

Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica.

Small and micro hydroelectric power plants: a real alternative for electricity generation

Recibido: 25-07-2011 Aceptado: 08-11-2011

FABIO EMIRO SIERRA VARGAS¹,
ADRIANA FERNANDA SIERRA ALARCÓN²
CARLOS ALBERTO GUERRERO FAJARDO³

Resumen

En este papel se pretende exponer la revisión realizada a la información existente de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), concentrando la descripción en tres aspectos: las turbinas más usadas, las características de los generadores y una breve descripción de la legislación colombiana respecto a la pequeña generación. Esta revisión también abarca una corta descripción de los elementos constitutivos y del desarrollo de las PCH en Colombia.

Palabras clave: PCH, microturbinas, energías renovables

Abstract

This paper exposes revisions made of existing information on Small Hydroelectric Plants (SHPs), focusing the description on three aspects: turbines most commonly used, characteristics of generators, and a brief description of Colombian legislation regarding small generation. This review also includes a brief description of the constituent elements and the development of SHPs in Colombia.

Keywords: PCH, microturbines, renewable energies

Introducción

Debido a los pronósticos del fin de las reservas petroleras en el mundo, la contaminación producida por la generación de las energías más utilizadas y, en consecuencia, la necesidad de cuidado, reparación y conservación del medio ambiente, en la última década se ha venido impulsando la investigación, estudio y desarrollo de propuestas tecnológicas para la obtención de nuevas y mejores formas de generación energética. Estas propuestas, a menudo denominadas energías alternativas, buscan complementar los sistemas tradicionales y dar paso a la llamada generación distribuida (Singh, 2004) y sustituir fuentes contaminantes o poco eficientes. Dichas propuestas deben garantizar, que en un futuro cercano, se cuente con soluciones energéticas sencillas, que perduren en el tiempo, con un mínimo impacto ambiental, bajos costos y en cantidades que satisfagan la creciente demanda energética que se genera con el desarrollo económico e industrial.

¹ Profesor Asociado Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia Director del grupo de Investigación "Mecanismos de desarrollo limpio y gestión energética" GRIN

fesierrav@unal.edu.co

² Estudiante Maestría en Ingeniería Mecánica Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia Miembro del grupo de Investigación "Mecanismos de desarrollo limpio y gestión energética" GRIN

afsierraa@unal.edu.co

³ PhD en Ingeniería Mecánica, Ingeniero Ambiental, Ingeniero Químico, Profesor Asociado del Departamento de Ciencias. Universidad Nacional. Sede Bogotá. faguerreroa@unal.edu.co

Estas iniciativas han sido respaldadas por universidades y empresas, y en este sentido la Universidad Nacional de Colombia cuenta con diversos grupos de investigación como el Grupo de Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética GRIN que ha orientado su labor a dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿cómo reemplazar los recursos energéticos que no son renovables y que a la vez no sean contaminantes?, ¿cómo fabricar productos energéticamente eficientes?, ¿cómo reutilizarlos o multiplicar su uso?, ¿cómo ahorrar y recuperar la energía?, ¿cómo suministrar energía a zonas apartadas energéticamente? Para responder a estos interrogantes se han estudiado alternativas de generación a partir de energía solar, energía eólica, biomasa y sistemas de energía hidráulica implementados a pequeña escala y conocidos como PCH.

Las PCH o pequeñas centrales hidroeléctricas son sistemas de generación con capacidad hasta de 10 MW que a partir de la energía del flujo de agua, sin necesidad de grandes represamientos, abastecen pequeños asentamientos humanos y tiene implementaciones en casi todo el mundo. En Colombia, gracias a sus características hidrográficas, el sistema interconectado de generación eléctrica tiene cerca de 10.000 MW de capacidad instalada de generación, con una composición de 80% en plantas hidroeléctricas y 20% en plantas termoeléctricas (Smith, 1997) y en las diferentes regiones del país se encuentran montajes de PCH en los cuales se han instalado turbinas hidráulicas en pequeñas derivaciones (Figura 1), sobre los cauces de los ríos, e incluso se han implementado en las redes de distribución (PCH Santa Ana del Acueducto de Bogotá (Figura 1).

Con la generación de energía a partir de pequeñas centrales hidroeléctricas PCH, se busca dar suministro a zonas aisladas en las que llevar una línea de interconexión del sistema eléctrico principal puede ser muy costoso (Demetriades, 2000) aunque también estas PCH pueden ser conectadas directamente a la red eléctrica principal si se sigue la regulación correspondiente.

Dentro de la labor cumplida por el grupo en el área de las PCH, se han desarrollado pequeños bancos experimentales con el objeto de realizar diferentes ensayos y pruebas de laboratorio para:

- Caracterizar los sistemas de generación hidroeléctrica: determinar potencia hidráulica, mecánica, eléctrica, pérdidas y eficiencias.
- Simular el funcionamiento real de las turbinas con utilización del principio de semejanza al escalar el tamaño de estas.
- Observar el comportamiento real de microturbinas y picoturbinas en aplicaciones de generación hidroeléctrica.
- Analizar el comportamiento de cada uno de los elementos del sistema de generación.

Marco de referencia

La energía hidroeléctrica fue una de las primeras formas usada para producir electricidad y en la actualidad es la segunda fuente y la forma más generalizada para la obtención de energía eléctrica. Con esta fuente energética se aprovecha la transformación de la energía potencial del agua almacenada en un nivel superior, en energía cinética al fluir a un nivel inferior, para generar trabajo sin causar mayores efectos contaminantes, con un recurso renovable como es el agua. Dentro de sus principales desventajas está la dependencia de niveles de agua dados por condiciones meteorológicas de lluvia y sequía, el alto impacto ecológico en algunos casos y los altos costos por la necesidad de construcciones de obras civiles como represas y embalses y los estudios previos de factibilidad usualmente efectuados para las grandes centrales.

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de embalse así: de agua fluyente, de embalse, de bombeo y mareomotrices. Según la altura de la fuente o cabeza hidráulica: en pequeñas cuando el salto es menor a 15 metros, medianas cuando el salto



Figura 1 PCH en Colombia

está entre 15 y 50 metros y grandes cuando es de más de 50 metros. Y según la cantidad de energía hidroeléctrica han sido clasificadas en grandes, medianas y pequeñas centrales (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas

Potencia	Tipo
0,1 – 0,999 MW	Pequeñas centrales PCH
1 – 9,99 MW	Medianas
> 10 MW	Pequeña central

Las pequeñas centrales –PCH a su vez se subdividen en pico, micro, mini y pequeña generación, y aunque los rangos pueden variar según el país y la organización ya que no se ha establecido un criterio único para la subdivisión, en Colombia los intervalos establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas-CREG son los siguientes (Tabla 2):

Tabla 2. Clasificación de las PCH, según la CREG.

Potencia	Tipo
0 – 100 kW	Microcentral
100 – 1000 kW	Minicentral
1000 – 10000 kW	Pequeña Central

En la Tabla 3 se presentan los rangos utilizados por la Organización Latinoamericana de Energía OLADE.

