

## **EXPERIENCIAS EN GENERACIÓN ELÉCTRICA AISLADA POR MEDIO DE PICOTURBINAS HIDRÁULICAS DE BAJO COSTO**

Javier Ramoska, Sergio Antonelli, Pablo Varela, Ariel Manelli, Nelson Cotella

*Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería*  
*Ruta Nacional 36 Km. 601 - 5800 Río Cuarto (Cba.) - Argentina*  
*Tel. (54) 358 4676258 - Fax (54) 358 4676246*  
*[jramoska@ing.unrc.edu.ar](mailto:jramoska@ing.unrc.edu.ar)*

### **RESUMEN**

En la zona de las sierras del sur de la Provincia de Córdoba las posibilidades de contar con energía eléctrica por medio de redes de distribución se encuentran limitadas por el elevado costo de las mismas y la baja densidad poblacional existente. En contrapartida se dispone de numerosos cauces aprovechables para la instalación de pico centrales hidráulicas para generación aislada.

Las posibilidades de instalación de pico centrales hidráulicas para generación aislada, se encuentra limitada por posibilidades técnicas y económicas de las zonas marginales que requieren de este tipo de instalaciones.

En el presente trabajo se aborda el cálculo, el diseño, la fabricación, ensayos e instalación de pico máquinas hidráulicas destinadas a generación eléctrica aislada para abastecer dichas zonas marginales. La metodología desarrollada permite diseñar, fabricar ensayar e instalar pico turbinas aplicables a pequeñas instalaciones que presenten distintas combinaciones de altura – caudal en su salto hidráulico.

La construcción de prototipos, ensayos de laboratorio y de campo de las pico máquinas hidráulicas permitió validar el procedimiento de cálculo, corregir desviaciones y establecer el rango de aplicación de las mismas.

Del análisis de los datos obtenidos de los ensayos en banco y campo se concluyó que el procedimiento de cálculo y diseño es adecuado y factible de extender a distintos tamaños de micromáquinas, y que las variantes tecnológicas de producción que han sido ensayadas, pueden ser adecuadas para este tipo de equipos.

**Palabras Claves:** Picoturbinas hidráulicas, generación aislada, diseño.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las pequeñas estaciones generadoras hidroeléctricas convierten la energía disponible en un salto hidráulico por medio de una turbina y un generador en energía eléctrica. Se utilizan principalmente para abastecer zonas marginales que no son alcanzadas por medio de líneas eléctricas convencionales. Las turbinas de potencias menores a 10 KW, se denominan picomáquinas o pico turbinas hidráulicas.

La instalación de picoturbinas es factible donde se existe un cauce aprovechable y la necesidad de electricidad [1]. El potencial pico hidroeléctrico y los beneficios económicos y sociales se pone de manifiesto en zonas rurales aisladas [2]. Aquí se destaca la baja contaminación y el reducido costo de operación que trae aparejado el uso y aplicación de este tipo de aprovechamientos [3].

En el Laboratorio de Máquinas Térmicas e Hidráulicas (LMTH) de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), se llevan a cabo trabajos cuyo objetivo es sistematizar una metodología de cálculo, diseño, fabricación y ensayos de pico turbinas hidráulicas destinadas a generación de energía eléctrica para consumidores aislados. Ensayos realizados en pequeñas instalaciones nos permitieron validar lo realizado y satisfacer los requerimientos energéticos de zonas rurales marginales [4, 5].

Las diferentes combinaciones de altura y caudal disponible en los cauces, lleva a innumerables combinaciones entre potencias obtenibles y tipos de turbinas (Francis, Pelton y Axial o Hélice). Esto conduce a una difícil estandarización de un tipo constructivo de máquina, ya que la potencia disponible depende del producto entre la altura y el caudal disponible y el tipo de máquina necesario, de la relación entre estos parámetros. Esto trae aparejado un elevado costo de producción. El diseño de cada máquina debe realizarse en conjunto con la selección del procedimiento de fabricación adecuado para disminuir los costos de elaboración y mantenimiento de la misma, los que aunados a una adecuada vida útil, conducen a una máquina de un costo razonable [6].

