

# Aplicaciones de Energías Renovables para Pequeña Escala.

## Applications of Small Scale Renewable Energy.

Teresa Reyna, Dr., María Lábaque, Mag., Santiago Reyna, PhD., César Riha, Ing., Florencia Grosó.

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.  
teresamaria.reyna@gmail.com, mlabaque@gmail.com.

--Recibido para revisión 2014, aceptado fecha, versión final 2014--

**Resumen**— La promoción de tecnologías de energías renovables ofrece doble ventaja: diversificación energética y la esperanza de desarrollo para comunidades pobres y aisladas que no están conectadas a las grillas de transporte y distribución eléctrica. El suministro de energía a las comunidades aisladas se concibe como soporte a las actividades productivas, domésticas y comerciales y es considerado como un componente estratégico dentro de un marco de trabajo para el desarrollo.

Dentro de este contexto se vienen desarrollando máquinas hidráulicas en pequeña escala que puedan instalarse en los diferentes sitios de la provincia de Córdoba, Argentina y que puedan desarrollarse completamente en forma local. En este artículo se describen las principales características adoptadas para el desarrollo y construcción en la Universidad Nacional de Córdoba de dos micro turbinas: Michell - Banki y Hélice. Se describen también las simplificaciones adoptadas para hacerlas accesibles tecnológicamente y económicamente.

**Palabras Clave**— Microturbinas, Generación aislada, energías renovables, micro aprovechamientos hidráulicos.

**Abstract**— Promoting Renewable Energy Technologies offers two advantages: Energy Diversification and Development Hope for poor communities and isolated that are not connected to the grids of transport and electricity distribution. The power supply to the Isolated Communities is conceived as Support for productive activities, domestic and commercial and is considered as a strategic component within the framework development.

Within this context come developing small scale hydraulic machines that may, installed in different sites in the province of Córdoba, Argentina and may they fully developed locally. This article describes the main characteristics adopted for the development and construction in the National University of Córdoba two microturbines: Michell - Banki and Propeller. Simplifications adopted to make them

accessible technologically and economically are also described.

**Keywords**— Microturbines, Isolated Generation, renewable energy, micro hydroelectric facilities.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los servicios energéticos han fomentado el desarrollo económico y mejorado el nivel de vida de la población, con efectos positivos sobre el desarrollo.

Existen diversas áreas no urbanas y rurales marginales que presentan inconvenientes en el suministro eléctrico por medio de líneas convencionales de distribución. Lo que conduce a que estos habitantes no gocen de los beneficios que provee la electricidad. Las micro centrales pueden ser construidas por personal local y organizaciones más pequeñas locales, con el ahorro en el costo de las líneas de transmisión.

En Argentina existe un alto potencial de fuentes energéticas renovables. Entre las principales razones que explican la falta de explotación de los micro-aprovechamientos se encuentran la falta de acceso a tecnologías confiables y de bajo costo, la inexistente capacidad local para la evaluación, planificación, diseño e implementación de sistemas de generación, la poca confianza sobre la sostenibilidad de los pequeños sistemas en zonas aisladas, así como también la falta de políticas y estrategias nacionales o regionales que permitan su adecuada promoción, implementación y manejo.

Por otra parte no es común experimentar a pequeña escala ya que la micro-generación de energía se considera una actividad no rentable.

Hace unos años, la utilización de energías renovables era casi exclusiva de ambientalistas y personas que no tenían acceso a otro tipo de energía pero poco a poco se está transformando en un buen negocio.

Como se sabe la energía se convierte y se hace con un grado de eficiencia muy pobre (con muchas pérdidas en calor). Una central eléctrica térmica (carbón o petróleo) tiene una eficiencia del 30%. Además, las líneas de transmisión y distribución eléctrica pierden cerca del 10%.

Las pérdidas sucesivas de la cadena de transporte y conversión hacen que el uso de energía generada en un lugar y transportada a otro sea muy ineficiente. Lo mejor es generarla en el lugar en que se consume (generar para el consumo propio) [2].