Tabla 3. Clasificación de PCH según la OLADE

Potencia	Tipo	Salto		
		Bajo	Medio	Alto
0,5 – 5 KW	Picocentral	N.A.		
5 – 50 KW	Microcentral	< 15	15-50	>50
50 – 500 KW	Minicentral	< 20	20-100	>100
500 – 5000 KW	Peq. Central	< 25	25-130	>130

Las pequeñas centrales hidroeléctricas-PCH empezaron su expansión a principios del siglo XX, caracterizándose por ser tecnologías sencillas, de fácil adaptación e instalación, reducido costo de operación y mantenimiento (Ortiz Flórez, 2001), moderado o nulo impacto ambiental y larga vida útil, haciéndolas soluciones viables para pequeñas poblaciones no interconectadas con condiciones de topografía, pluviometría e hidrológica convenientes, que pueden reemplazar los generadores de diésel o incluso suministrar, por primera vez, electricidad a comunidades aisladas, para reducir la necesidad de abastecimiento de combustibles fósiles e impulsar el desarrollo socioeconómico en el medio rural (hidroeléctricas, 1994) Adicional a que estas micro-

hidroeléctricas, en conjunto con los pequeños generadores eólicos y fotovoltaicos pueden ser sistemas económicamente atractivos, en comparación con la extensión de redes para facilitar el acceso a la electricidad en pequeñas aldeas remotas. (Nouni, 2009).

Los costos específicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas varían desde 400 hasta 800 USD por 1 KW de capacidad instalada, las cargas en el transporte y las instalaciones pueden incrementar el valor entre 600-1200 USD por KW. Generalmente estos gastos se determinan por las condiciones del emplazamiento, la tecnología utilizada, las facilidades de transporte, etc. En estos gastos, de un 30% a un 50% corresponde a obras civiles, el equipo electromecánico de 20% a 35%, el sistema de transmisión 10% a 25% y la parte de ingeniería y administración de un 5% a un 15%. Internacionalmente, los gastos de las pequeñas centrales hidroeléctricas instaladas se espera que estén entre USD 2.000 y USD 3.000 por kW, lo cual depende del terreno. (Sariev, y otros, 2006)

Panorama mundial

Para el 2001, Canadá, China, Brasil, Estados Unidos y Rusia fueron los responsables de casi el 50% de toda la producción mundial de energía hidroeléctrica (AIE, 2003), y China el país con la mayor producción por PCH con un 11% (13.25 GW) del total de su producción, seguido muy por debajo por Estados Unidos con un 4% (3,42GW).

En Suramérica, se destaca Brasil con un 0,2% (0.483GW), en Centro América, Costa Rica con 4,2% (21.3MW) y en la Unión Europea, Italia (Figura 2). Dentro de las proyecciones encontradas Brasil tiene un crecimiento planeado en pequeñas centrales de 40 MW, Costa Rica 24MW y Perú 10 MW.

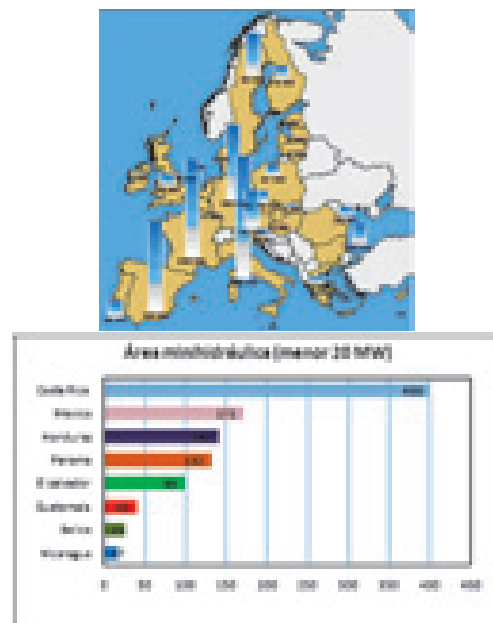


Figura 2 . Potencia instalada con PCH en el mundo (EurObserv'ER, 2010)

Panorama colombiano

Para el Banco Mundial, Colombia es el cuarto país con más recursos hídricos con un caudal promedio de 66.440 m³/seg, equivalente en términos generales a un volumen anual de 2.113 km³ en un área total de 1.141.748 km², teniendo en la región nororiental los menores volúmenes hídricos y la región Pacífico occidental los volúmenes más altos. (Ochoa Rubio, 2002). Entre las cuencas más destacadas está la del Río San Juan y Patía, de la vertiente del Pacífico con 10% del caudal promedio nacional; ríos Magdalena, Cauca, Atrato y Bogotá de la vertiente del Caribe con 24%; ríos Orinoco, Arauca, Meta, Vichada y Guaviare, de la vertiente de la Orinoquia con 32%; ríos Amazonas, Caquetá, Vaupés, Putumayo de la vertiente de la Amazonia, con 34%. (Martínez, 2005) (Figura 3).



Figura 3. Porcentaje del caudal promedio nacional por vertiente (Martínez, 2005)

En el potencial hidráulico para 1991, Colombia se ubicaba en una sexta posición mundial, con 118 GW para 351 ríos inventariados (Ochoa Rubio, 2002) del cual, el 79% es aprovechable para proyectos de más de 100 MW, el 17% para centrales medianas (10 MW) y un 5% para PCH, es decir, 5,9GW. Y respecto al potencial total instalado en Colombia, el 64% de la energía eléctrica, 13,4 GW, proviene de centrales hidroeléctricas, de los cuales para el año 2005,

el 7% correspondía a producción por pequeña generación PCH (UPME, 2009).

En Colombia, las primeras pequeñas centrales hidroeléctricas datan de 1889, con plantas en Bogotá, Bucaramanga y Cúcuta y algunas implementaciones para abastecimiento de energía en fincas. Para 1930 se tenían plantas a filo de agua que suministraban 45 MW, desarrollo que continuó hasta 1960. Sólo hasta después de la crisis energética de la década del setenta del siglo pasado, se retomaron los estudios e investigaciones y las implementaciones de hidroeléctricas a pequeña escala. En la Tabla 4 se presenta la capacidad instalada de PCH en Colombia (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, 1997) 217 PCH concentradas principalmente en Antioquia y Santander: (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativa, 1997) (Figura 4)

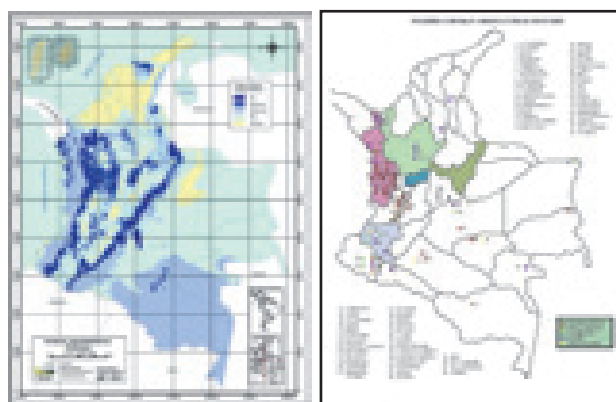


Figura 4. Potencial hidroeléctrico instalado con PCH por departamentos

Tabla 4. Capacidad instalada de PCH en Colombia (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, 1997)

