

Stages in the development of a small hydropower project: Context and implementation basic criteria

Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación

Sergio Morales ^a, Laura Corredor ^b, Julio Paba ^c & Leonardo Pacheco ^d

^a Esp. Ingeniero en Energía. GIREs, Universidad Autónoma de Bucaramanga. Colombia smorales@unab.edu.co

^b M.Sc Ing. Química. Instituto Colombiano del Petróleo Colombia. laura.corredor@ecopetrol.com.co

^c M.Sc GIREs, Universidad Autónoma de Bucaramanga. Colombia jpaba@unab.edu.co

^d PhD. GIREs, Universidad Autónoma de Bucaramanga. Colombia lpacheco560@unab.edu.co

Received: September 3th, 2013. Received in revised form: December 17th, 2013. Accepted: February 25th, 2014.

Abstract

The purpose of this article is to review and analyze the context and basic requirements to be considered to implement projects of Small Hydro Power, which was performed by collecting information and reviewing of the current state of technology in the country and worldwide, as well as the most efficient and suitable technologies for its implementation. Finally, it raises some stages and engineering studies to follow for successful development of an SHP project and defines the relevant conclusions of the analysis.

Keywords: electricity generation, small hydropower, hydraulic turbines, Renewable energy, distributed generation, rural electrification.

Resumen

El propósito del presente artículo es realizar una revisión y análisis contextual y de requerimientos básicos a tener en cuenta para implementar proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, para lo cual se realizó una recopilación de información y una revisión bibliográfica que permitió conocer la situación actual de la técnica a nivel nacional e internacional, así como las tecnologías más eficientes y aptas para su implementación. Por último, se plantean unas etapas y estudios de ingeniería a seguir para lograr con éxito el desarrollo de un proyecto de PCH y se definen las conclusiones pertinentes del análisis realizado.

Palabras Claves: generación eléctrica, pequeñas centrales hidroeléctricas, turbinas hidráulicas, energía no convencional, generación distribuida, electrificación rural.

1. Introducción

El Sistema Eléctrico Colombiano posee grandes ventajas en el suministro del servicio de energía eléctrica debido a su robustez. Una gran deficiencia se presenta al garantizar la calidad y cobertura del servicio en las regiones no interconectadas. Para suplir los requerimientos energéticos de éstas regiones se utilizan combustibles fósiles, los cuales proveen un suministro deficiente e irregular de la energía además de ser contaminantes y muy costosos. Teniendo en cuenta lo anterior, se están implementando tecnologías alternativas de producción de energía como la energía solar, la eólica y las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH).

Colombia, debido a su situación privilegiada desde el punto de vista hidrológico, tiene un gran potencial para desarrollar proyectos de generación hidroeléctrica. Este potencial ha sido ampliamente explorado en proyectos de gran envergadura (construcción de grandes hidroeléctricas), beneficiando a las regiones interconectadas, y marginando a las regiones no

interconectadas. En dichas regiones donde se presta el servicio, este se da en promedio por 8 horas diarias [1].

En este contexto, las PCH ofrecen una alternativa para las zonas no interconectadas debido a que aprovechan pequeños saltos y caudales de agua y debido a su fácil manipulación pueden ser operadas por personal local.

2. Contexto y situación actual

Durante el año 2010, las plantas hidroeléctricas suministraron alrededor del 16% de la electricidad mundial y su capacidad instalada a finales del mismo año era de 1010 GW, lo cual las convierte en una de las fuentes de energía renovable más relevantes para la producción de electricidad [2]. Asia es el continente con mayor capacidad instalada de PCH en el mundo con más de 40 GW, Europa se ubica en el Segundo lugar con 13 GW y en tercer lugar se ubica América (Norte, Centro y Sur [3]). Según REN21 [3], los países con mayor capacidad instalada en PCH son:

China con 33GW, Japón con 4 GW, EE.UU con 3 GW y Alemania, Brasil, España e India con 2 GW

La Figura 1 muestra la producción de electricidad a nivel mundial por tipo de fuente [2].

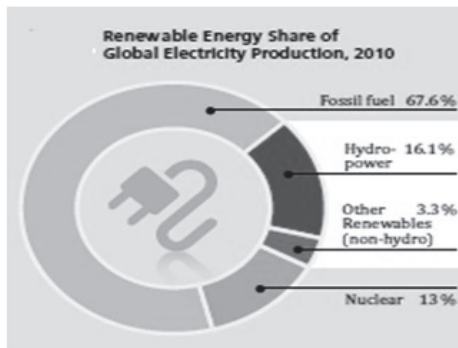


Figura 1. Producción de energía por fuentes a nivel mundial [13]

Los siguientes factores resultaron ser los principales contribuyentes en la expansión de las PCH en China:

Políticas gubernamentales preferenciales: El gobierno chino ha tomado medidas para fomentar el desarrollo de PCH. Estas incluyen la reducción de impuestos, el otorgamiento de créditos blandos y subvenciones, la promoción para que las empresas privadas inviertan en la construcción de PCH y las políticas para proteger las zonas de suministro y la propiedad privada [4-8]

Capacidad de fabricación con mano de obra local: el Gobierno Chino ordenó a ciertos condados y provincias que desarrollaran sus propios equipos para PCH y luego siguió promoviendo la producción local para reducir los costos generales. Actualmente, existen convenios de cooperación tecnológica entre China y la Unión Europea con el fin de mejorar la calidad de fabricación China y acomodarlo a los estándares Europeos [4,5], [9-11].

