

Estudio de Aprovechamiento de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas

Ruth Concepción Alvarez Páez

Anastasio Sebastián Arce Encina

Facultad Politécnica – UNE

ITAIPU Binacional

Paraguay

Paraguay

RESUMEN

El Paraguay cuenta con grandes aprovechamientos hidroeléctricos tales como Itaipu, Yacyreta y Corpus, futuramente. Así también cuenta con innumerables recursos hidráulicos de pequeño porte, como son los pequeños ríos y arroyos, que aprovechando adecuadamente podrán contribuir significativamente en el atendimento de la demanda sin las pesadas inversiones en sistemas de transmisión, ya que estos pequeños aprovechamientos hidroeléctricos serían localizados próximo a la carga que debe atender.

Las PCH'S además de ser fuentes de energía renovable constituye una opción válida para el atendimento de cargas alejadas de la red e impulsando la electrificación rural y los beneficios asociados al mismo como iluminación, bombeo de agua, comunicación, etc. Estos mismos aprovechamientos cuando interconectados a la red podrá constituirse en un soporte importante para el atendimento en la demanda.

En este trabajo se presenta un estudio sobre aprovechamiento de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas – PCH. Los diferentes aspectos relacionados a los estudios de inventario de una cuenca hidrográfica que consiste en sintetizar la evaluación del potencial hidroeléctrico en un sitio de aprovechamiento. Se presenta también una evaluación del marco legal vigente que regula su instalación y/o operación, buscando apuntar los puntos que pueden constituirse como barrera para su desarrollo.

Para la evaluación del Potencial Hidroeléctrico en un posible sitio de aprovechamiento se tomó como referencia el Lago de la República en Ciudad del Este.

PALABRAS CLAVES

Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Energías Renovables, Recursos Hídricos, Potencial Hidroeléctrico.

1. PRINCIPALES FUENTES ENERGIAS DEL PARAGUAY.

La mayor parte del consumo de electricidad en el Paraguay es de origen hidráulico; existen zonas donde no llega el abastecimiento de electricidad motivo por el cual la principal fuente de energía es la biomasa, por estas dos grandes razones, se podría entender que las energías renovables representan la principal fuente de energía del país.

El Paraguay tiene abundante recursos en cuanto a energía hidráulica, solo que su aprovechamiento es hasta el momento a grande y muy gran escala. Respecto a los aprovechamientos a pequeña escala, no existen prácticamente instalaciones de aprovechamiento de energía hidráulica, a pesar de tener importante potencial en los afluentes del río Paraná, por la topografía accidentada de la zona que no solo tiene caudal en forma permanente, como también desniveles importantes [1]. Los afluentes del río Paraguay, también representan un potencial interesante de aprovechamiento de energía a través de la instalación de micro turbinas. Los datos cuantitativos sobre el potencial hidráulico de los pequeños ríos no fue posible obtener a pesar de las consultas en algunas instituciones del estado [2].

2. SECTOR ELÉCTRICO DEL PARAGUAY.

Conforme a la Ley 966/64, la ANDE goza del derecho preferencial para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos, pero no así del derecho exclusivo. Por lo tanto, dicha ley no establece ninguna limitación en cuanto a la posibilidad de que otras empresas puedan hacer el uso de los recursos hidráulicos para la producción de energía eléctrica y posterior abastecimiento en poblaciones no servidas por la ANDE. A pesar de esta disposición el sector eléctrico paraguayo está conformado fundamentalmente por empresas estatales y organismos normativos y reguladores:

- Entidades Empresariales: ANDE (Administración Nacional de Electricidad); ITAIPU; YACYRETA; Comisión Mixta Paraguay – Argentina del Río Paraná; Compañía de LUZ y FUERZA S.A. – CLYFSA.
- Organismos Normativos y Reguladores: MOPC (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones); Subsecretaría de Estado de Minas y Energía; Contraloría General de la República; Ministerio de Relaciones Exteriores; Un equipo económico; Secretaría Técnica de Planificación.

3. SECTOR HÍDRICO DEL PARAGUAY.

El manejo de los Recursos Hídricos en el Paraguay está regido por la *Ley 3239/2007* promulgada en fecha 10 de julio de 2007, esta ley regula el manejo sustentable y total de los Recursos Hídricos, cualquiera sea su ubicación, estado físico o su ocurrencia natural dentro del territorio paraguayo. Los recursos hídricos son considerados por el Estado como un bien finito y vulnerable capaz de adquirir valores económicos, social y ambiental [4].