Departamento	PCH	Capacidad Instalada KW
Antioquia	38	17.191
Boyacá	8	5.005
Caldas	23	17.192
Caquetá	1	45
Cauca	12	11.140
Chocó	1	2.000
Cundinamarca	13	14.765
Huila	9	9.865
Meta	3	628
Nariño	98	9.836
Putumayo	3	714
Quindío	7	11.915
Risaralda	3	6.570
Santander	24	30.852
Tolima	8	11.211
Valle	17	16.810
Total	193	168.517

De acuerdo con el plan de expansión de referencia 2009-2023, publicado por la UPME, se tiene planeado instalar 85.3 MW generados a partir de PCH que entrarían a operar antes del 2013. (Tabla 5) (UPME, 2009)

Tabla 5. Proyecciones de expansión de PCH (UPME, 2009)

Nombre	Capacidad (MW)	Turbina
Amaimé	19.9	Francis
Coello 1,2,3	3.7	Kaplan
Caruquia	9.5	Francis
Guañaquitas	9.5	Francis
Trasvase Guarinó	--	--
Barroso	19.9	Pelton
Trasvase Manso	--	--
Neusa	2.9	--
El Popal	19.9	Francis

Según la legislación de las PCH, el uso de energías renovables en Colombia fue estimulado por medio de la Ley 697-2001 (Ley de Energías Renovables), “mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas”, por medio de estímulos para la investigación a través de Colciencias y préstamos para educación por medio del Icetex. En esta Ley, además, se crea Proure: Programa de Uso Racional y Eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales, cuyo objeto es aplicar gradualmente programas para que toda la cadena energética cumpla permanentemente con los niveles mínimos de eficiencia energética, sin perjuicio de lo dispuesto en la normatividad vigente sobre medio ambiente y recursos naturales renovables.

En este contexto, el gobierno colombiano a través del Ministerio de Minas y Energía es el responsable del cumplimiento de esta ley a través de sus entidades adscritas como la Unidad de Planeación Minero Energética UPME, el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas IPSE y la CREG, la cual en lo que respecta a la operación de las PCH ha regulado que:

A. Para la operación de las plantas menores a 10 MW en el sistema de transmisión nacional STN si son interconectadas debe estar bajo la siguiente reglamentación: Estas plantas no tendrán acceso al despacho central y por lo tanto no participarán en el mercado mayorista de electricidad. La energía generada por dichas plantas puede ser comercializada, teniendo en cuenta los siguientes lineamientos:

La energía generada por una planta menor puede ser vendida a una comercializadora que atiende mercado regulado, directamente, sin convocatoria pública, siempre y cuando no exista vinculación económica entre el comprador y el vendedor. En este caso, el precio de venta será única y exclusivamente el precio en la Bolsa de Energía en cada una de las horas correspondientes, menos un peso moneda legal (\$ 1.00) por kWh indexado conforme a lo establecido en la Resolución CREG-005 de 2001. La energía generada por una planta menor puede ser ofrecida a una comercializadora que atiende mercado regulado, participando en las convocatorias públicas que abran estas empresas. En este caso y como está previsto en la Resolución CREG-020 de 1996, la adjudicación se efectúa por mérito de precio. La energía generada por una planta menor puede ser vendida, a precios pactados libremente, a los siguientes agentes: usuarios no regulados, generadores, o comercializadores que destinen dicha energía a la atención exclusiva de usuarios no regulados.

B. Para la operación de las plantas menores de 10 MW en zonas no interconectadas ZNI no interconectadas al STN, deben cumplir los siguientes requisitos:

- Calidad de la potencia: supone contar con equipos para el monitoreo de los valores de frecuencia y magnitud del voltaje, mantener la frecuencia dentro de un rango de más o menos el 1% del valor nominal de la frecuencia en los bornes de generación, mantener la tensión del voltaje dentro de un rango de más o menos el 10% del valor nominal del voltaje. Contar con los medios necesarios para obtener registros que permitan observar de manera horaria los valores de frecuencia y magnitud del voltaje, con una antigüedad de por lo menos tres meses, de manera que sea posible su vigilancia por parte de la Superintendencia de Servicios Públicos.
- Calidad del servicio técnico: Hasta que no se regule lo contrario, para aquellas localidades con servicio las 24 horas, el índice de desconexiones del servicio (DES) no podrá superar los índices vigentes para el grupo 4 de calidad del SIN.

Elementos constitutivos principales de una PCH

Las pequeñas centrales hidroeléctricas PCH están constituidas básicamente por una pequeña fuente energética con sus respectivas obras civiles para su adecuación y manipulación, un sistema de transformación de la energía hidráulica en energía mecánica que casi siempre es una turbina, el sistema para transformar la energía mecánica en energía eléctrica y un conjunto de equipos auxiliares (Figura 5)

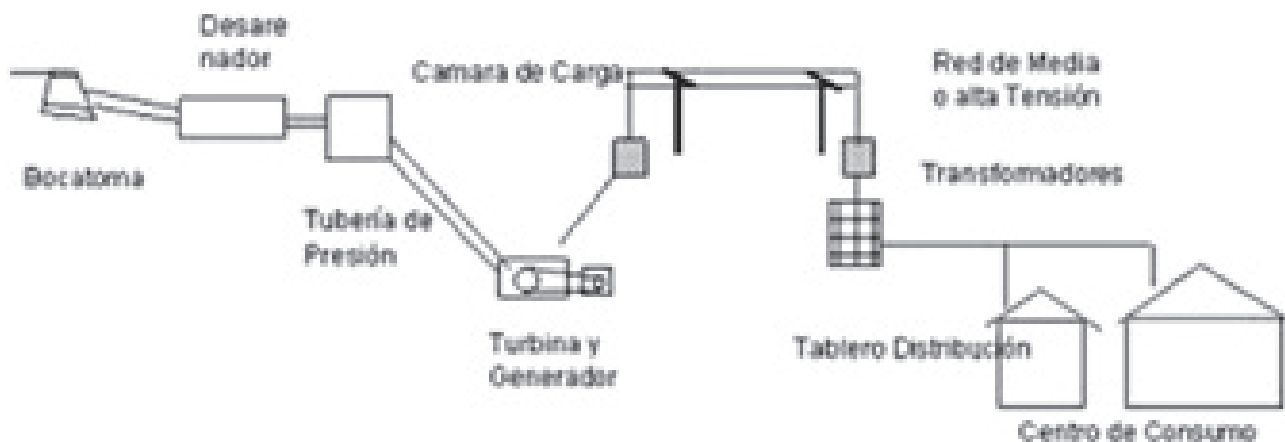


Figura 5. Elementos constitutivos de una PCH (Aprotec)

Fuente energética y obras civiles

En las PCH la fuente de energía está constituida por un flujo del agua que por medio de obras civiles es conducida a los centros de generación o casa de máquinas, lo cual puede ser realizado mediante una canal de derivación, con un pequeño embalse, como una combinación de ambos o directamente sobre el cauce del río, como se observa en la Figura 6 .