Reconocimiento de las ventajas de las PCH sobre las grandes hidroeléctricas: China ha tenido en cuenta que las PCH tienen beneficios que no pueden ser alcanzados con grandes hidroeléctricas, por ejemplo la construcción de PCH tiene un bajo impacto ambiental y no requiere el desplazamiento de la población local. Adicionalmente, la tecnología utilizada en PCH no es muy compleja y puede ser entendida y transferida a un gran número de comunidades. Como la mayoría de las PCH tienen sus propias zonas de abastecimiento y redes locales, pueden suministrar electricidad a la población local así como conectarse al sistema eléctrico. Esto permite a las plantas maximizar las ganancias por compra de electricidad del sistema eléctrico en tiempos de baja generación y venderla cuando haya exceso en la capacidad de generación [4,5].

Generación de energía descentralizada: El desarrollo de las PCH en China se ha dado en función de los recursos de las comunidades locales, promoviendo un enfoque de autosuficiencia e independencia en el suministro de energía en las zonas rurales, teniendo los “condados” como unidad base y contando con el apoyo de la red nacional, la red local y las PCH aisladas [7,8], [12].

Actualmente, la potencia instalada en PCH en China crece en promedio 2000 MW anualmente (7%) y brinda

energía a más de 300 millones de personas. Finalmente, se puede decir que la experiencia de China sirve como referencia para impulsar el desarrollo de proyectos de PCH teniendo en cuenta los aspectos que facilitaron su implementación [4,5], [9], [12].

En cuanto a Suramérica, según Tapia [13] el país con la mayor experiencia en PCH es Brasil. Esto se debe a que posee un gran potencial estimado en más de 9,5 GW y una capacidad instalada de 2 GW, la más grande de Suramérica. Esto ha sido posible gracias al impulso que se le da a las PCH por medio de diversas iniciativas como la financiación e incentivos como el del Banco Nacional de Desarrollo de Brasil (BNDES) y el Programa de Desarrollo y Comercialización de Energía de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH-COM).

En el contexto nacional, las centrales hidroeléctricas representan el 82% de la capacidad instalada en plantas menores. Actualmente existen más de 200 PCH de las cuales más de 70 se encuentran conectadas a la red eléctrica [14]. Es importante mencionar que en Colombia el desarrollo de las PCH se ha dado con mayor fuerza en las Zonas no Interconectadas (ZNI) debido a que el aprovechamiento de pequeñas caídas y caudales es una de las soluciones más prácticas para satisfacer las necesidades energéticas de la población que habita en dichas zonas. Sin embargo, estas no representan gran importancia para el SIN ya que su área de influencia es muy reducida.

A pesar de contar con entidades que financian proyectos de PCH como El Fondo Nacional de Regalías (FNR), Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de Zonas No Interconectadas (FAZNI) y el IPSE (Instituto de Promoción de Soluciones Energéticas), no existen incentivos específicos para proyectos de PCH por parte del Gobierno. Sin embargo, a este tipo de proyectos se le aplican los incentivos existentes para proyectos de energía renovables de menos de 20 MW y los que se gestionen como Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). Colciencias propone un incentivo para desarrollo, de cuantificar la renta exenta como 125% del valor invertido por innovación tecnológica a las empresas emprendedoras. La mayor parte del financiamiento a las energías renovables (incluyendo las PCH) por parte de entidades como el IPSE, se realizan para atender proyectos de pequeñas potencias en ZNI [15].

Como se evidencia el desarrollo económico de las regiones apartadas o de difícil acceso está fuertemente ligado a su disponibilidad energética. La disponibilidad energética ha sido ampliamente re-evaluada con la descentralización de la generación de energía y con los proyectos de diversificación energética. Desde esta perspectiva las PCH se pueden convertir en grandes impulsoras del desarrollo de las regiones aisladas que no cuentan con un suministro firme y continuo de energía.

3. Clasificación de las PCH

Una pequeña central hidroeléctrica es el conjunto de obras civiles y equipos electromecánicos e hidráulicos cuyo objetivo es transformar la energía potencial y cinética de un curso de agua en energía eléctrica útil, cuyo destino es, su

autoconsumo en el mismo lugar de producción, o bien, su venta a la red eléctrica comercial con el fin de obtener una ganancia económica [16-19].

Como se muestra en las tablas 1 y 2, las PCH se clasifican bajo dos criterios: según la potencia instalada o según la altura de la caída del agua [16], [20-22]. El principal componente de la PCH es el grupo turbina-generador. La turbina es la responsable de la transformación de la energía potencial y cinética disponible en la caída de agua en trabajo mecánico rotacional. Un análisis de las diferentes turbinas hidráulicas y su posible utilización en las PCH es presentado en el siguiente numeral.

4. Turbinas hidráulicas

La turbina hidráulica es el principal componente de una PCH, responsable de transformar la energía cinética y potencial contenida en la caída de agua, en un movimiento rotacional que se transfiere al generador eléctrico. Existen diferentes tipos de turbinas hidráulicas. Los criterios más importantes a tener en cuenta para la selección del tipo de turbina óptimo de un proyecto dado, son las condiciones topográficas e hidrológicas del sitio. Las condiciones de mayor impacto sobre la selección son el caudal y la caída de agua disponibles [23].

