del sistema global muy pobre, a veces tan pobre que no puede esperarse ningún suministro de potencia significativa para los consumidores.

Esta situación es muy común en esquemas eléctricos pequeños desde los generadores de menos de 5 kW pueden transformarse ineficaces cuando operan a bajas potencias.

En el sistema propuesto la flexibilidad del alternador puede salvar, hasta cierto punto, esta debilidad del funcionamiento a cargas parciales debido al amplio rango de operación de las velocidades de rotación.

También, los sistemas de transmisión pierden una cantidad fija de potencia. Es decir, una transmisión de aproximadamente un 95% de rendimiento en un microaprovechamiento de 10 kW pierde 0.5 kW. Si la misma transmisión se usa para transmitir 2.5 kW (un cuarto de la potencia nominal) también perderá 0.5 kW, y su rendimiento es por consiguiente  $(2.5-0.5)/2.5 = 80\%$ .

## 3. Análisis de las velocidades

Todas las turbinas tienen una relación de potencia - velocidad característica y una relación velocidad - eficiencia característica. Para una altura particular estas tienden a funcionar más eficientemente a una determinada velocidad, y requieren un determinado caudal.

En una turbina tipo Banki la velocidad de giro estará dada por [4]:

$$n = 40.62 \cdot k_c \cdot \frac{\sqrt{H_n}}{D} \quad (3)$$

Lo que denota una fuerte dependencia del salto y el diámetro de la máquina.

A veces el dispositivo conducido por la turbina, tal como un generador, requiere una velocidad de rotación mayor que la velocidad óptima de la turbina. Esto conduce a la necesidad de incrementar la velocidad de giro por medio de una transmisión por engranajes o por poleas y correas, ligando a la turbina con el generador. Es preferible minimizar la relación de transmisión para reducir las dificultades y los costos de dicha transmisión. Como regla práctica, se sugiere evitar relaciones de más de 3:1, y procurar no utilizar transmisiones por debajo de 2,5:1.

En el caso de un alternador automotriz (AAM), el amplio rango de velocidades en que puede funcionar agrega una ventaja adicional.

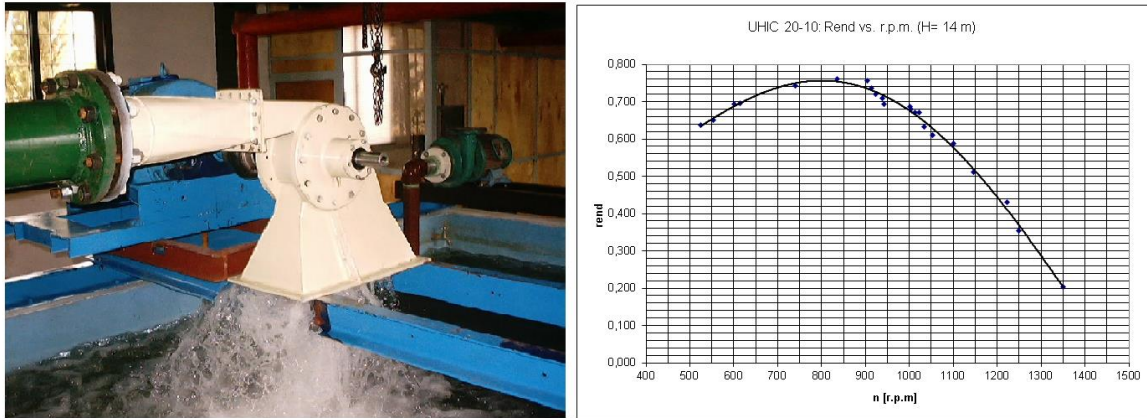
### 3.1. *Velocidad de embalamiento*

Normalmente, en el funcionamiento de una turbina hidráulica acoplada a un generador eléctrico el par motor se mantiene siempre igual gracias al sistema de regulación al par originado por las resistencias pasivas y la carga útil del generador (para el caso de funcionamiento en la modalidad de potencia constante) [1]. Si la turbina queda sin carga y fallan los mecanismos de seguridad que complementan normalmente todo sistema de regulación, la velocidad del grupo aumenta, aumentando el par de las resistencias pasivas hasta que se hace igual al par motor y la aceleración se reduce a cero.

Si no existiesen las resistencias pasivas la aceleración nunca se reducirá a cero y teóricamente se hará infinita, sobreviniendo antes la destrucción del grupo. A la velocidad máxima que adquiere la turbina en marcha en vacío se la denomina velocidad de embalamiento. El rotor del grupo incluyendo el rotor del alternador, ha de estar diseñado para resistir la velocidad de embalamiento.

En las turbinas de flujo transversal la velocidad de embalamiento máxima corresponde, para alturas nominales, a aproximadamente 1,8 veces la velocidad nominal.