En las PCH el sistema más utilizado es por derivación: parte del caudal del río se desvía a través de un sistema de obras civiles (Figura 5) compuesto por una bocatoma, un desarenador, una cámara de carga y por último una tubería de presión. La construcción de estas obras civiles implica considerar aspectos topográficos y geológicos, condiciones hidrográficas, condiciones sociales, vías de acceso y facilidades de comunicación, existencia de estudios previos de la zona de precipitaciones y caudales de por lo menos un año para evaluar la vida útil del proyecto y los costos asociados.

De esta fuente energética, compuesta por los cauces de ríos y las caídas de agua es posible tomar la energía para

transferirla a la turbina, la cual se denomina el potencial hidroeléctrico o potencial hidráulico y depende del caudal y de la altura desde la cual cae el fluido. Se calcula como:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \cdot Q$$

Donde ρ es la densidad y depende del fluido utilizado, g es la aceleración debido a la fuerza de gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$), h la altura desde la que se toma el agua y la boca de la turbina y Q es el caudal o la relación de flujo volumétrico del fluido por unidad de tiempo.

Elemento generador de energía mecánica

En un sistema de microgeneración de energía hidroeléctrica, el elemento que transforma la energía potencial del fluido en energía mecánica por lo general es una turbina hidráulica que de manera sintetizada se puede describir como un conjunto compuesto por: el rodete con una serie de alabes o paletas y que gira ante el impacto del chorro de agua; el estator, que es un elemento fijo el cual en cada tipo de turbina puede regular el caudal, direccionar el flujo,

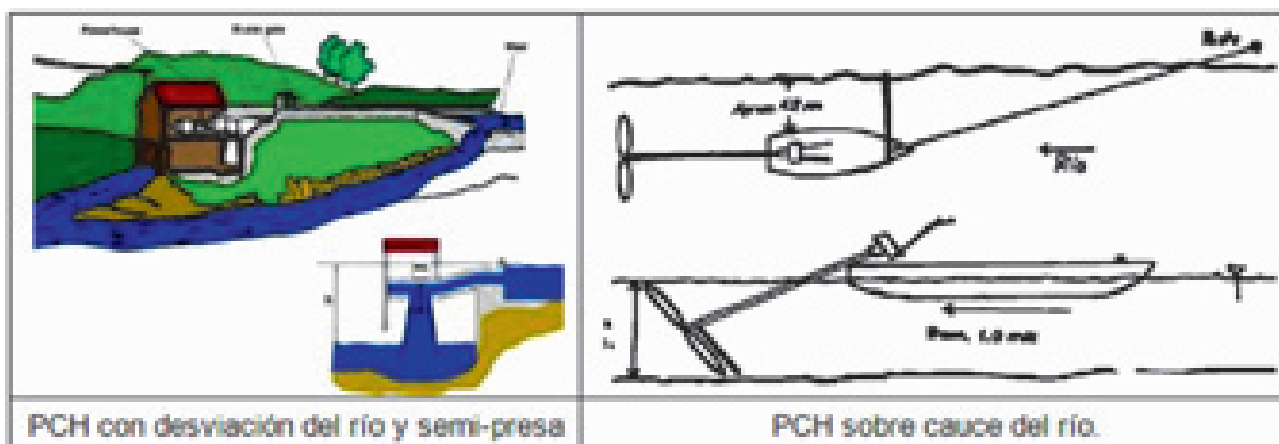


Figura 6. Ejemplos de implementaciones de PCH (2008)

transforman la energía de presión en energía cinética y una carcasa que cubre y soporta los elementos que la componen.

Las turbinas se clasifican en dos grandes grupos: de acción o presión constante como la Pelton, Turgo y Michell Banki y las de reacción o presión variable, como la Axial (bulbo, tubular, y de flujo), la Francis y la Kaplan. También pueden ser clasificadas de acuerdo con la dirección del flujo: radial, semiaxial, axial, tangencial y transversal, lo cual determina la forma del rotor. En microgeneración es común encontrar turbinas Pelton, Michell-Banki y Axiales, que son las más sencillas de fabricar y abarcarían toda la gama posible de combinación de saltos y caudales.

Los parámetros energéticos y constructivos fundamentales de cualquier turbina son (Mataix Plana, 1982):

- HN: caída neta [m]
- N: velocidad de rotación [rpm]
- Q: caudal de diseño [m³/s]
- D: diámetro nominal rodete [m]
- Pm: potencia mecánica [KW]
- Ns: velocidad específica
- η_t : eficiencia turbina

La potencia mecánica mide la energía disponible en el eje de la turbina, producto de la transformación de la energía hidráulica, y depende de la velocidad angular y del torque alcanzado por el impacto del agua. Se calcula como:

$$P_m = \omega \cdot \tau$$

Donde ω es la velocidad angular y τ es el torque.

La eficiencia en la turbina se calcula como la relación entre la potencia disponible en el fluido y la potencia mecánica a la salida de la turbina o potencia en el eje:

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_h}$$

La selección de la turbina adecuada depende de la altura y el caudal disponible combinados con la potencia eléctrica demandada. Existen diversos gráficos que sirven como guía para la selección de la turbina, de acuerdo con las condiciones de la zona, como el que se muestra en la Figura 7:



Figura 7. Selección de turbinas hidráulicas (Instituto de Ciencias de la Naturaleza, 2010)

En Colombia las turbinas más utilizadas en las implementaciones de PCH son Francis y Pelton, como se lee en la Tabla 6:

Tabla 6. Turbinas Instaladas en PCH en Colombia [8]

Tipo de turbina	PCH	Potencia Instalada KW
Francis	61	69.008
Pelton	54	58.435
Combinados (P y F)	9	13.506
Michell Banki	7	245
Otros	3	1.383
Sin información	59	25.940
Total	193	16.8517

Respecto a la tecnología de las turbinas, estas datan de 1800 y sus avances en técnicas de equipos y construcción son modestos, por lo tanto no han variado significativamente y han operado con eficiencias entre el 85% y 95%; la investigación se ha enfocado a aumentar esta eficiencia y tener mayores velocidades de rotación. (Guayacundo W. Pachón O.L., 1999) En conjunto, los mayores avances de las pequeñas centrales están en la automatización y el control.

Turbina Pelton

Patentada en 1880, es una turbina de acción, de flujo tangencial y de admisión parcial. Opera de forma eficiente en condiciones de grandes saltos y bajos caudales, se emplea en grandes y pequeñas hidrocentrales (Guayacundo W. Pachón O.L., 1999).