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar según el modo en que transforman la energía cinética en mecánica, en turbinas de acción o de reacción.

Tabla 1. Clasificación de las PCH según su potencia [16], [20-22]

TIPOS	POTENCIA (MW)
Microcentrales	Menores a 0,1
Minicentrales	De 0,1 a 1
PCH	De 1 a 10

Tabla 2. Clasificación de las PCH según la altura de la caída del agua [16], [21]

	Baja (m)	Media (m)	Alta (m)
Micro	H<15	15<H<50	H>50
Mini	H<20	20<H<100	H>100
Pequeña	H<25	25<H<130	H>130

Turbinas de Reacción o Sobrepresión: Son aquellas en las que el sentido de giro del rodete no coincide con las direcciones de entrada y de salida del agua, de tal modo que las láminas de fluido que se forman con el paso del agua a través de las paletas fijas, no se proyectan directamente en los álabes de las turbinas. Por el contrario se busca un deslizamiento del agua sobre los álabes [24-26].

Existen diversos tipos de turbinas de reacción: Francis, Kaplan, Hélice, Tubular, Deriaz, Bulbo entre otras, pero este artículo se enfoca en las más utilizadas en Colombia. La tabla 3 muestra los parámetros operacionales de las turbinas de reacción más comunes descritas en la literatura: Francis, Kaplan y Bulbo [27]. La Tabla 4 muestra una síntesis de las principales ventajas y desventajas de las turbinas de reacción evaluando aspectos diferentes a sus rangos de operación [27, 28].

Tabla 3. Rangos de operación de las turbinas de reacción [27]

RPM	Francis Normal y Rápida		P (kW)	E(%)
	Q (m3/s)	h (m)		
150-250	0,5-100	2-750	1-7,5*105	80-93
250-400	0,5-100	2-750	1-7,5*105	80-93
300-800	0,8-1000	Kaplan	2-2*105	88-93
		Bulbo		
300-800	1-750	2-30	25-1*105	90-93

Turbinas de Acción o de Impulso: La potencia transferida al rotor de este tipo de turbinas depende principalmente de la energía cinética que posee el fluido. En ellas la presión estática permanece constante entre la entrada y salida del rodete y sólo se modifica el vector de velocidad del fluido. El movimiento del rodete se produce cuando el chorro de agua proveniente del inyector (colocado al final de la tubería de presión) golpea uno de sus alabes a muy alta velocidad, provocando un par de giro en la misma dirección [26,29].

La Tabla 5 muestra los parámetros de operación más relevantes de las turbinas de acción: Pelton, Turgo, Michell-Banki [27,30]. En la Tabla 6 se comparan las principales ventajas y desventajas de las turbinas de acción, evaluando otros aspectos diferentes a sus rangos de operación [30-31].

Tabla 4. Ventajas y desventajas de las turbinas de reacción o sobrepresión [27-28]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Francis	
Bajas pérdidas hidráulicas, alta eficiencia, alta velocidad específica, bajos costos en acoplamiento con el generador. Opera a grandes rangos de alturas y caudales	Problemas de cavitación. Bajo rendimiento a cargas parciales. Alto desgaste de erosión por su geometría
Kaplan	
Alta velocidad específica, los alabes del rodete y distribuidor pueden adaptarse a cambios de salto y caudal. Su alta velocidad de rotación permite reducir su tamaño.	Altas velocidades de embalamiento. Los sistemas de regulación aumentan su costo considerablemente. Presenta alto riesgo de cavitación.
Bulbo	
Turbina-generador dentro del bulbo, bajo costo de obras civiles.	Fabricación y mantenimiento complejo y costoso

Los cuadros comparativos mostrados permiten concluir que las turbinas de acción son la opción más adecuada a ser implementada en las PCH. Esto se debe a su buen rendimiento operando bajo cargas parciales [32,33]. Este es un aspecto muy importante a tener en cuenta ya que normalmente las PCH se construyen “a filo de agua”, es decir que su caudal no es regulado y está sujeto a grandes variaciones debido a los periodos climáticos propios de la región tropical.

Tabla 5. Rangos de operación de las turbinas de acción [27, 30]

Pelton de 1,2,4 y 6 Inyectores				
RPM	Q (m ³ /s)	h (m)	P (kW)	E(%)
30	0,05-50	30-2000	0,1-3*10 ⁵	70-91
30-50	0,05-50	30-2000	0,1-3*10 ⁵	70-91
40-60	0,05-50	30-2000	0,1-3*10 ⁵	70-91
50-70	0,05-50	30-2000	0,1-3*10 ⁵	70-91
Turgo				
60-260	0,025-10	15-300	5-1*10 ⁴	85-90
Michell-Banki (Flujo Cruzado)				
40-200	0,05-5	10-250	1-2*10 ³	65-84

La Figura 2 resume los rangos de operación de los diferentes tipos de turbinas hidráulicas donde se relaciona el caudal (m³/s) en función de la altura de caída salto (m) para diferentes potencias instaladas (kw) [34, 35]. La Figura 2 se utiliza para pre-seleccionar la turbina a instalar, teniendo como única información el caudal de diseño y la altura del salto.