En 1970, una turbina que generaba energía eléctrica desde gas natural, requería cerca de 4000 kilocalorías por cada kWh generado. Hoy requiere 2500 kcal/kWh y con ciclo combinado (turbina de vapor y gas en serie para aprovechar los gases calientes) requiere solo 1500 kcal/kWh.

La eficiencia es uno de los indicadores de la bondad de una máquina. Incluso el concepto puede ser usado para los alimentos: de cada 10 unidades de energía en combustible fósil usado para producir alimentos solo una unidad en promedio llega como producto comestible a la mesa del consumidor. El resto se pierde durante la producción, transporte y distribución.

La eficiencia en las energías renovables puede tener otro tipo de implicancias. Una celda fotovoltaica tiene una eficiencia de conversión de radiación en electricidad entre 10 y 40%, dependiente de su estructura interna. Y esto impacta en la superficie necesaria que debe ocuparse para producir la misma cantidad de energía.

En este aspecto el uso de la energía hidroléctrica a través de microturbinas tiene la gran ventaja de permitir que el punto donde se transforma la energía hidráulica en energía eléctrica se encuentre cerca de los puntos de consumo.

Cuando se trata de realizar nuevas inversiones en fuentes de energía se requiere una comparativa de alternativas. Dado que cada fuente de energía tiene su listado de ventajas y desventajas es conveniente definir indicadores numéricos que permitan una comparación más precisa.

Se pueden mencionar los siguientes indicadores económicos y ambientales que permitan analizar las distintas posibilidades de fuentes de energía. [2].

- Costo por unidad de energía (costo financiero)
- Costo Ambiental
- Tiempo de retorno energético (la recuperación de los costos)

Con respecto al tiempo de retorno energético se pueden definir diferentes formas de repago: el ambiental y el monetario. El punto de vista ambiental se aplica a las energías renovables no

contaminantes. Se define como el tiempo necesario para compensar las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas durante la fabricación de los equipos y que son ahorradas durante el uso. Por ejemplo, a un generador solar térmico (agua caliente domiciliar) se lo compara con un termostanque a gas. En la fabricación del equipo solar térmico se genera una cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente a 1,5 años de trabajo de un termostanque a gas natural.

## 2. HIDROELECTRICIDAD

La Hidroelectricidad es una tecnología madura. Las turbinas hidráulicas tienen eficiencias globales del orden del 90%, en el punto de máxima eficiencia. Esto la distingue de las otras energías renovables.

Lo novedoso en la hidroelectricidad tiene hoy mucho que ver con dónde aplicarla, en qué escala y cómo se resuelve el problema de la generación vinculada a otros sistemas de energías alternativas. Sin embargo su evolución no ha terminado, sino que se adecua hoy a las necesidades de la energía limpia puesto que los sitios disponibles exigen turbinas más compactas y obras menos impactantes.

### 2.1. Potencial Hidroeléctrico en Argentina

El potencial hidroeléctrico nacional está parcialmente aprovechado. De 170.000 GWh/año identificados, solo 38.000 corresponden a centrales en explotación, previstas o en construcción. El resto, pertenece a un heterogéneo conjunto de estudios y proyectos en necesidad de ser actualizados. El conjunto aludido incluye un gran número de pequeñas centrales (de hasta 15 MW) de gran relevancia para el desarrollo local y regional.

La capacidad hidroeléctrica instalada total fue de 9735 MW en 2002, proveyendo 34.000 GWh de energía en el mismo período. Dentro de este total están incluidos 675 GWh provenientes de alrededor de 60 pequeñas centrales con una potencia sumada que ronda los 180 MW, incluidas 20 micro y mini centrales pertenecientes a varios sistemas eléctricos rurales aislados servidos básicamente por grupos diesel [4].

## 3. VENTAJAS AMBIENTALES DE LA MICROHIDROELECTRICIDAD

Existe una concientización cada vez mayor sobre los efectos medioambientales que conlleva el actual sistema de desarrollo económico, como son el cambio climático, la lluvia ácida o el agujero de la capa de ozono.