Está constituida básicamente por el rodete (Figura 8) que es un disco con unas cucharas montadas en su periferia y un inyector en forma de tobera de sección circular, que en algunos casos cuenta con una aguja en su interior y con una placa deflector para desviar el chorro. Se caracteriza por ser de configuración sencilla, compacta y de fácil accesibilidad para la inspección y el mantenimiento (Ortiz Flórez, 2001)

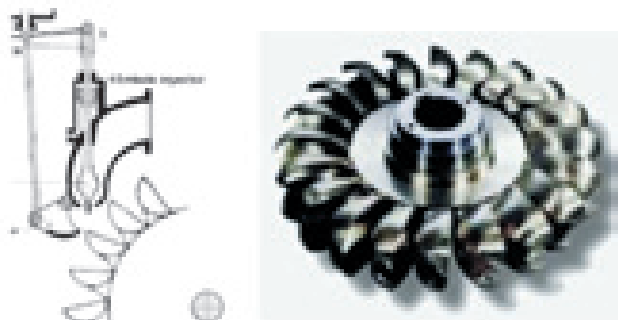


Figura 8 Sistema de alimentación y rodete de turbina Pelton (Ivanrick, 2009)

Turbina Michell Banki

También conocida como de flujo cruzado fue patentada en 1903 (Figura 9), es una turbina de acción, de flujo radial centrípeto-centrífugo, de flujo transversal, de doble paso y de admisión parcial. Son utilizadas en pequeñas caídas (3 m) y su potencial eléctrico puede llegar a los 10.000 KW.



Figura 9. Disposición general de una turbina de flujo cruzado

Aunque presente rendimientos inferiores a los tradicionales, la turbina de flujo cruzado es de las más sencillas y al igual que la Pelton es de fácil construcción, instalación, operación y mantenimiento, además de su bajo costo, ya que no depende de piezas fundidas, y puede ser fabricada en talleres que dispongan de máquinas herramientas simples y máquinas de soldadura, sin necesidad de supervisión meticulosa (Gonçalves de Mello, *et. al*, 2007) Los valores de eficiencia alcanzados por esta turbina son de los más bajos y se compensan con el amplio rango de caudales que puede manejar con solo variar la longitud de sus álabes (Ortiz Flórez, 2001)

Turbina axial

En este tipo de turbinas (Figura 10), se encuentra una amplia variedad de diseños: turbina de hélice, la turbina Kaplan, la tubular y la bulbo. Se caracterizan porque la dirección de la proyección de los chorros de agua sobre los álabes del rodete es paralela al eje de rotación y alcanzan altas eficiencias en manejo de grandes caudales (600 m³/s). Fue desarrollado por Hune en 1921, con ajustes posteriores de Hugelin y Harza. (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativa, 1997)

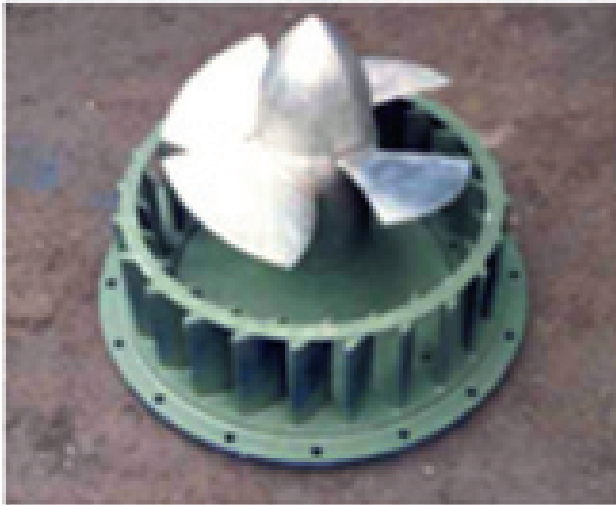


Figura 10. Disposición general de una turbina axial (Sánchez y otros, 2003)

El bajo costo de fabricación, le permite ser una opción competitiva frente a otras tecnologías y por tanto de fácil acceso por parte de las poblaciones rurales. Aunque no tan sencilla como la Michell es posible fabricarla en pequeños talleres con las herramientas y equipos básicos. Es de fácil operación y de bajo costo de mantenimiento. (Sánchez *et. al*)

Elemento generador de energía eléctrica

La energía mecánica es transformada en energía eléctrica por medio de un dispositivo que toma la energía rotacional del eje de la turbina y genera un campo magnético rotatorio en su interior, lo que induce un voltaje en sus terminales y por lo tanto energía eléctrica. Esta energía, denominada potencial eléctrico, se calcula de acuerdo con el voltaje inducido V y la corriente I que circula por el devanado:

$$P_e = V \cdot I$$

La eficiencia del generador se calcula como la relación entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica entregada por el generador:

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_m}$$

La relación entre la potencia eléctrica y el potencial hidráulico es la eficiencia total del sistema, refleja el total de las pérdidas en el sistema y muestra la imposibilidad real de transformar toda la energía hidráulica en energía eléctrica. Esta eficiencia, en condiciones óptimas, puede estar entre un 75% y un 85%.

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_h}$$

Los generadores pueden ser clasificados como síncronos y asíncronos y se diferencian, entre otras características, por la velocidad a la cual trabajan. La gran mayoría de sistemas tradicionales de generación eléctrica, funcionan con generadores sincrónicos, sin embargo, el uso de generadores de inducción se está incrementando principalmente en sistemas alternativos como la microhidrogeneración, en especial, debido su sistema sin escobillas, a su construcción robusta, bajo costo, simplicidad en mantenimiento y en operación, autoprotección contra fallas, buena respuesta dinámica y la capacidad de generar potencia a partir de una velocidad variable (Singh, 2004) que determina la corriente y el voltaje del sistema.

Debido a que las pequeñas centrales hidroeléctricas buscan ante todo, suministrar energía eléctrica a zonas aisladas, estos generadores de inducción deben ser de tipo auto-excitado (GIAE), ya que de esta forma no se requiere una alimentación DC externa para el sistema y ante la caída de voltaje cuando existe una corriente de corto-circuito se reduce automáticamente la corriente de excitación, e igualmente la corriente de corto circuito. (Singh, 2004) Sin embargo, se debe considerar que estos generadores de inducción no tienen una buena regulación de frecuencia y de voltaje, que se puede mejorar si se utiliza un banco de capacitores a la salida (Figura 11) (Murthy *et al.*, 1998) y de este modo alimentar la potencia reactiva que requiere para su funcionamiento. Aquí se aprecia la forma en la que el voltaje se controla ajustando el valor del capacitor de excitación. (Singh, 2004)

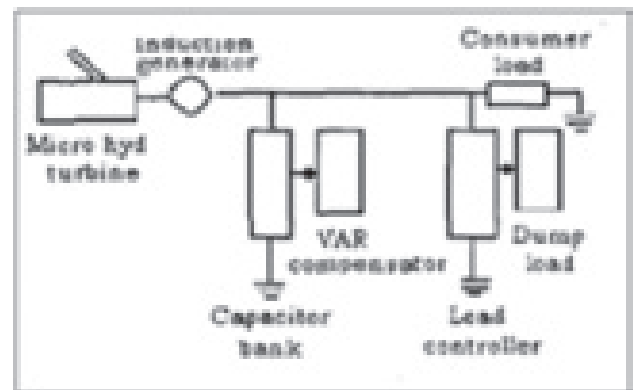


Figura 11. Diagrama de microgeneración eléctrica con generador autoexcitado. (Murthy, *et. al*, 1998)