Lo interesante de este tipo de turbinas es que mantiene un buen rendimiento en un amplio rango de velocidades de rotación, aún en máquinas que no tienen regulación de caudal, tal como puede verse en la figura 7, donde se observa los valores de ensayo obtenidos de una turbina del flujo transversal ensayada en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas (La.M.Hi.) de la Universidad Nacional del Comahue. [5]



**Fig. 7. Variación del rendimiento en función de la velocidad de rotación en una turbina Banki [3]**

En el caso de la utilización de un alternador automotriz, solo habrá que centrarse en el diseño de la turbina ya que el AVh es capaz de soportar velocidades muy elevadas.

Al no tener regulador de frecuencia, y en el caso de que el banco de baterías haya alcanzado la carga total, el par resistente de la turbina desaparecerá y la máquina alcanzará valores cercanos a la velocidad de embalamiento.

Por lo tanto, el diseño y cálculo de la turbina deberá ser robusto para resistir las mencionadas velocidades.

Se deberá prestar especial atención a las partes móviles de la máquina, como ser el rotor, las soldaduras realizadas y su balanceo. Además, deberán seleccionarse los rodamientos y sellos adecuados para soportar velocidades tan altas como la velocidad de embalamiento.

#### 4. Conclusiones

Conforme a lo estudiado es factible de implementar un turbo generador compuesto por una turbina de flujo transversal y un alternador automotriz. Sin la necesidad de utilizar un sistema regulador de carga

Es importante para esta situación, centrar la atención en el diseño de la turbomáquina, donde resulta importante tienen en cuenta varios factores. Entre ellos; el diseño de la turbina para que soporte las sobre velocidades que se producirán por la falta de regulación de la velocidad de rotación y la ausencia de par resistente cuando el banco de baterías alcance la carga completa.

Esta concepción reduce en un porcentaje importante el costo de la inversión inicial, que en un pequeño aprovechamiento hidroenergético es gravitante.

Este tipo de grupo turbo generador, no solo puede alimentar bancos de acumuladores autónomos, sino que también puede cargar baterías alimentadas por paneles fotovoltaicos (utilizando un sistema gerenciador o administrador específico, que selecciones de la fuente de alimentación primaria). Así, para el caso mixto de generación fotovoltaica e hidroeléctrica. Sería posible cargar las baterías y alimentar a los usuarios durante la noche, cuando no aporten energía eléctrica los paneles solares.



Mientras que, durante el día, cuando los paneles solares entren en operación, alimentando el consumo y carguen las baterías del sistema. La hidrogenación se podría suspender, almacenado agua para turbinar en la siguiente noche.

Esta ultima alternativa, será tema de próximos estudios.

## Agradecimientos

Este trabajo está desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación financiado por la Universidad Nacional del Comahue (UNCo) denominado: *Estudio y Desarrollo de Turbomáquinas y Sistemas Asociados Aplicados a Pequeñas Fuentes de Energías Renovables*, código 04-I229, y del Proyecto de Investigación en conjunto con la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Misiones, código 16/I1120-PI: *Componentes y Dispositivos Electrónicos en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*.

## Referencias

- [1] Kurtz, V.H., Botteron, F. “Alternativa para El Control de Cargas Balasto” Revista, Hidrored - Red Latinoamericana De Micro Energía. Vol. 1 Pag 3-10, ISBN/ISSN: 0935-0578 (2006).
- [2] Ariel R. Marchegiani, Orlando A. Audisio, “Diseño, construcción y ensayo de una turbina de flujo transversal para generación eléctrica en sitios aislados” X Encontro Latino Americano e do Caribe Sobre Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos, 4 a 8 de Mayo, 2003, Poços De Caldas, Minas Gerais, Brasil.
- [3] Kurtz, V.H. “Distintas Alternativas para El Control Automático de La Generación En Pequeñas Centrales Hidroeléctricas” III CADI, IX CAEDI Resistencia Chaco (2016).
- [4] Marchegiani Ariel, "Metodología de diseño y cálculo de una turbina de flujo transversal", Cuadernos de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Noviembre de 1992.
- [5] Marchegiani A. R., Audisio O. A., “Ensayo para la determinación del campo de operación de una turbina Michell-Banki: Reporte final”, Universidad Nacional del Comahue, Noviembre de 2002, Neuquén - Argentina.
- [6] Olsson J.A., Kurtz V.H., Marchegiani A. R., Audisio O. A., “Lineamiento Generales Para La Utilización de Alternadores de Autos, En Microhidrogenación” Jornadas de investigación, Extensión y Vinculación 2012, Facultad de Ingeniería - UNaM Agosto2012.
- [7] Olsson J.A., Kurtz V.H., Marchegiani A. R., Audisio O. A., “Lineamiento Generales para La Utilización de Alternadores de Autos, En Microhidrogenación” 1era Jornadas de Enseñanza de la ingeniería en el NEA, Facultad de Ingeniería - UNaM Septiembre2012.
- [8] Gerber, J.; Olsson J. A; Kurtz, V. H., "Banco de Ensayo para Alternadores Tipo Automotriz". En Jornadas De investigación y Desarrollo, Argentina: UNaM. 2012. 978-950-579-245-0. (Agosto 2012).
- [9] <https://www.victronenergy.com.es/> (Consultado Julio2021)