## **2. DESARROLLO DE PICOTURBINAS HIDRÁULICAS**

Los métodos de cálculo y diseño de las máquina hidráulicas tuvieron una rápida evolución en los últimos años. Con la asistencia de la computadora [7] se optimizaron los métodos de cálculo y predicción de condiciones de funcionamiento, lográndose así prototipos de alto rendimiento en la transformación energética [8], con costos de desarrollo reducidos.

El proyecto hidráulico contempló la obtención de las características geométricas de los elementos destinados a la conversión de la energía (rotor y estator). Esta metodología de cálculo se sustentó en los principios de la dinámica de los fluidos, de las turbo máquinas hidráulicas, de la mecánica estructural, de la ciencia de materiales y de la tecnología de fabricación.

Mediante el uso de programas de cálculo asistido por computadora [9] y la dinámica de fluidos computacional (CFD) [10], fue factible evaluar distintas alternativas de diseño y condiciones de

operación de las pico turbinas hidráulicas [11] permitiendo así obtener diseños de alto rendimiento en la transformación energética. Esta metodología de trabajo se esquematiza en la figura 1, siguiéndose los pasos que a continuación se detallan para llegar a obtener una picoturbina hidráulica como producto final.

- A. El procedimiento utilizado para llevar a cabo el cálculo, diseño y dimensionamiento de la micromáquina hidráulica se puede resumir en las siguientes etapas:
- i. Relevamiento de los parámetros del salto hidráulico disponible, (Q) (H).
  - ii. Selección de la configuración de la infraestructura para el aprovechamiento.
  - iii. Cálculo del salto neto ( $H_n$ ).
  - iv. Determinación del número específico de revoluciones de la máquina hidráulica.
  - v. Selección del tipo de turbina (Francis, Pelton Kaplan,).
  - vi. Cálculo de los triángulos de velocidades de la máquina hidráulica.
  - vii. Determinación de las dimensiones del rodete, y la geometría de los alabes.
  - viii. Diseño del ingreso y egreso del fluido del fluido a la máquina.
  - ix. Generación del modelo completo del sistema en CAD con los datos anteriores.
- B. Simulación Numérica: A partir del modelo de la turbina, se realiza un análisis de forma diferencial del comportamiento para un rango determinado de condiciones de operación de Salto Hidráulico (H) y Caudal (Q).
- C. Datos de Simulación: La simulación numérica genera una gran cantidad de datos que se procesan para obtener las características de funcionamiento de la pico turbina.
- D. Evaluación de datos obtenidos mediante las simulaciones: Con los gráficos que describen el comportamiento de la turbina se determina si el diseño cumple con los requerimientos de la aplicación, si esta etapa es satisfactoria, se procede a la construcción del prototipo, de lo contrario se vuelve al punto A para realizar ajustes al diseño conducentes a optimizar la pico máquina hidráulica.
- E. Construcción o materialización: En esta etapa se materializa el diseño de la máquina generando un prototipo, para ello se cuenta con el auxilio de centros de mecanizado a control numérico, sistemas de soldadura de termoplásticos [12], entre otros
- F. Ensayo de prototipo y Adquisición de Datos: Con el prototipo materializado se procede al ensayo de este mediante el banco de laboratorio para un rango determinado de condiciones de operación de Salto Hidráulico, altura manométrica (H) y Caudal circulante (Q).
- G. Procesamiento de datos obtenidos mediante los ensayos y evaluación de los resultados: El ensayo del prototipo genera una variedad de datos que describen el comportamiento del prototipo.
- H. Correcciones: Basados en los resultados obtenidos en el ensayo en el caso de que estos resultados no sean los esperados se realizan las correcciones necesarias en el diseño, y

en el caso de que los resultados sean los esperados se procede a realizar la estandarización de la máquina.

La figura 1 muestra un diagrama, con las operaciones necesarias para obtener un prototipo industrializable.