Es claro que la energía de entrada de este tipo de generación se obtiene de una pequeña caída de agua. Este aspecto hace que se pueda aprovechar toda la energía, puesto que no puede ser fácilmente almacenada y puede ser convertida en su totalidad en energía eléctrica, con lo que se evitaría la necesidad de implementar un sistema de control para la turbina (Murthy, *et al.*, 1998). La cantidad de potencia que es demandada por los consumidores, se compensa al

tener un control de carga en paralelo. Dado que la potencia entregada por el generador es, en principio, constante, se puede controlar la falta/exceso de potencia a través de este mecanismo (Murthy, *et al.*, 1998). Existen otros diagramas de conexión similares, para pequeñas centrales hidroeléctricas PCH que debe ser seleccionado de acuerdo con la situación específica y a juicio de los ingenieros el analizar cuál es el sistema óptimo.

Equipos auxiliares

Dentro de los equipos podemos nombrar la subestación, las líneas de transmisión, el sistema de válvulas, el regulador de velocidad (servomecanismo que mantiene constante la velocidad de giro de la turbina y por lo tanto la frecuencia de la energía eléctrica), la transmisión mecánica y el equipo de control y mando.

Implementaciones realizadas

Como anteriormente se enunció, el comportamiento de un conjunto turbina generador de un sistema de generación se puede probar en bancos experimentales, por lo cual dentro del trabajo del grupo de investigación GRIN se fabricó un primer equipo (Figura 12) para realizar diferentes ensayos de laboratorio y reconocer las condiciones de funcionamiento de un sistema de microgeneración hidroeléctrica por medio de la construcción de las curvas características como parámetro de comparación.



Figura 12. Banco de pruebas de microgeneración hidroeléctrica. Laboratorio Plantas Térmicas y energías renovables. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá

Este primer banco (Figura 12), fue equipado con un rodete tipo pelton (1) como turbina, un alternador (5) de automóvil como generador, un juego de bombas para suministrar el potencial hidráulico (1) y un sistema de transmisión por correa (4).

Las dos bombas de idénticas características hidráulicas, son capaces de suministrar diferentes combinaciones de caudal y presión: desde 10 litro/min hasta 90 litros/min y desde 22 m hasta 34 m. Las diferentes condiciones son posibles de obtener gracias a la configuración de la red de tuberías implementadas en el banco, que permiten colocar a funcionar las bombas en serie y en paralelo y por lo cual también es posible hacer pruebas didácticas para la caracterización y determinación de las curvas características de las bombas. Adicionalmente, se cuenta con una variador de frecuencia para modificar el caudal que se entrega en una de ellas.

El rodete tipo Pelton (Figura 13) , está constituido por un disco de acero inoxidable de 270 mm diámetro, sobre el cual se soldaron en su borde exterior doce cucharas para un diámetro exterior de 320 mm de diámetro, la carcasa es de lámina doblada y soldada, con tapa lateral de acrílico transparente. El sistema de alimentación de agua se realizó por medio de una tobera con un diámetro menor de 7mm sin aguja en su interior. El eje de 25,4 mm de diámetro y en acero inoxidable dispuesto en voladizo, está soportado por dos rodamientos unidos al tanque de agua que a la vez es la base del banco.

La transmisión mecánica (Figura 13) que une el generador con el eje de la turbina es una transmisión de correa polea, en la cual la polea conductora tiene un diámetro de 240mm, la polea conducida un diámetro 80mm para una relación de transmisión de 1/3, la distancia entre ejes es de 265mm y se utilizó una correa convencional en V.



Figura 13. Grupo turbogenerador

En este montaje se utilizó como generador un alternador de carro (Figura 13) el cual proporciona una salida máxima de 12V DC que depende de la velocidad angular que le trasmite la turbina. El tipo de generador utilizado necesita de una fuente externa de alimentación para su correcto funcionamiento, por lo cual se utilizó una batería de 12 V.

Para la medición de las variables de entrada, se implementaron manómetros convencionales a la salida de las bombas y a la entrada de la turbina antes de la tobera, para la medición de la presión. El caudal se midió con recipientes calibrados mediante aforos del flujo de agua turbinado. La velocidad de rotación de la turbina se midió con un tacómetro digital portátil de contacto y el torque con un freno prony constituido por una mordaza de Empack y un brazo de aluminio que transmite la fuerza a una balanza eléctrica. Para la determinación de la potencia eléctrica, se midió el voltaje y la corriente con un multímetro digital. (Figura 14)

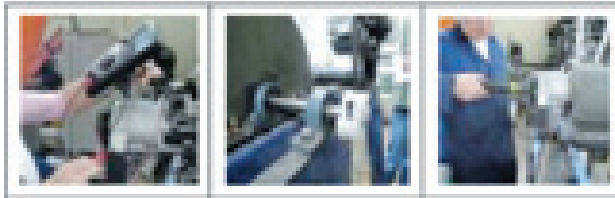


Figura 14. Medición de variables: voltaje, torque y rpm

En este banco se llevaron a cabo pruebas para determinar la eficiencia total del sistema para diversas condiciones de caudal y presión, la eficiencia mecánica de distintas cargas para la construcción de las respectivas curvas características siguiendo los procedimientos estándar.

Con la experiencia recogida del primer banco, se construyó un segundo banco (Figura 15) equipado con tres bombas, un sistema de tubería para pequeños y grandes caudales, y una base para el montaje de diferentes tipos de generadores y microturbinas. En la Figura 15 se muestra montada una turbina de flujo cruzado o Michell Banki, que es muy utilizada en las pequeñas centrales hidroeléctricas ya que maneja pequeñas cabezas y una amplia variedad de caudales.

De igual manera que en el primer banco, este segundo equipo tiene dos bombas idénticas (características de potencia -1HP) capaces de suministrar diferentes combinaciones de caudal y cabeza hidráulica, gracias a la configuración de tuberías y válvulas que permiten colocar a funcionar las bombas en serie y en paralelo.

Adicionalmente, con la conexión de una de las bombas a un variador de frecuencia, se logra modificar los caudales suministrados. Esta configuración permite y está instrumentada para hacer pruebas didácticas para la caracterización y determinación de las curvas propias de las bombas.

El banco tiene una tercera bomba, con una potencia de 1.5HP, que se caracteriza por manejar grandes caudales y pequeñas cabezas hidráulicas, lo cual posibilita ensayar y probar cualquier tipo de turbina en diversas condiciones de caudal.