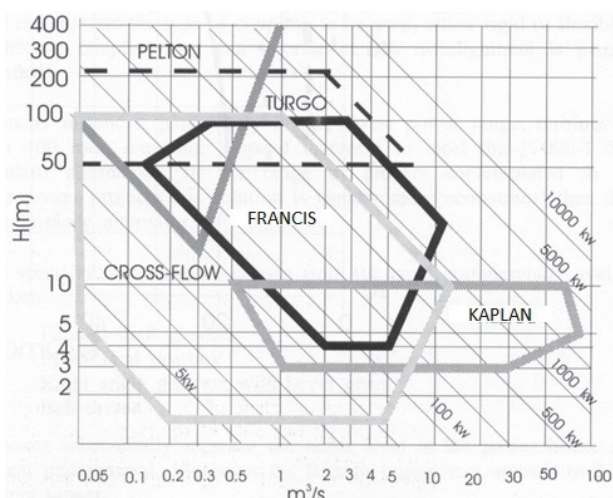


Figura 2. Diagrama con rangos de utilización de los diferentes tipos de turbinas [34, 35]

Las turbinas Turgo y Michell-Banki admiten caudales más grandes que la turbina Pelton, por lo tanto tienen mayores velocidades de rotación y rodets más pequeños. En potencias mayores a 1000 kW la turbina Michell-Banki deja de ser competitiva. A estas potencias turbinas Pelton y Turgo presentan una eficiencia mayor.

Cuando el salto es bajo y el caudal alto, las turbinas de reacción tipo Kaplan, y Bulbo se presentan como una opción ya que se obtienen buenos rendimientos a cargas parciales.

Por otro lado, la turbina Francis también es muy utilizada debido a sus pequeñas dimensiones en relación a la potencia generada, lo cual es muy importante porque el tamaño de los equipos afecta directamente el costo del proyecto.

Por ejemplo en las zonas de coincidencia de las diferentes turbinas de acción (Pelton, Turgo y Flujo cruzado o Michell-Banki) mostradas en la Figura 2, se deben tener en

cuenta aspectos como la potencia a instalar, el costo inicial y de mantenimiento, el rendimiento en cargas parciales, problemas de cavitación y la velocidad de rotación para seleccionar la turbina más adecuada para la correcta evaluación de factibilidad del proyecto energético.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de las turbinas de acción [30, 31]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Pelton	
Baja probabilidad de cavitación, y fabricación sencilla. Mantenimiento económico. Los alabes son robustos y duraderos. Alto rendimiento a cargas parciales (superior al 80% para un 20% del caudal nominal).	Requiere de múltiples inyectores para hacer frente a grandes caudales. Baja velocidad de operación, lo cual incrementa los costos respecto las turbinas de reacción. Para potencias altas, requiere grandes áreas debido a su gran rodete.
Turgo	
Baja probabilidad de cavitación. Reducción considerable del diámetro (hasta la mitad del de una Pelton). Menor número de inyectores, llevando a una simplificación en el sistema de control de velocidad. Permite acoplamiento directo al generador debido a su mayor velocidad angular.	Debe soportar grandes cargas axiales sobre los cojinetes debido al chorro inclinado. Su eficiencia (aprox. 85%) es menor que la de una turbina Pelton (91%). Fabricación compleja, debido a la complejidad de sus alabes los cuales se superponen y son más frágiles.
Michell-Banki	
Construcción sencilla, pocas piezas móviles. Facilita el mantenimiento. Sencilla instalación, bajos costos de obra. Más económica que los demás tipos de turbinas utilizadas en PCH. Permite fabricación local.	Baja eficiencia (65%-84%) con respecto a la de las demás turbinas tanto de acción como de reacción. Bajas eficiencias a potencias superiores a 1000kW.

5. Generalidades de las PCH

Como ya se ha mencionado entre las diferentes ventajas las PCH presentan bajo costo de operación y fácil mantenimiento; e inversión, tiempo de planeación y tiempo de construcción menor que una central hidroeléctrica convencional [36-43]. Por otro lado, este tipo de proyectos mitigan los impactos ambientales asociados a los sistemas de producción de electricidad debido a que no requieren la inundación de grandes terrenos ni produce residuos contaminantes [44-47]. Los impactos generados en su construcción son fácilmente minimizables, incluso muchos se pueden evitar si se toman las medidas adecuadas (escalas para peces, caudal ecológico, etc). Otro punto importante desde el punto de vista ambiental es el uso no consuntivo del agua, ya que ésta se recoge del río en un punto y se devuelve al cauce en una cota inferior sin sufrir contaminación alguna [44]. Las características topográficas y climatológicas del país evidencian un potencial para la masificación de las PCH y su aprovechamiento. Como grandes ventajas técnicas las PCH presentan una alta eficiencia (75%-90%) y larga vida útil (alrededor de 50 años) debida a su robustez [44, 48, 49].

Como la tecnología utilizada en las PCH depende de las condiciones hidrológicas y topográficas se debe prever que esta tecnología no está disponible en los sitios de ejecución

del proyecto. La posible expansión de la cobertura del proyecto a largo plazo está limitada por el recurso hídrico del sitio ya que su producción máxima depende de éste. Además los periodos climáticos impactan directamente la energía generada, lo cual limita la cobertura en todos los periodos del año [44, 48].