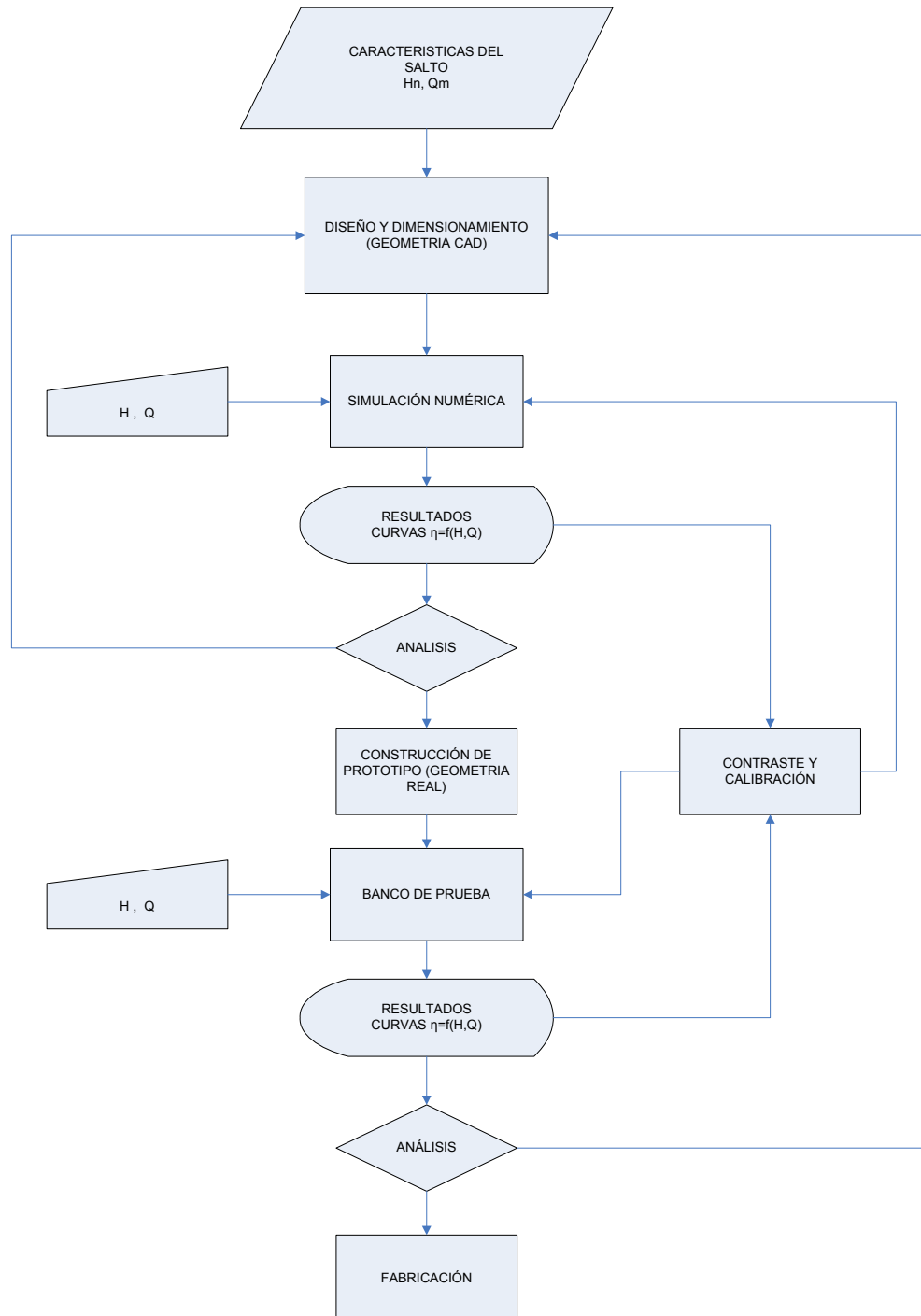


Figura 1 Diagrama del procedimiento utilizado para la obtención de Micro turbinas Hidráulicas