La turbina Michell Banki de 200 mm de diámetro está



Figura 15. Banco de pruebas de microgeneración hidroeléctrica. Laboratorio Plantas Térmicas y energías renovables. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá

constituida por dos discos laterales entre los cuales se soldaron 16 álabes de 140mm de largo (Figura 16). La carcasa es de lámina doblada y platinas de acero. El sistema de alimentación en forma de tobera fue conformado en lámina de acero. Esta turbina no tiene álabe regulador en la tobera de alimentación. El rodete de la turbina está soportado por dos tramos de ejes laterales apoyados en rodamientos y estos sobre la misma carcasa de la turbina. La utilización de dos ejes laterales y no de un solo eje pasante, se realizó con el fin de evitar la interferencia que se presenta en el segundo paso del agua. Gonçalves de Mello *et al.*, 2007

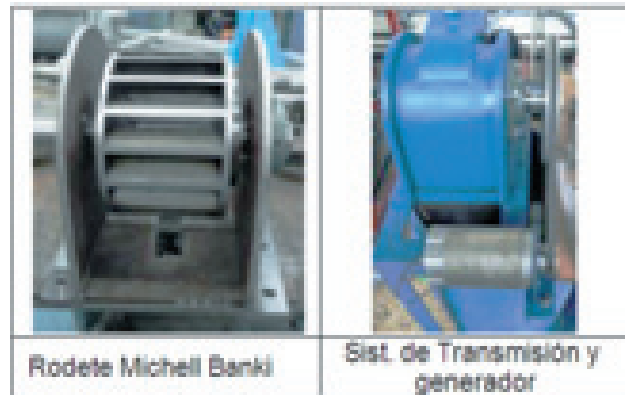


Fig. 16 Grupo turbogenerador

En la Figura 17 se observa una primera aproximación al diseño y fabricación de una segunda turbina a utilizar y montar en este banco. Esta es una turbina Pelton de 17 cucharas y diámetro de 100mm con material de policarbonato y la técnica de prototipado rápido FDM, lo que facilitó la reproducción exacta del diseño y la prontitud en su fabricación.



Figura 17. Turbina Pelton, fabricada por FDM

La transmisión mecánica (Figura 16) que une el generador con el eje de la turbina Michell Banki es una transmisión de correa polea, con una relación de transmisión de 1/6 utilizando una correa convencional en V. Para esta turbina se acopló un generador DC con una capacidad de 300W.

Para este banco se implementó la medición por medio de sensores eléctricos (Figura 18) de algunas de las variables como la presión, el caudal, la velocidad de rotación, corriente y voltaje, valores registrados por una tarjeta de adquisición de datos directamente en un computador. Adicional a los manómetros convencionales, a la salida de las bombas y a la entrada de la turbina antes de la tobera para la medición de la presión y un rotámetro análogo para la medición del caudal. Para la medición del torque se implementó un freno, compuesto por dos dinamómetros y una polea unida al eje de la turbina.

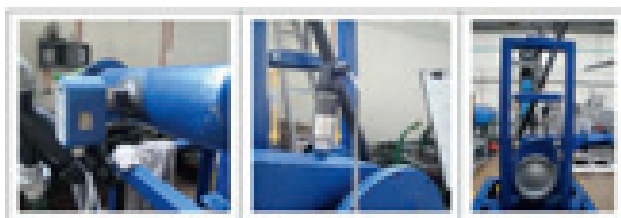


Figura 18. Medición de caudal, presión y torque

En esto banco se llevan a cabo pruebas para determinar la eficiencia total del sistema para diversas condiciones de caudal y presión, la eficiencia mecánica para diversas cargas para la construcción de las respectivas curvas características del montaje de generación.

Conclusiones

Aunque en los últimos años no se han realizado modificaciones importantes en la tecnología de las PCH, y sigue siendo de fácil adquisición, sencilla, eficiente, segura y de bajo costo, su implementación está sujeta a que se disponga de los recursos hídricos suficientes, que se pueda combinar su uso y se disponga de una buena base socioeconómica, política y gubernamental.

El desarrollo de investigaciones en microgeneración puede determinar un nuevo panorama en la generación de energía eléctrica, si se logra la apropiación y la transferencia de estas tecnologías en Colombia, para aprovechar las condiciones topográficas y la riqueza hídrica del país.

Dentro del proceso experimental se pudo evidenciar la viabilidad de la pequeña generación a partir de micro-turbinas hidráulicas, para dar una solución a pequeñas demandas de energía eléctrica como por ejemplo la carga de baterías o el uso en hogares de zonas aisladas.

Las PCH tienen la ventaja de utilizar un recurso relativamente renovable, es decir, que en la medida que exista y se dé el ciclo normal del agua se tendrán ríos y por lo tanto potencial hídrico, por lo cual se pueden implementar sistemas combinados para garantizar el suministro todo el año.

El aporte más importante de las PCH adicionales a que no genera residuos contaminantes ni en el aire ni en el agua ya que no requiere combustibles fósiles ni otro tipo de combustible, lo que la hace una tecnología limpia, es que su impacto ambiental en la fauna y flora presente en el río no existe o es mucho menor que las grandes centrales y el grado de erosión en la desembocadura del agua de la turbina es manejable.

Adicional puede combinarse con otros usos, como el riego, como protección contra inundaciones y suministro de agua, o su diseño puede estar desarrollado para que no se vean afectados por las temporadas de verano, y por el contrario aproveche esta condición por ejemplo las crecientes por los deshielos de los nevados. (Magureanu, R. *et al.*)

Por lo general las PCH se desarrollan en zonas aisladas sin conexión a la red principal lo que puede mejorar la eficiencia del sistema de interconexión por no tener que transportar tanta carga pero en sistemas complejos donde sí están interconectadas se proyectan para producción energía reactiva y así mejorar la regulación y suministro en horas pico.

El desarrollo de los bancos de pruebas implica el avance en el conocimiento del funcionamiento de sistemas de generación eléctrica, lo que permite propuestas de mejoramiento en su eficiencia y sus costos.