Como se puede observar las PCH presentan grandes ventajas operativas y ambientales frente a sistemas de generación térmicos, especialmente en ZNI, lo cual las convierte en la mejor alternativa a implementarse para solucionar la falta de energía eléctrica en regiones donde se tienen las condiciones topográficas e hidrológicas aptas para su implementación. Teniendo en cuenta el gran potencial hídrico que existe en Colombia para el desarrollo de las PCH, en el párrafo siguiente se discuten las etapas a tener en cuenta en la ejecución de proyectos de puesta en marcha de las PCH.

6. Etapas de un proyecto de PCH

Los niveles de estudio que se requieren para la concepción de una PCH son [16, 50]:

Inventario: Está orientado hacia el estudio de poblaciones que no tienen servicios de energía eléctrica, con el fin de determinar aquéllas en las cuales se presentan condiciones adecuadas para la instalación de una pequeña central hidroeléctrica.

Reconocimiento: En esta etapa se realizan visitas a la población involucrada y a los lugares posibles de emplazamientos de las obras; se debe considerar que en muchos casos no será posible obtener cartas topográficas ni fotografías aéreas, ya sea porque no se dispone de esta información o porque se trata de proyectos muy delimitados a zonas de pequeña extensión.

Prefactibilidad: este estudio evalúa el potencial de desarrollo de toda la cuenca, estudia la diversidad de las caídas de agua existentes y efectúa una estimación de los costos de cada aprovechamiento. De esta forma, da impulso para desarrollar el proyecto o recomienda que se terminen las investigaciones, si no presentan condiciones favorables.

Factibilidad: Los estudios de factibilidad tienen como objetivo establecer la factibilidad o justificación de un proyecto tanto en su conjunto como en sus dimensiones principales: técnicas, económicas, financieras, sociales y ambientales. El propósito del análisis es determinar si una idea dada de proyecto es suficientemente buena para continuar con ella, y llegar a la mejor solución de acuerdo con las circunstancias.

Diseño: La etapa de diseño final inicia una vez se define la mejor alternativa desde el punto de vista técnico y económico. En esta etapa se dimensionan las diferentes obras del proyecto. Estos diseños deben responder a las exigencias de resistencia, estabilidad, larga duración y fácil explotación.

Construcción: En esta etapa se inicia la construcción de las obras dimensionadas de acuerdo al cronograma de obra establecido previamente.

Puesta en marcha: Finalmente, se realizan las pruebas de funcionamiento de la central con el fin de verificar que esté lista para entrar en operación.

7. Estudios básicos

Según Ortiz [16] para la construcción de una PCH es necesario realizar varios estudios con el fin de identificar los posibles aprovechamientos hídricos, seleccionarlos y optar por el mejor. Estos estudios se ejecutan en las etapas de prefactibilidad y factibilidad, previas al diseño, construcción y puesta en marcha de la planta.

Estudio de la Demanda: El análisis de la demanda es una de las partes fundamentales para el estudio de una PCH; sus resultados deben aportar el consumo actual de la población a la que se desea suministrar energía y con él, proyectar la demanda durante un periodo, que bien puede ser 5, 10, 15, 20 o más años, según la necesidad.

Estudio Cartográfico y Topográfico: En una PCH la energía potencial del agua se transforma en energía cinética y posteriormente en energía eléctrica, esto hace que para disponer de una potencia, se necesite una caída de agua (cabeza), la cual se determina con base en mapas cartográficos de la región en estudio. Por lo general, las zonas aisladas no disponen de mapas cartográficos adecuados al estudio, de ahí que se realice un estudio topográfico que permita obtener los datos necesarios de la zona y conocer la caída aprovechable, para determinar la potencia del recurso hidro-energético.

Estudio Geotécnico: El estudio geotécnico permite conocer las características del terreno en el cual se va a realizar el proyecto. El origen geológico de los materiales del suelo en el aprovechamiento desempeña un papel esencial pues éste determina sus características físicas. Esto es muy importante para definir la localización de las obras del proyecto.

Estudio Hidrológico y Pluviométrico: Determina los caudales disponibles en el río recolectando datos estadísticos de caudal durante un tiempo (generalmente varios años). Debido a que en la mayoría de los casos no se cuenta con datos hídricos suficientes para seleccionar el caudal, debe recurrirse a información pluviométrica para determinar el caudal de manera aproximada.

Estudio de Potencial Hidro-energético: Con los datos de caudal, caída neta y rendimiento de turbina y generador, se puede obtener la potencia que puede ser generada. La selección de la potencia de diseño está condicionada por factores como el costo de la obra, el de la energía producida, las medidas ambientales y los parámetros operacionales de las turbinas y el generador.

Estudio de Impacto Ambiental: Este análisis permitirá evaluar el impacto que el proyecto podría generar sobre el medio ambiente y definir las medidas que permitan reducirlo, mitigarlo o evitarlo. Deberá hacerse de acuerdo con las normas ambientales vigentes.

Estudio Socioeconómico: Normalmente los proyectos PCH tienen un gran componente social, el cual da al proyecto un enfoque para el análisis de su evaluación en este sentido; deben entonces considerarse los efectos indirectos y de valorización social, de beneficios y costos que conlleva su implementación. Sin embargo, una evaluación financiera del proyecto ofrece indicadores de viabilidad para su realización. La mayoría de este tipo de

proyectos no constituye un atractivo económico, lo cual hace necesario establecer incentivos o fondos especiales para su financiamiento.