Las sociedades modernas, que sustentan su crecimiento en un sistema energético basado principalmente en la obtención de energía a través

de combustibles fósiles, se inclinan cada vez más hacia la adopción de medidas que protejan nuestro planeta. Así lo reflejan las actuales políticas nacionales y los acuerdos y tratados internacionales que incluyen como objetivo prioritario un desarrollo sostenible que no comprometa los recursos naturales de las futuras generaciones [5].

Actualmente las energías renovables han dejado de ser tecnologías caras y minoritarias para ser plenamente competitivas y eficaces de cara a cubrir las necesidades de la demanda. Dentro de estas energías renovables se encuentra la energía hidroeléctrica, como principal aliado en la generación de energía limpia y autóctona.

Dentro de este contexto la hidroelectricidad realizada con micro centrales ofrece ventajas sobre otras fuentes de energía:

- Disponibilidad: El ciclo del agua lo convierte en un recurso inagotable.
- Energía limpia: No emite gases "invernadero", ni provoca lluvia ácida, ni produce emisiones tóxicas.
- Energía barata: Sus costes de explotación son bajos, y su mejora tecnológica hace que se aproveche de manera eficiente los recursos hidráulicos disponibles.
- Trabaja a temperatura ambiente: No son necesarios sistemas de refrigeración o calderas, que consumen energía y, en muchos casos, contaminan.

#### 4. ALTERNATIVAS DE USO DE MICROTURBINAS

Las turbomáquinas son máquinas rotativas que permiten una transferencia energética entre un fluido y un rotor provisto de álabes, mientras el fluido pasa a través de ellos [1].

El intercambio de energía se verifica por una acción mutua (acción y reacción) entre las paredes de los álabes y el fluido. [2].

Cada tipo de turbina solo puede trabajar con caudales comprendidos entre el nominal (para el que el rendimiento es máximo) y el mínimo técnico por debajo del cual no es estable [3].

Un caudal y una altura de salto definen un punto en el plano que reúne las envolventes operacionales de cada tipo de turbina. Cualquier turbina dentro de cuya envolvente caiga dicho punto, podrá ser utilizada para las condiciones de diseño. La elección final será el resultado de un proceso iterativo, que balancee la producción anual de energía, el costo de adquisición y mantenimiento, y su fiabilidad. (Figura 1).

Desde la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba se vienen desarrollando proyectos vinculados a

diseños, construcción e instalación de microturbinas poniendo énfasis en la accesibilidad de construcción con mano de obra local sin alto grado de especialización.

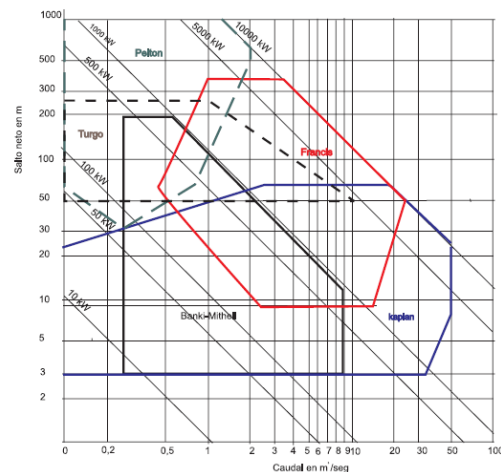


Figura 1. Clasificación de las turbinas en función del salto [3].

Las máquinas desarrolladas en la universidad han sido dos:

La primera es una Michell-Banki a escala 1:1 la cual está instalada en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad sobre la que ya se realizaron modelaciones numéricas de los álabes para determinar ajustes en los diseños.

La segunda es una micro turbina Hélice. Ésta turbina se encuentra actualmente en etapa de ajuste de diseño y en breve se comenzará su construcción.

El diseño de ambas turbinas se basó en la elección de un modelo que cumpla con un alto rendimiento, un bajo costo de fabricación, instalación, explotación y mantenimiento.