Referencias

- AGAR D. and RASI M. On the use of a laboratory-scale Pelton wheel water turbine in renewable energy education [Journal] // Renewable Energy. - Finlad : Elsevier, July 2008. - Issue 7 : Vol. 33. - pp. 1517-1522. - 0960-1481.
- APROTEC Aprotect [Online] = Galeria Fotografica - Hidroenergia // Aprotect. - Feb 2011. - www.aprotec.com.co.
- BANSAL R.C., BHATTI T.S. and KOTHARI D.P Bibliography on the application of induction generators in nonconventional energy systems [Journal] // Energy Conversion. - Issue 3 : Vol. 18.
- BARTLE ALISON Hydropower potential y development activities [Journal] // Energy Policy. - [s.l.] : Elsevier, 2002. - Vol. 30. - pp. 1231-1239.
- BLANCO CLAUDIO, SECRETAN YVES and AMARANTE ANDRÉ L. Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective [Journal] // Energy for Sustainable Development. - [s.l.] : Elsevier, Sept 2008. - N° 3 : Vol. XII. - pp. 25-33. - ISSN 0973-0826.
- CASPARY GEORG Gauging the future competitiveness of renewable energy in Colombia [Journal] // Energy Economics. - [s.l.] : Elsevier, Enero 2009. - Vol. 31. - pp. 443-449.
- DEMETRIADES G.M he use of induction generators for small-scale hydroelectric schemes in remote areas [Journal] // Electrotechnical Conference. - 2000. - pp. 1055 - 1058.
- EAAB Dirección Red Matriz Acueducto [Online] = Que operamos / Hidroeléctrica de Santa Ana // Dirección Red Matriz Acueducto. - Junio 2011. - http://web.acueducto.com.co/RedMatriz/RedMatriz/hidroeléctrica.htm.
- EKANAYAKE J.B. Induction generators for small hydro schemes. [Journal] // Power Engineering Journal. - 2002. - Issue 2 : Vol. 16. - pp. 61 - 67.
- EUROSERV'ER EurObserv'ER [Online] // L'Observatoire Des Energies Renouvelables. - 2010. - Octobre 2009. - http://www.euroserv-er.org.
- GOMEZ JORGE IVAN, PALACIO EDISON ANDRES AND PAREDES CESAR ALFONSO La turbina Mitchell Banki y su presencia en Colombia [Journal] // Avances en recursos Hidraulicos. - Medellin : Universidad Nacional de Colombia, Mayo 2008. - Numero 17. - pp. 33-42. - ISSN 0121-5701.
- GONÇALVES de MELLO Jr *et al.* Optimización del rendimiento de una turbina de flujo cruzado (Michell - Banki): modificaciones mecánicas y adaptaciones constructivas realizadas. [Conference] // Memorias 8° CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA. - Cuzco : Pontificada Universidad Catolica del Peru, 2007. - pp. 1-8.
- GUAYACUNDO W. PACHON O.L. ROMERO G.G Estado del Arte en la planificación y diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas [Report] / Universidad Nacional de Colombia. - Bogotá : [s.n.], 1999.
- HANMANDLU M AND GOYAL HIMANI Proposing a new advanced control technique for micro hydro power plants [Journal] // Electrical Power y Energy Systems. - 2008. - Vol. 30. - pp. 272-282.
- HAQUE M.H. Characteristics of a stand-alone Induction generator in small hydroelectric plants [Journal] // Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. - [s.l.] : Australasian Universities, 2008. - pp. 1-6.
- HIDROELÉCTRICAS MANUAL DE PEQUEÑAS CENTRALES Rojas W. [Report] : Tesis Pregrado / Universidad Nacional de Colombia. - Bogotá : [s.n.], 1994.
- INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA NATURALEZA TERRITORIO Y ENERGIAS RENOVABLES Pontificia Universidad Catolica del Peru [Online] // Pontificia Universidad Catolica del Peru. - Sept 2010. - Sept 2010. - www.uns.edu.pe/energia/seleccion_turbinas_hidraulicas.jpg.
- INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGÍAS ALTERNATIVA Guía de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas [Book]. - Bogotá : Ministerio de Minas y Energía, 1997. - Torres Q., Ernesto.
- INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGIA DE ESPAÑA Manuales de Energias Renovables Vol 6 Minicentrales hidroeléctricas [Report]. - España : Ministerio de Industria, turismo y comercio, 2006.
- IVANRICK ELECTROMNTTO [Online] // Mantenimiento de maquinas rotativas. - Marzo 4, 2009. - Enero 2011. - http://electromntto.blogspot.com/.
- MAGUREANU R. *et al.* Smart AC grid integrating dispersed small hydro-power sources. [Journal] = OPTIM 11th International Conference // Optimization of Electrical y Electronic Equipment. - 2008. - pp. 345 - 350.
- MARTÍNEZ ANDRÉS G. Toda Colombia es mi pasion [Online]. - 2005. - Mayo 2011. - www.todacolombia.com.
- MATAIX PLANA CLAUDIO Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas [Book]. - México : Oxford University Press , 1982.
- MURDOCH UNIVERSITY [Online] = Microhydro // School of Engineering y Energy. - 2008. - Septiembre 2011. - http://www.eepe.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/hydro/small.html.
- NOUNI M. R. Providing electricity access to remote areas in India: Niche areas for decentralized electricity supply [Journal] // Renewable Energy. - India : Elsevier, Feb 2009. - Issue 2 : Vol. 34. - pp. 430-434. - 0960-1481.
- OCHOA RUBIO Tomás Centrales hidroeléctricas [Book]. - Bogotá : Ediciones Gran Colombia, 2002.
- ORTÍZ FLÓREZ Ramiro Pequeñas centrales hidroeléctricas [Book]. - Bogotá : McGraw-Hill, 2001.
- PASCALE Andrew, URMEE Tania y MOORE Andrew Life cycle assessment of a community hydroelectric power system in rural Thailand [Journal] // Renewable Energy. - [s.l.] : Elsevier, Mayo 2011. - Vol. 36. - pp. 2799-2808.
- RAMÍREZ ESCOBAR Carlos Arturo Elaboración de un sistema de mantenimiento preventivo planificado mediante el estudio de la rehabilitación de una central hidroeléctrica [Book]. - Bogotá : Proceditor, 1994.
- SALHI ISSAM DOUBABI SAÏD , ESSOUNBOULI NAJIB, HAMZAOU ABDELAZIZ Application of multi-model control with fuzzy switching to a micro hydro-electrical power plant [Journal] // Renewable Energy. - [s.l.] : Elsevier, Marzo 2010. - Vol. Vol 35. - pp. 2071-2079.
- SÁNCHEZ Teodoro, RAMÍREZ Saúl and DÁVILA Celso Turbina axial: Bajas caídas, bajo mantenimiento, bajo costo [Journal] // Hidrored. - Peru : Programa de Energía, Infraestructura y Servicios Básicos ITDG, 2003. - pp. 5-8. - ISSN 0935-0578.
- SARIEV IMANGAZI AND NEVENCHANNY YURI Micro-hydro power station in the mountain village of jorf [Report] : A Pre-Feasibility Study Report1 / Tajikistan ; Promotion of renewable energy, energy efficiency y greenhouse gas abatement (prega). - 2006.
- SINGH G. K. Self-excited induction generator research—a survey [Journal] // Electric Power Systems Research. - May 2004. - Issues 2-3 : Vol. 69. - pp. 107-114. - 0378-7796.
- SMITH Ricardo A A comparative analysis of various optimization models for electricity capacity expansion [Journal] // International Transactions in Operational Research. - Colombia : Elsevier, Jan 1997. - Issues 1 : Vol. Volumen 4. - pp. 35-44.
- UPME Subdirección de Planeación Energética - Plan de expansión de referencia. Generacion - Transmision 2009-2023 [Report] / Bogotá ; UPME. - Bogotá : [s.n.], 2009. - ISBN:978-958-8363-06-6.
- MURTHY S.S., JOSE RINI y SINGH BHIM A practical load controller for stand alone small hydro systems using self excited induction generator [Journal] = International Conference // Power Electronic Drives y Energy Systems for Industrial Growth. - [s.l.] : IEEE Conferences, 1998. - Vol. 1. - pp. 359 - 364.