La evaluación del impacto ambiental regida por la *Ley 294/93* tiene como encargado de su aplicación a la Dirección de Calidad Ambiental y los Recursos Naturales de la SEAM. Además de la SEAM se debe mencionar al Consejo Nacional de Aguas como otro órgano

involucrado en el manejo de los recursos hídricos en el Paraguay. Por tanto existen dos organismos estatales de control:

El Consejo Nacional de Aguas (CONAGUAS), que es la encargada de otorgar permisos y concesiones del uso y aprovechamiento del agua; la Secretaría del Ambiente (SEAM), que es la encargada, exclusivamente, de otorgar el derecho de uso de los Recursos Hídricos. Así también, la SEAM, conforme a sus normas internas deberá coordinar acciones en los asuntos de interés común con el Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social (MSPBS) [4].

La SEAM, es la institución encargada de regular el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos para generación de energía eléctrica.

4. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS – PCHs.

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, son centrales de generación hidroeléctrica con una potencia de generación baja. Comúnmente, es construida en zonas aisladas y no representan mucha importancia al sistema de interconexión nacional por tener un área de influencia muy pequeña. Este tipo de central, tiene la desventaja de proporcionar una corriente eléctrica variable, por que depende directamente de los cambios climáticos y meteorológicos que pueden hacer variar el flujo de agua, en consecuencia la cantidad de agua disponible.

4.1 Clasificación de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

De acuerdo a la potencia instalada [5], se tiene:

Tabla I: Clasificación de PCH según su potencia instalada.

POTENCIA KW (kilovatios)	TIPO
0 – 50	Micro central
50 – 500	Mini central
500 – 5000	Pequeña Central

Según la caída [5], se tiene:

Tabla II: Clasificación de PCH según su caída.

	BAJA m (metros)	MEDIA m (metros)	ALTA m (metros)
Micro	H < 15	15 < H < 50	H > 50
Mini	H < 20	20 < H < 100	H > 100
Pequeña	H < 25	25 < H < 130	H > 130

En la tabla III se presenta una comparación de las ventajas que existen entre las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas con las Grandes Centrales Hidroeléctricas [5].

Tabla III: Ventajas entre PCHs y Grandes Centrales Hidroeléctricas.

PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS.	GRANDES CENTRALES HIDROELECTRICAS.
Generalmente se diseñan para el caudal mínimo.	Necesitan reservorios de millones de metros cúbicos.
Es posible administración local.	Administración centralizada.
Uso de tecnologías locales, capacidades locales.	Uso de tecnologías importadas y capacidades importadas.
Tiempos de construcción corta.	Largo tiempo de construcción.
Las obras civiles para la construcción son generalmente simples.	Las obras civiles son más complejas.
Muy poco impacto ambiental.	Gran impacto ambiental.

5. ESTIMACION DEL POTENCIAL HIDROELECTRICO DE UNA PCH.

La evaluación del Potencial Hidroeléctrico en un posible sitio de aprovechamiento de una región o país es importante para la planificación del uso racional de los recursos hidráulicos. Existen muchas técnicas y métodos para la evaluación del potencial hidroeléctrico de un posible sitio de aprovechamiento. Las técnicas se clasifican de acuerdo al grado de información que se tenga del sitio, tales como, información hidrológica, geológica y regional. Los métodos se clasifican en métodos directos y métodos de operación de embalse.

Métodos directos.

Los métodos directos utilizados para evaluación del potencial hidroeléctrico en un determinado sitio de aprovechamiento se basa en informaciones de hidrología y topografía disponible. Este método se aplica en el caso de que la información sea deficiente, cuando no existe posibilidad de regulación del caudal afluente en el sitio de interés.

Para determinar la evaluación del potencial hidroeléctrico se utiliza la siguiente formula:

$$P = 0,00981 * \alpha * Q * H; \quad (1)$$

donde **P** es la potencia en Megawatts [MW]; **Q** es el caudal considerado en [m³/s]; **H** es la caída bruta en [m] y **α** es un coeficiente que tiene en cuenta la eficiencia global del sistema.

Entre los métodos directos de evaluación del potencial hidroeléctrico se mencionan: Potencial Bruto o Lineal y la Metodología OLADE (Organización Latinoamericana de Energías)1983 para inventario hidroeléctrico [6].