Se consideraron en el diseño las facilidades de instalación y mantenimiento de la máquina para un usuario común sin la intervención de mano de obra altamente especializada.

En el diseño se consideraron los siguientes elementos los elementos que participan de manera directa en la transferencia de energía, formado por el rodete y corona de álabes fijos.

Respecto al rodete es necesario definir sus dimensiones geométricas, número y disposición de los álabes.

Para la corona de álabes fijos se define también las dimensiones geométricas, número y disposición de los álabes.

También es necesario definir elementos auxiliares como son la carcasa, los rodamientos, y los sellos, entre otros. Se debe realizar la selección de rodamientos y sellos.

Para la carcasa se definen sus dimensiones geométricas.

Como se realiza habitualmente el diseño toma como punto de partida los métodos usados para máquinas de mayor porte, los que luego son adaptados a las necesidades particulares del área de micro turbinas hidráulicas.

Se busca como resultado la realización de una máquina de bajo costo del que se espera una óptima eficiencia y duración.

Se busca elevar el rendimiento de la turbina y disminuir costos de fabricación por medio de la optimización de la velocidad de pasaje del fluido por la máquina.

Con el diseño de micro turbinas hidráulicas es primordial y decisivo los costos de su fabricación y mantenimiento.

Es por ello que la máquina proyectada no debe perder de vista el procedimiento de fabricación específico para este tipo de equipos, a efectos de minimizar costos de manufactura y mantenimiento.

Las tolerancias dimensionales y las rugosidades superficiales deben minimizarse, al tratarse de equipos de reducidas dimensiones donde los errores relativos se vuelven importantes.

Esto toma capital importancia en la construcción de los elementos destinados a realizar la conversión de la energía hidráulica en mecánica, siendo necesario que estos sean precisos dimensionalmente en un todo a los resultados del diseño y que su terminación superficial (rugosidad) sea adecuada al tamaño de la máquina, sin descuidar el costo de la máquina misma.

Los materiales que componen la turbina deben ser los adecuados para soportar unas posibles condiciones de cavitación durante el mayor tiempo posible, que será el que transcurra hasta que se detecte el fallo. También deben cumplir los requisitos de resistencia frente a las sollicitaciones a las que van a estar sometidos y que se calcularán más adelante.

Por último, deben ser materiales fáciles de soldar.

## 5. TURBINA MICHELL- BANKI

La turbina Michell-Banki es una máquina clasificada como una turbina de acción, entrada radial y flujo transversal. Utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, sus ventajas principales están en su sencillo diseño y su fácil construcción, lo que la hace atractiva en el balance económico de un aprovechamiento a pequeña escala [6].

Las principales características de esta máquina son las siguientes:

- La velocidad de giro puede ser seleccionada en un amplio rango.

- Puede operar en amplios rangos de caudal y altura sin variar apreciablemente su eficiencia.
- El diámetro de la turbina no depende necesariamente del caudal.
- Se alcanza un aceptable nivel de rendimiento con pequeñas turbinas.
- Se puede regular el caudal y la potencia por medio de un álabe ajustable.
- Su construcción es sencilla, pudiendo ser fabricada en pequeños talleres.

La turbina de flujo transversal es especialmente apropiada para ríos con pequeños caudales, que generalmente llevan durante varios meses muy poca agua

La energía del agua es transferida al rotor en dos etapas, lo que también da a esta máquina el nombre de turbina de doble efecto, y de las cuales la primera entrega un promedio del 70% de la energía total transferida y la segunda alrededor del 30% restante (Figura 2). Finalmente, el agua es restituida mediante una descarga a presión atmosférica (grado de reacción igual a cero).