Mediante la aplicación de este proceso de cálculo, diseño y fabricación, se llegó a la construcción de prototipos, los que posteriormente a los ensayos de laboratorio [13], dieron lugar a las correcciones necesarias para optimizar el diseño final y así llegar a la fabricación a escala industrial de picomáquinas hidráulicas. A continuación se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos en base a los procedimientos descriptos anteriormente:

### 2.1. Desarrollo de una pico turbina hidráulica tipo axial.

La máquina estudiada es de bajo número específico de revoluciones, propio de una máquina con rodete de hélice [14], diseñada para una altura efectiva de 3m y un caudal nominal de 180 m<sup>3</sup>/h, entrega un 1KW de potencia, girando a 2000 RPM [4].

Como paso preliminar al diseño se procedió a la simulación de flujo en la turbina axial, esta fue realizada mediante la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes para flujos de fluidos laminares y turbulentos incompresibles [15], considerando a la turbina en régimen estacionario. Se utilizó en el caso de regímenes turbulentos, el modelo  $k-\epsilon$  [16]. La simulación se realizó utilizando los modelos obtenidos por medio de programas de diseño asistido por computadora (CAD) de las piezas componentes de la turbina: rotor, distribuidor y tubería. Estos son desarrollados como sólidos tridimensionales mediante un sistema CAD, figura 2a.

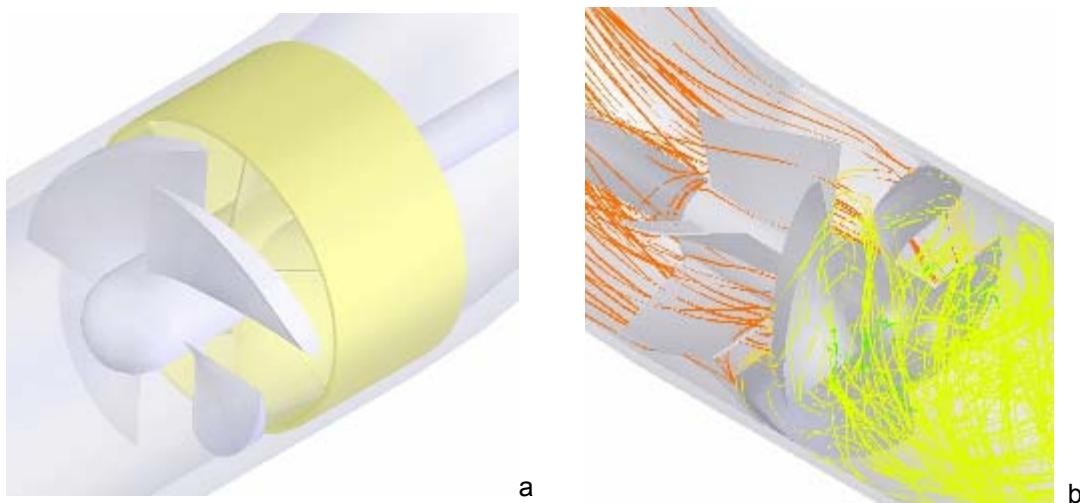


Figura 2. a) Diseño del rotor y estator de la máquina hidráulica.  
b) Campo de velocidades obtenido por simulación.

Para la resolución de las ecuaciones se establecieron las condiciones de borde como paredes fijas, rugosidad, velocidad de giro de las paredes rotacionales (rotor). Con el planteo de los objetivos para el control de la convergencia se inicializó el cálculo, el cual luego de las iteraciones necesarias convergió a la solución deseada. En la figura 2b, se presenta la distribución del campo de velocidades para un caso dado.

Del cálculo numérico se obtuvo la cupla producida en el eje de la máquina y la potencia factible de transferir. Por otro lado se observan las características del fluido al circular por el desarrollo del perfil alar de los álabes [17] verificando ángulos de entrada y salida como también posibles desprendimientos del fluido sobre las superficies del perfil.