8. Discusión

El grupo turbina-generator tiene gran importancia en la transformación de la energía cinética y potencial del agua en energía eléctrica. En primer lugar se realiza un estudio detallado presentando cuadros comparativos de los distintos tipos de turbinas hidráulicas que existen. Este tipo de estudios son relevantes cuando se decide evaluar técnico-económicamente la viabilidad de un proyecto de PCH. Este estudio permite conocer los distintos tipos de turbinas existentes, sus rangos de operación, y las ventajas y desventajas de cada tipo. Esto permite tomar la decisión más apropiada acorde con las condiciones de cada proyecto. Considerando los posibles proyectos, las posibilidades de construcción y la continuidad de los datos, se podría concluir que las turbinas de acción son la opción más adecuada a ser implementada en PCH. Su buen rendimiento operando a cargas parciales, cargas a las cuales normalmente operan las PCH, ya que estas típicamente se construyen “a filo de agua” es decir que su caudal está sujeto a grandes variaciones climáticas durante el año.

Por otro lado, el análisis del contexto internacional permitió identificar los países con mayor capacidad son China, Japón y EE.UU [2]. Esto comprueba que los países que más invierten en PCH son algunas de las economías más importantes del mundo, que ven a las PCH como una oportunidad para impulsar el desarrollo de las regiones aisladas de sus centros de consumo porque está comprobado que el desarrollo de un país o región está fuertemente ligado a la disponibilidad energética [51, 52]. A nivel nacional se comprobó que existe un gran potencial hidro-energético disponible para la implementación de PCH. Este tipo de proyectos se encuentran en etapa exploratoria en algunas regiones, otras presentan un desconocimiento total del potencial que poseen. Por lo tanto, es necesario establecer en Colombia mecanismos legales y políticos específicos para el desarrollo de PCH como incentivos por inversión, mecanismos de financiación, etc. ya que estas iniciativas fueron las que permitieron la masificación de las PCH en los países industrializados y de economías emergentes, obteniendo beneficios a nivel de mejora en la calidad de vida de la población y en su industria.

9. Conclusiones

Con base en la información presentada acerca de las PCH en el artículo se puede concluir:

El gran auge que han tenido las PCH en países como China, Japón, EE.UU, Alemania, Brasil, España e India, que son algunas de las economías más importantes del mundo, se debe a los incentivos (como Feed-in-tarif, exención arancelaria) y facilidades ofrecidas por sus Gobiernos, los cuales reconocen a las PCH como fuente de desarrollo y crecimiento de sus regiones aisladas donde no se cuenta con un suministro firme de energía.

En Colombia no existen incentivos específicos para proyectos de PCH, pero pueden aplicar los existentes sobre energías renovables de menos de 20 MW (los cuales son otorgados por entidades como el IPSE y gobiernos departamentales), exenciones de impuestos al clasificarse como proyectos de innovación y desarrollo, y bonos MDL.

Las turbinas hidráulicas que ofrecen mayores ventajas operativas en PCH a filo de agua son las turbinas de acción debido a su excelente rendimiento con cargas parciales, lo cual es una condición típica de las PCH. Sin embargo, el tipo de turbina a seleccionarse dependerá de las condiciones específicas de cada proyecto y no se descartan las demás turbinas.

El planteamiento de las etapas a tener en cuenta para la ejecución de proyectos de puesta en marcha de las PCH permitió establecer que la etapa más importante en la realización de un proyecto de PCH es la de estudios básicos de ingeniería y planteamiento del diseño, que aunque son las menos costosas (alrededor de 10% de la inversión total), son las que determinan si el proyecto será exitoso en la etapa de construcción y puesta en marcha. Si no se le da la suficiente importancia y profundidad a estos estudios, se tendrá un sobrecosto que puede afectar la rentabilidad del proyecto o peor aún, ocasionar que se abandone la iniciativa.

El futuro de las PCH en Colombia es prometedor debido al gran potencial hidro-energético existente. Sin embargo, es necesario que el Gobierno establezca mecanismos legales y políticos que permitan atraer la atención de posibles inversionistas a este tipo de proyectos tanto en el Sistema Eléctrico Nacional como en zonas rurales no interconectadas.

Agradecimientos

Los autores expresan sus sinceros agradecimientos a las empresas ICP-ECOPETROL S.A y AMBIOCOOP LTDA por el apoyo brindado en la redacción de este artículo.

Referencias

- [1] Franco C, Dyer I, Hoyos S. Contribución de la energía al desarrollo de comunidades aisladas no interconectadas: un caso de aplicación de la dinámica de sistemas y los medios de vida sostenibles en el suroccidente colombiano. Revista DYNA. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia, 75(154), pp. 199-214, marzo, 2008.
- [2] Renewable Energy POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. Renewables Global Status Report Year 2010. Edición 2010. Paris, Francia. Disponible en Web: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf [Consultada: 5-9-2012].
- [3] RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. Renewables Global Status Report Year 2011. Edición 2012. Paris, Francia. Disponible en Web: <http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/GSR2011/tabid/56142/Default.aspx> [Consultada: 5-9-2012]
- [4] Taylor, S.D.B; Upadhyay, D. Small Hydropower for Developing Countries. Bruselas, Bélgica: Thematic Network on Small Hydropower Project. Disponible en web:

- http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/publications/Brochure_SHP_for_Developing_Countries.pdf [Consultada: 5-9-2012]
- [5] Taylor, S.D.B; Upadhyay, D. Sustainable Markets for Small Hydro in Developing Countries. En: *Hydropower & Dams*, Ed 3, pp 62-66, 2005.
- [6] Martinot, E; Akanksha, C; Lew, D; Moreira, J.R; Wamukonya, N. Renewable energy markets in developing countries. *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol 27, pp 309-348, 2002.
- [7] Singal, S.K. Planning and Implementation of Small Hydropower (SHP) Projects. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment*, Ed 5, pp 21-25, 2009.
- [8] Sinha, S.M. Private Participation and State Policies in Developing Small Hydro as Alternate Source of Energy in Developing Countries. *International Conference on Small Hydropower*. Oct. 22-24, 2007. Disponible en web: <http://www.ahec.org.in/links/International%20conference%20on%20SHP%20Kandy%20Srilanka%20All%20Details%5CPapers%5CPolicy,%20Investor%20%20Operational%20Aspects-C%5CC15.pdf> [Consultada: 5-9-2012].
- [9] Zhiwu, Li. China's Small Hydropower in Rural Energy Development. National Research Institute for Rural Electrification, China Hangzhou regional (Asia & Pacific) Center for Small Hydropower. Disponible en web: <http://ebookbrowse.com/4-prof-zhiwu-li-china-s-small-hydropower-in-rural-energy-development-pdf-d386475731> [Consultada: 5-9-2012]
- [10] Martinot, E. Renewable power for China: Past, present, and future. En: *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*. Vol. 4, (3) pp. 287-294, 2010.
- [11] Wallace, W.L; Wu, H; Wang, Z.Y. Experience for sustainable development of rural energy in China. *Proceedings of the Great Wall Renewable Energy Forum.NDRC/UNDP/GEF Project Management Office*, 2006. Disponible en web: http://www.martinot.info/Wallace_et_al_rural_GWREF2006.pdf [Consultada: 5-9-2012].
- [12] Tong, J. Some Features of China's Small Hydropower. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment*. Ed 4, pp 11-14, 2009.
- [13] Tapia, G. Financiación de Tecnologías Limpias XXVIII Jornadas Nacionales de Administración Financiera, Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires, 2008. Disponible en web: <http://greenventi.com/wp-content/uploads/2011/10/XXVIII-J-Tapia-Financiacion-de-tecnologia-limpia.pdf> [Consultada: 12-9-2012]
- [14] XM S.A. E.S.P. Descripción del Sistema Eléctrico Colombiano. Disponible en: <http://www.xm.com.co/Pages/DescripciondelSistemaElectricoColombiano.aspx> [Consultada 12-9-2012]
- [15] CORPOEMA – UPME. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE) Avance 1, 2010. Disponible en web: http://www.upme.gov.co/Sigic/Informes/Informe_Avance_01.pdf [Consultada: 12-9-2012].
- [16] Ortiz-Florez, R. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Primera Edición. Colombia: Editorial McGraw Hill, 2001.
- [17] PALACIOS, M. Estudio de Prefactibilidad para la Construcción y Operación de la Pequeña Central Hidroeléctrica Río La Virgen en el Municipio de Masagua, Escuintla, Guatemala. [Tesis Maestría]: Guatemala: Universidad de San Carlos, 2009.
- [18] Nava, F.J. Factibilidad de Generación de Energía Eléctrica en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Doctor Enrique Bourgoín. [Tesis pregrado]. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes de Mérida, 2008.
- [19] Purohit, P. Small hydro power projects under clean development mechanism in India: A preliminary assessment. *Energy Policy*, Vol 36(6). pp 2000-2015, 2008.
- [20] UPME. Energías Renovables: Descripción, Tecnologías y Usos Finales. Disponible en web:
- <http://www.corpoema.com/Informacion%20FNCE/Eolico/Cartilla%20ER%20col.pdf> [Consultada: 12-9-2012].
- [21] Sierra, F.; Sierra, A.; Guerro, C. Pequeñas y micro centrales hidroeléctricas: Alternativa real de generación eléctrica. *Informador Técnico*. Ed 75, pp 73-85, 2011.
- [22] TNSHP. Guide on How to Develop a Small hydropower Plan. Bruselas, Bélgica. ESHA, 2004. Disponible en web: http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/GUIDES/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_EN.pdf [Consultada: 30-9-2012].
- [23] Paish, O. Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 6 (6). pp 537-556, 2002.
- [24] Chiyembekezo, K.; Kimambo, C.; Nielsen, Torbjorn, N. Potential of Small-Scale Hydropower for Electricity Generation in Sub-Saharan Africa. *ISRN Renewable Energy*. Vol 2012, 15 páginas, 2012.
- [25] IBERDROLA RENOVABLES. Energías Renovables para todos: Hidráulica. Madrid, España. Haya Comunicación. 2007. Disponible en web: https://www.iberdrola.es/webibd/gc/prod/es/doc/cli_renovables_todos.pdf [Consultada: 30-9-2012].
- [26] Suescún, I. Centrales hidráulicas: Turbinas. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia, 2005. Disponible en web: <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/files/capitulo%204.pdf> [Consultada: 30-9-2012].
- [27] Gazzoni, D. Oportunidades de Negocio con Energías Renovables. Asunción, Paraguay, 2010. Disponible en web: http://www.slidefinder.net/g/geopol%C3%ADtica_energ%C3%ADa_demo%20graf%C3%ADa_econom%C3%ADa_energ%C3%ADa/33011943 [Consultada: 30-9-2012]
- [28] Dávila, C.; Vilar, D.; Villanueva, G.; Quiroz, L.. Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de microcentrales hidroeléctricas. Lima: Soluciones Prácticas, 2010. ISBN: 978-9972-47-210-5.
- [29] Santos, J.A. Estudio para la implementación de una pequeña hidroeléctrica, en un beneficio húmedo de café. [Tesis Pregrado]. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006.
- [30] Marchegiani, A. Turbomáquinas: Las Turbinas Hidráulicas. II Curso internacional de especialización en micro y minicentrales hidroeléctricas. Cajamarca, Peru, 2004.
- [31] Cobb, B.; Sharp, K.; Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations. *Renewable Energy Journal*, Vol 50, pp 959-964, 2013.
- [32] Sinhg, D. Micro Hydropower Resource Assessment Handbook. Asian and Pacific Centre for Transfer of Technology of the United Nations – Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP), 2009.
- [33] NATURAL RESOURCES CANADA. Micro hydropower systems: a buyer's guide, 2004. ISBN 0-662-35880-5. Disponible en web: <http://canmetenergy.nrcan.gc.ca/sites/canmetenergy.nrcan.gc.ca/files/files/pubs/buyersguidehydroeng.pdf> [Consultada: 12-12-2012].
- [34] IDAE. Manuales de Energías Renovables: Minicentrales Hidroeléctrica. Madrid, España, 2006. Disponible en web: <http://www.idae.es/index.php/idpag.16/relmenu.301/mod.pags/mem.detalle> [Consultada: 12-12-2012].
- [35] Brussa, A.; Guarnone, E. Energía Minihidráulica: Proyecto RES & RUE Dissemination. CECU. Disponible en: <http://www.ceu.es/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/Indice.htm> [Consultada: 27-12-2012]
- [36] Rojanamon, P; Chaisomphob, T; Bureekul, T. Application of geographical information system to site selection of small run-of-river hydropower project by considering engineering/economic/environmental criteria and social impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 13(9). pp 2336-2348, 2009.