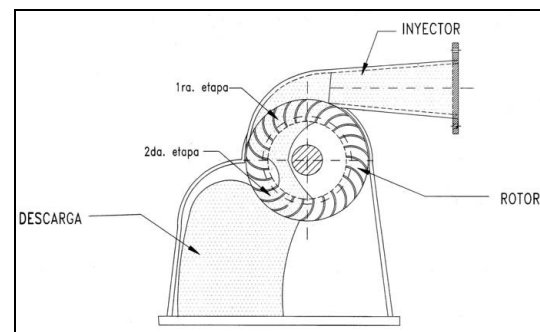


Figura 2. Esquema constitutivo de la turbina [6]

La turbina diseñada y fabricada por la Universidad Nacional de Córdoba considera los siguientes parámetros: un salto efectivo de agua de 25,00 m; caudal a conducir por la obra de aducción 0,120 m<sup>3</sup>/s. Considerando un rendimiento de 60% se obtuvo una potencia útil de 18 Kw.

La turbina consta de dos elementos principales: un inyector y un rotor. El rotor está compuesto por dos discos paralelos a los cuales van unidos los álabes curvados en forma de arco circular.

La construcción del rotor y el inyector de esta máquina no involucraron tareas de fundición de precisión.

Un elemento muy importante para el buen funcionamiento y que en general requiere de mucha precisión en la construcción son los álabes del rotor. En este caso para facilitar la construcción de los álabes se utilizó una tubería comercial de acero al carbono sin costura, ésta fue cortada formando un arco de circunferencia con ángulo  $\theta$ , como se muestra en la figura 3.

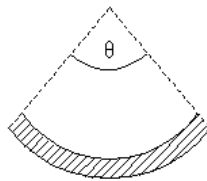


Figura 3. Sección transversal de un álabe del rotor

Para la construcción de los distintos elementos de la turbina se emplearon una serie de máquinas herramientas como plegadoras, limadoras, fresadora, torno de control numérico, etc. La totalidad de las piezas que se encuentran en contacto directo con el agua (conjunto rotor inyector) se sometieron a un tratamiento superficial de zincado en caliente para prolongar su vida útil. Tanto el conjunto del rotor como el inyector fueron construidos en acero SAE 1020.

En la figura 4 se puede observar la turbina totalmente ensamblada y colocada sobre el

bastidor de perfiles normales UPN y en la figura 5 se presenta un plano de conjunto de la turbina Michell Banki proyectada.