### **2.1.1. Construcción e instalación de la máquina axial.**

En la figura 3a se muestra la pico máquina obtenida y en condiciones de ser instalada. Los elementos destinados a la conversión de energía se realizan por inyección de polipropileno reforzado con fibras de vidrio en una matriz de acero. La carcasa de aluminio colado esta dividida en dos secciones, una en forma curva y la otra cilíndrica, bridadas entre si.

Uno de los cauces donde se instaló la picoturbina presenta grandes crecientes de corta duración con la consiguiente inundación de la máquina y embate de sólidos de gran porte arrastrados por el agua. Este hecho condujo a una instalación no convencional de la turbomáquina, según se observa en la figura 3b. La disposición de la turbina en la zona superior de la presa evita los inconvenientes derivados de las crecientes, aquí la turbina trabaja con carga hidráulica mínima y elevada depresión en el desfogue. Mediciones realizadas in situ demuestran que las prestaciones de la máquina no se ven afectadas por esta disposición, y luego de dos años de operación no se observan daños producidos por cavitación.



a



b

*Figura 3. a) Picoturbina construida.*

*b) Picoturbina instalada en forma experimental en las sierras del sur de Córdoba.*

### 2.1.2. Sistema eléctrico y de regulación.

El microturbina esta acoplada a un generador de imanes permanentes, de tres pares de polos, gira a 2000 RPM, entregando 48 V nominales a 100 Hz en tres fases.

La corriente eléctrica producida por el generador se rectifica y almacena en baterías de acumuladores las que actúan como reservorio de energía eléctrica para entregarla cuando el consumo excede la potencia del generador.

Como se trata de un sistema hidráulico sin embalse, toda el agua captada es transformada en energía eléctrica. Un regulador de carga de las baterías deriva el excedente de energía eléctrica a una resistencia de disipación cuando estas están a plena carga. Con esto se evita la necesidad de implementar un control del caudal de ingreso a la turbina lo que agregaría mayores costos a la obra [5].

### 2.1.3. Ensayos de Laboratorio.

Los datos obtenidos en el banco de ensayos del laboratorio pueden resumirse en el diagrama colinar presentado en la figura 4, donde se correlaciona en un mismo grafico rendimiento, altura y caudal [5].

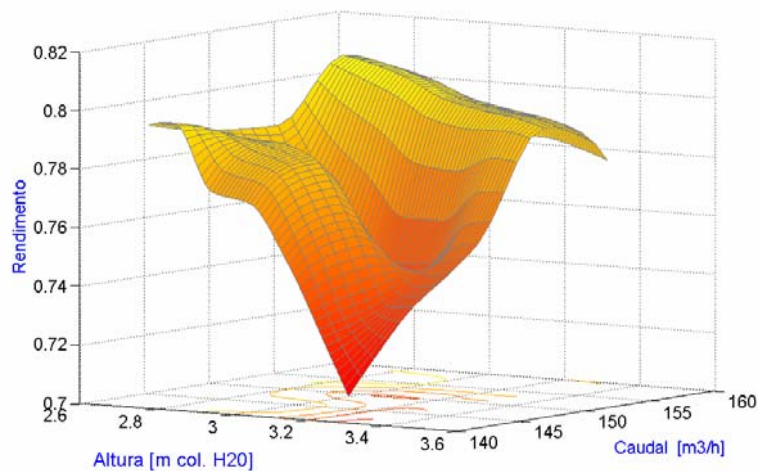


Figura 4. Diagrama rendimiento altura – caudal para turbina axial.

El rendimiento de la transformación energética, cercano al 80%, obtenido de la transferencia de energía agua - rodete. Este rendimiento es adecuado para pico turbinas [18], a este valor deben descontarse las pérdidas en el eje para obtener la potencia mecánica efectiva y las pérdidas en el generador para obtener la potencia eléctrica en bornes.

Los resultados de la simulación, luego de los ajustes correspondientes en el modelo y las condiciones de borde y externas concuerdan, con reducido margen de error para las condiciones estudiadas, con lo obtenido en el banco de ensayos de la máquina.