5.1.1 Potencial Hidroeléctrico Bruto o Lineal.

El método de Potencial Hidroeléctrico Bruto evalúa el potencial total de una cuenca. Ésta puede ser evaluada para un posible sitio de aprovechamiento. Está dado por la siguiente ecuación:

$$PMAB = 0,00981 * Q_M * A_{MB} \quad (2)$$

donde A_{MB} es la altura máxima bruta en el sitio de aprovechamiento en [m]; Q_M el caudal medio anual en el posible sitio de aprovechamiento en [m³/s]; **PMAB** es el potencial medio anual bruto en el posible sitio de aprovechamiento en [MW].

5.1.2 Metodologías de OLADE para la evaluación del Potencial Hidroeléctrico.

Para la evaluación del potencial hidroeléctrico, existen cuatro metodologías propuestas por la OLADE, estos son:

- **Potencial hidroenergético estimado basado en el potencial bruto superficial de escorrentía.**

El Potencial Hidroenergético estimado es un método aplicado en la evaluación el Potencial Bruto Superficial de un posible sitio de aprovechamiento como:

$$PBS = 0,00981 * Q_M * \frac{A_{MB}}{2} \quad (3)$$

donde A_{MB} es la altura máxima bruta del posible sitio de aprovechamiento en [m]; Q_M el caudal medio anual del posible sitio de aprovechamiento en [m³/s]; **PBS** es el potencial bruto superficial en el posible sitio de aprovechamiento en [MW].

- **Potencial hidroenergético estimado basado en el potencial bruto lineal.**

El potencial bruto lineal de un posible sitio de aprovechamiento puede ser evaluado utilizando la ecuación (2).

- **Potencial hidroenergético estimado no individualizado.**

Este método de evaluación del potencial hidroenergético se realiza cuando no es posible identificar sitios probables de aprovechamiento y entonces se hace una evaluación para tramos del río con posibilidades energéticas. El potencial de cada tramo es calculado suponiendo que la altura bruta del tramo es aprovechada en su totalidad.

La potencia firme de un tramo del río se obtiene según la siguiente ecuación:

$$P_{FIR} = 0,0025 * Q_{REG} * A_{BT} ; \quad (4)$$

$$Q_{REG} = \alpha * Q_M \quad (5)$$

donde A_{BT} es la altura bruta del tramo del río considerado en [m]; Q_{REG} es el caudal regularizado en [m³/s]; P_{FIR} es la potencia primaria o disponible en [MW]; Q_M es el caudal medio anual y α es el coeficiente de regularización. Este coeficiente se determina mediante un estudio de operación del posible aprovechamiento.

$$Q_{REG} = 2 * Q_{REG95} \text{ para plantas con embalses} \quad (6)$$

$$Q_{REG} = 1.1 * Q_{REG95} \text{ para plantas a filo de agua} \quad (7)$$

Caso de no tenerse ninguna información se recomienda adoptar, $\alpha = 0.6$

- **Potencial hidroenergético individualizado.**

Esta metodología de evaluación del potencial se hace cuando es posible identificar sitios probables de aprovechamiento hidroeléctrico.

$$P_{FIRM} = 0,0072 * Q_{REG} * A_{MB}; \quad (8)$$

$$Q_{REG} = \alpha * Q_M \quad (9)$$

donde Q_{REG} es el caudal regularizado en $[m^3/s]$, A_{MB} es la altura máxima bruta para el posible sitio de aprovechamiento en metros, Q_M es el caudal medio anual y α es el coeficiente de regularización y P_{FIR} es la potencia primaria o disponible en [MW].

Métodos de operación de embalse.

Los métodos de operación de embalse determinan el potencial hidroeléctrico de un determinado sitio de aprovechamiento. Este método tiene una elevada precisión en la evaluación del potencial hidroeléctrico, solo que generalmente son poco utilizados debido a la gran cantidad de información que requieren en las etapas iniciales del inventario. Este método solo es aplicado cuando existe posibilidad de regulación anual en el sitio.

El método para la operación de los embalses en la evaluación del potencial hidroeléctrico es el de simulación de la operación de los embalses. Dentro de esta metodología existen varias formas para resolver el problema. Ellas se clasifican en tres grupos que son:

5.2.1 Simulación de la operación de un embalse mediante curvas de masa.

Es un método gráfico analítico que determina la curva de masa de entrega a partir de las curvas de masa de los aportes y las demandas aplicando una regla de operación específica.