Figura 4. Turbina Michael Banki terminada

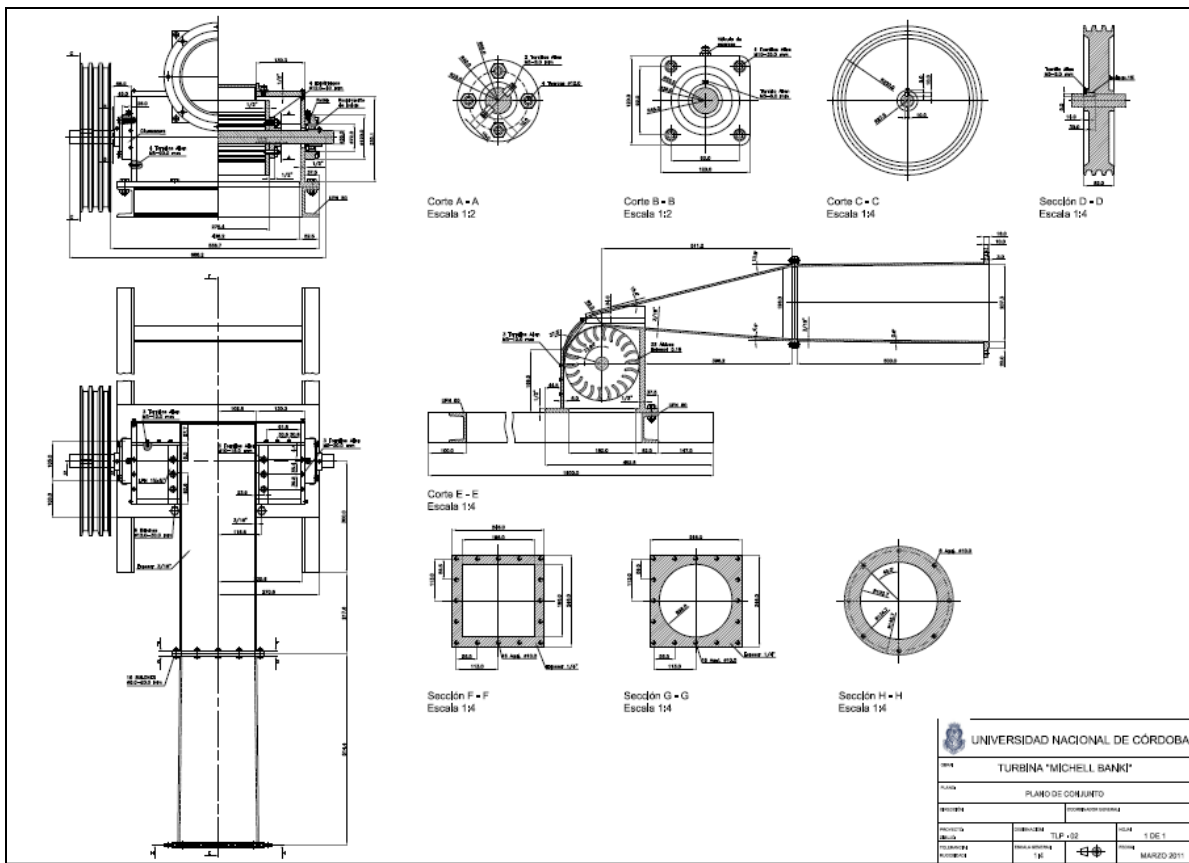


Figura 5. Plano de conjunto de la turbina Michell Banki proyectada

El proyecto presentado verificó que se trata de una turbina con un diseño sencillo y de fácil construcción lo que la hace atractiva a pequeña escala.

## 6. TURBINA HÉLICE

La importancia de las turbinas Hélice y Kaplan en pequeños saltos con mayores caudales, las hacen idóneas tanto en posición horizontal como vertical.

El rodete está compuesto por unas pocas palas, que le confieren forma de hélice de barco; cuando éstas sean fijas, se llama turbina hélice, mientras que si son orientables se denominan turbinas Kaplan; en ambos casos las turbinas funcionan con un único sentido de giro de rotación; son pues turbinas irreversibles.

Sus características principales son:

- Dimensiones reducidas.
- Velocidades relativamente altas.
- Rendimiento elevado con carga variable.
- Notable capacidad para sobrecargas

La máquina que se está desarrollando en la Universidad Nacional de Córdoba busca que sea capaz de producir como mínimo un megavatio. El caudal considerado es de  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  y una altura neta de 5 m/s. Estos valores considerando un rendimiento de aproximadamente 60% obtenemos una potencia útil aproximada de 3 kW.

En estas máquinas el perfil de los alabes tiene características hidrodinámicas con poca curvatura, que facilita su rendimiento y aumenta la velocidad del fluido (agua), estas características hacen que estas turbinas se construyan de diámetros de rodete bastante pequeños.

Los álabes del rotor tienen un perfil de ala de avión y desarrollo helicoidal. El perfil de ala permite obtener una acción útil del agua sobre el álabes en el movimiento que aquella tiene respecto a éste.

La forma helicoidal o alabeo se justifica, en virtud de que la velocidad relativa del flujo varía en dirección y magnitud con el radio, supuesta  $\omega$  (velocidad angular) constante, y considerando la velocidad absoluta constante en magnitud y dirección

Además para los álabes se requiere de un acabado superficial pulido, ya que la rugosidad permitida entre la superficie de contacto y el agua depende del caudal.

Esto indica que se debe hacer un estudio de las velocidades de flujo que prevalecen para dar el acabado de los alabes. Con este fin se está trabajando en el modelo matemático de la turbina utilizando como base el software *Solid Works* para el desarrollo de las diferentes componentes (Figura 5).

La fabricación de los álabes constituye el principal inconveniente para lograr un equipo económico porque requiere de fundición de precisión.