## 2.2. Desarrollo de una pico turbina hidráulica tipo Francis.

En este caso particular estudiado los parámetros de cálculo son: 17 metros de altura efectiva y 50 m<sup>3</sup>/h de caudal circulante, estos parámetros conducen a un número específico de revoluciones propio de una máquina tipo Francis lenta ( $n_s = 80$ ). Con este diseño se obtuvo una máquina con un 1,5 KW de potencia en el eje para una velocidad de giro del generador de 2000 RPM y un rendimiento de la transformación energética estimado del 80 %.

En la figura 5a se muestra el diseño del ensamble de la máquina hidráulica dentro de su carcasa. En la figura 5b se muestra la construcción en un centro de mecanizado asistido por control numérico del rodete, con un diámetro de 120 mm perteneciente al prototipo de la máquina. El distribuidor de esta máquina también fue construido en bronce por medio de mecanizado.

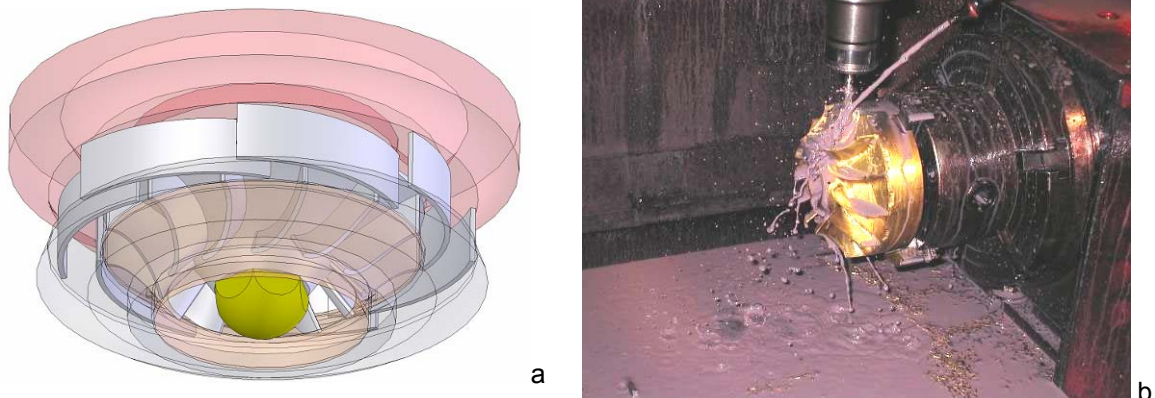


Figura 5 a) Diseño de la máquina hidráulica b) mecanizado del rotor en CNC.



Figura 6 a) Rodete ensamblado b) Máquina hidráulica instalada y operando.

Posteriormente a la construcción de las partes componentes, se procedió al ensamble de la turbomáquina. Para ello, y a efectos de disminuir costos y tiempo de ejecución, se adoptó la voluta de una bomba centrífuga de fabricación comercial, cuyas dimensiones se adaptaron a los requerimientos de este caso en particular.

En la figura 6a se puede observar el rotor terminado y ensamblado al eje (no se incluye el distribuidor). La máquina instalada y operando en las sierras de Córdoba se presenta en la figura 6b en el momento de tomar la fotografía se estaba midiendo la presión reinante en la voluta.

### **3. CONCLUSIONES**

Este trabajo muestra que fue posible realizar el diseño, simulación, fabricación, ensayos e instalación de pico turbinas hidráulicas destinadas a proveer de energía eléctrica a zonas excluidas de la red de distribución.

Se estableció un proceso que permite obtener rápidamente el diseño mas adecuado a cada aplicación. Las simulaciones por computadora son una importante herramienta, otorgando rapidez al momento de evaluar distintas alternativas de diseño y/o analizar distintas condiciones de operación, resolviendo las ecuaciones que gobiernan el flujo en las máquinas.

Con los resultados de los ensayos de banco y campo se procedió al ajuste de los modelos computacionales y de las máquinas fabricadas.