- [37] Dudhani, S.; Sinha A.; Inamdar, S. Assessment of small hydropower potential using remote sensing data for sustainable development in India. *Energy Policy*, Vol. 34 (17), pp 3195-3205, 2006.
- [38] Ramachandra, TV; JHA, R.K; Krishan, V; Shruthi, B.V. Spatial decision support system for assessing micro, mini and small hydro potential. *Journal of Applied Sciences*. Ed 4, pp 596-604, 2004.
- [39] BHA (British Hydropower Association). A guide to UK mini-hydro developments Version 1.2, 2006. Disponible en web: <http://www.british-hydro.org/mini-hydro/download.pdf> [Consultada: 12-12-2012]
- [40] Bakis, R. The current status and future opportunities of hydroelectricity. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, Vol 2,(3). pp 259-266, 2007.
- [41] Borota, M. Mini hydro power plants 'Green' power for uses. Belgrado, Serbia, 2008. Disponible en web: http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-903.pdf [Consultada: 17-12-2012].
- [42] Evans, A; Strezov, V; Evans, T.J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol 13(5). pp 1082-1088, 2009.
- [43] Furukawa, A; Watanabe, S; Matsushita, D; Okuma, K. Development of ducted Darrieus turbine for low head hydropower utilization. *Current Applied Physics*. Vol 10 (2). pp S128-S132, 2010.
- [44] BUNCA. Manuales sobre energía renovable: hidráulica a pequeña escala. Primera Edición. San José, Costa Rica, 2002. ISBN: 9968-9708-8-3. Disponible en web: www.bun-ca.org/publicaciones/HIDRA.pdf [Consultada: 17-12-2012].
- [45] Dursun, B; Gokcol, C. The role of hydroelectric power and contribution of small hydropower plants for sustainable development in Turkey. *Renewable Energy Journal*, Vol 36 (4). pp 1227-1235, 2011.
- [46] Kosnik L. The potential of water power in the fight against global warming in the US. *Energy Policy*. Vol 36 (9). pp 3252-3265, 2008.
- [47] Blanco, C; Secretan, Y; Mesquita, A. Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective. *Energy for Sustainable Development*. Vol. 12 (3). pp 25-33, 2008.
- [48] ESHA. State of the Art of Small Hydropower in EU-25. Bruselas, Bélgica, 2005. Disponible en web: http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/publications/State_of_the_Art.pdf [Consultada: 27-12-2012].
- [49] Paish, O. Micro-hydropower: Status and prospects. *Journal of Power and Energy*, Vol 216, pp 31-40, 2002.
- [50] Mora, D; Hurtado, J. Guía para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos. [Tesis Pregrado]. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2004.
- [51] Prado, G; ITDG. Estudio de Scalling Up en Micro Centrales Hidroeléctricas. Lima, Peru, 2006. Disponible en web: http://practicalaction.org/docs/energy/prado_estudio_de_scaling_up_en_mchs.pdf [Consultada: 27-12-2012].
- [52] Ghosh, A.; Majumdar, S.; Kaur, A. Steady growth in small hydro power; however significant, challenges remain. ICRA (Investment Information and Credit Rating Agency of India Limited) Rating Feature. Disponible en web: <http://www.icra.in/Files/ticker/SHP%20note-.pdf> [Consultada: 27-12-2012].