Actualmente se están estudiando nuevas alternativas entre las que se incluyen la construcción de los mismos a partir de una placa con cortes hasta un diámetro central y luego torcionadas en forma helicoidal.

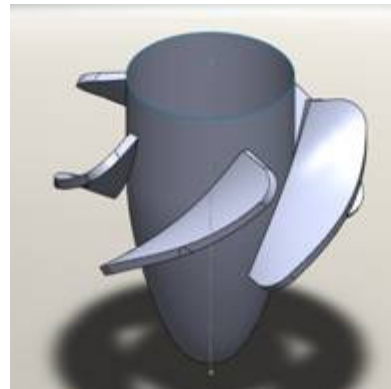


Figura5. Modelo rotor en sólido Works.

La propuesta se está estudiando en talleres metalúrgicos junto con modelaciones computacionales para estimar su efecto sobre el rendimiento del equipo.

El rodete va precedido del distribuidor, cuyos álabes direccionales son por lo general móviles; y se regulan durante la marcha con el fin de tener rendimientos máximos. Para simplificar el diseño se considera la construcción de un distribuidor acodado con álabes fijos.

En cuanto a las características de los materiales de los que se pueden construir los álabes es preciso que estos tengan propiedades de resistencia a la flexión ya que el agua ejerce una carga muy grande de este tipo.

Estas exigencias requieren de que la construcción de acero fundido para cargas pequeñas, para cargas medianas es mejor utilizar aceros de baja aleación, hasta llegar a los aceros de 13% cromo y 1% níquel, para cargas grandes.

## 7. CONCLUSIONES

Las ventajas de las micro centrales hidroeléctricas distribuidas sobre el territorio no es tanto la aportación energética que puede darse a la necesidad eléctrica nacionales, cuanto el valor de la utilización del recurso en su conversión eléctrica a nivel local. Las alternativas de generación de energía descentralizadas y de pequeñas potencias aún no son utilizadas en forma significativa para atender estas demandas, a pesar de que en muchas zonas existen recursos naturales, de fácil explotación y en condiciones favorables económica, social y ambientalmente.

El potencial hidroeléctrico en pequeña escala bien proporcionado y ubicado, resulta económicamente competitivo respecto a otras fuentes energéticas renovables y, considerando los costos globales reales, también respecto a las fuentes energéticas tradicionales. Las instalaciones micro hidráulicas representan una forma de energía valiosa, porque con un impacto medioambiental muy bajo utilizan una fuente energética renovable.

Con relación a los diferentes tipos de máquinas que existen para los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos se puede indicar que las turbinas del tipo Michell-Banki y de Hélice son indicadas para los rangos de caudales y saltos hidráulicos disponibles en las localidades serranas de Córdoba y otros sectores que permitirían resolver los problemas de energía eléctrica a localidades aisladas o que por su densidad y distancia a otras poblaciones es complicado su interconexión con los sistemas energéticos.

## 8. REFERENCIAS

[1] M. Polo Encinas (1976). Turbomáquinas Hidráulicas. México. LIMUSA.  
[2] R. Herrera Vegas (2014) <http://www.lanacion.com.ar/1702453-desmitificando-las-energias-renovables>  
[2] C. Mataix. (2009). Turbomáquinas Hidráulicas Turbinas Hidráulicas, Bombas y Ventiladores. España: Comillas.

[3] J. Fernández Mosconi, O. Audisio and A. Marchegiani. (2003). Pequeñas Centrales Hidráulicas. Neuquén. Universidad Nacional del Comahue. Vol. Facultad de Ingeniería.

[4] Coordinación de Energías Renovables - Dirección Nacional de Promoción (2005) “El Potencial de los Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos en la República Argentina”. XX Conferencia Latinoamericana de Electrificación Rural. Ecuador

[5] Adriana Castro (2006) Minicentrales hidroeléctricas. Manuales de Energías Renovables. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía Madrid. España.

[6] Góngora, C.; 2012. Micro Turbinas para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Turbina Michell-Banki. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención en Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.