Del análisis del proceso se concluyó que el procedimiento de cálculo y diseño es adecuado, habiéndose ensayado distintas variantes tecnológicas aplicadas al proceso de fabricación.

### **4. REFERENCIAS**

- 
- [1] Ecoliving New Zealand "Water turbine installation: A case study", **17** pp 6-10, 2003.
  - [2] Khennas S. y Barnett A. "Best Practices for Sustainable Development of Micro Hydro Power in Developing Countries Final Synthesis Report". The Department for International Development, UK and The World Bank, 2000.
  - [3] BC Hydro. "Handbook for Developing MICRO HYDRO In British Columbia" 2004.
  - [4] Cotella, N. Varela, P. Villagra, O. y Kohl, R. "Diseño y construcción de una microturbina hidráulica de 1 KW". Avances en energías renovables y medio ambiente Vol. **6**, Nº 1. PP 11-15, 2002.
  - [5] Cotella N. Antonelli S. Baglioni M. Ramoska J. "Diseño, Construcción y Ensayos De Una Picoturbina Hidráulica". Primer Congreso Nacional de Hidrógeno Y Fuentes Sustentables De Energía HYFUSEN; San Carlos de Bariloche, 2005.
  - [6] Cotella N. G., Antonelli S. F., Varela P. G., Manelli A. H., Ramoska J. A. Propuestas Para La Reducción De Costos En La Fabricación De Picoturbinas Destinadas A Generación Eléctrica Aislada. Hyfusen. Posadas. 2007

- [7] Göde, E. y Cuénod R. "Numerical simulation of flow in a hydraulic turbine. Sulzer-Escher Wyss – Internal communication" –Zurich – Switzerland 1998.
- [8] Klimovich, V. "On the optimal design of the form of hydro turbine impeller blades". The B.E. Vedeneev all Russian Research Institute of Hydraulic Engineering (VNIIG). **13**, pp 29-35,1997.
- [9] Ruprecht, A., Eisinger R., Göde, E "Innovative Design Environments for Hydro Turbine Components" Institute for Fluid Mechanics and Hydraulic Machinery (IHS) University of Stuttgart Pfaffenwaldring 10 70550 Stuttgart, Germany. 2000.
- [10] Ferziger J. and Peric M. "Computational Methods for Fluid Dynamics". Springer. 2002.
- [11] Eisinger, R., Ruprecht A. "Automatic shape optimization of hydro turbine components based on CFD" Report of Institute of Fluid Mechanics and Hydraulic Machinery. University of Stuttgart. Germany. 2005.
- [12] P. G. Varela, M. A. Kunusch Micone, C. A. Barbero, "Utilizacion De Ultrasonidos Para La Determinacion De Calidad De Soldaduras Realizadas En Polimeros termoplásticos Utilizando Polimeros Conductores Y Microondas". Congreso Binacional SAM-CONAMET Jornadas ME-MAT 2005, Trabajo N° 236. Mar del Plata,. ISBN 987-22443-0-8. 2005.
- [13] Cotella N., Varela P. Antonelli S., Ramoska J, Manelli A "Desarrollo De Picoturbinas Hidráulicas De Reducido Costo Para Generación Eléctrica Aislada". En la revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. N° **10** pp 45-51. ISSN 0329-5184. Argentina 2006.
- [14] Polo Encinas M. "Turbomáquinas hidráulicas" Ed. Limusa. pp 102-103. 1976.
- [15] Papanastasiou T. and Georgiou G. "Viscous Fluid Flow" CRC Press – pp 205-206. 1999.
- [16] Launder, B. y Spalding D., Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, New York, p 97. 1972.
- [17] Roth, M and Peikert, R "Flow visualization for turbomachinery design" Swiss Center for Scientific Computing, ETH Zürich, Switzerland. <http://www.scsc.ethz.ch/SV/turbo>. 1996.
- [18] Marchegiani, A. Audisio O. Ensayos de una turbina de flujo axial de fabricación local Memorias del XIII Encuentro Latinoamericano y del Caribe sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos. 1999.