5.2.2 Simulación de la operación de un embalse mediante movimiento de embalse.

Este método realiza una simulación de la variación de los volúmenes de agua almacenados usando una regla de operación específica y como herramienta básica la ecuación de balance de masas pudiendo calcularse la disponibilidad para cada periodo de tiempo.

5.2.3 Simulación de la operación de un embalse mediante simulación detallada.

Este método hace una representación minuciosa del sistema, incluyendo todas sus características físicas y operacionales y definiendo las entregas que deben hacerse por medio del uso de una regla de operación específica.

La regla de operación de un embalse representa el criterio con que debe utilizarse el agua en el embalse, esta regla de operación se puede clasificar como explícita e implícita. Las explícitas son las que tienen forma definida con anterioridad a la operación del embalse, en cambio las implícitas no tienen ninguna forma definida y son resultado de la simulación u optimización de la operación de embalse.

Existen diferentes reglas de operación utilizadas para la determinación del potencial hidroeléctrico de un embalse, estas son: la regla normal de operación (es la que define la cantidad de agua a ser entregada por el embalse); la tasa de almacenamiento y algunas variantes de la regla normal de operación que serán optimizadas utilizando distintos criterios evaluadores como: confiabilidad o probabilidad de falla.

Algunos embalses son obligados a atender demandas de consumo para regadío, de producción de energía eléctrica, restricciones de volumen mínimo para turismo y actividades de piscicultura. En estos caso la regla de operación debe atender estas restricciones.

5.3 Conclusiones y Recomendaciones de los métodos de evaluación de potencial hidroeléctrico de un posible sitio de aprovechamiento.

Para el caso de existir la posibilidad de regulación anual mediante la construcción de una presa en el posible sitio de aprovechamiento, se debe usar métodos de operación de embalses para evaluar el potencial hidroeléctrico. Los métodos directos solo deben utilizarse para el caso de que la información requerida para aplicar el método de operación de embalse no esté disponible, se recomienda para dicho caso, utilizar los métodos que evalúan el potencial hidroeléctrico en el sitio.

Cuando se determina el potencial hidroeléctrico mediante técnicas de operación de embalse, se recomienda el uso de series de caudales afluentes (longitud igual o mayor a 25 años) generadas sintéticamente que permitan definir el valor esperado de ese potencial. La evaluación del potencial hidroeléctrico se debe realizar con una visión regional general, evitando así la posible existencia de usos conflictivos del agua [6].

5.4 CALCULO DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO DEL LAGO DE LA REPÚBLICA.

Se considera como una central de pasada al lago de la república por no poseer volumen apreciable del embalse que permita alguna regulación mínima. La turbina a utilizarse debe aceptar el caudal natural del lago, con sus variaciones de estación en estación. Si este es mayor a lo necesario, el agua sobrante se pierde por el vertedero.

Para la estimación del potencial hidroeléctrico, se toma como referencia la cuenca del arroyo Amambay y del lago de la República – CDE, Py. La microcuenca del Arroyo Amambay está ubicada en el Municipio de Ciudad del Este. Tiene un recorrido de Oeste a Este, con una longitud aproximada de 12 km. La diferencia de los periodos secos y húmedos que son muy marcados en el año hidrológico, hace que el arroyo Amambay sea de régimen muy irregular, con mucho arrastre por lo que actualmente el embalse está colmado, casi sin ninguna capacidad de retención de agua.

A continuación, se presenta una tabla donde se citan los parámetros fisiográficos de la Microcuenca (nacientes hasta el lago), del lago de la república y de la presa [7].

Tabla IV: Clasificación de PCH según su caída.

	MICROCUENCA	LAGO	PRESA
Area	23,6 km ²	0,22 km ²	
Longitud Cauce Principal	7,2 Km.		
Altitud media	215 m.s.n.m.	160 m.s.n.m.	
Pendiente del curso principal	1 %		
Pendiente de la cuenca	6 %		
Máxima descarga media mensual	2,4 m ³ /s		
Mínima descarga media mensual	0,200 m ³ /s		
Largo		2 Km.	
Ancho		120 a 180 m	10 m
Profundidad (parte más honda)		6 m	
Volumen útil		152.840 m ³	
Sección			Asimétrica
Altura máx. (parte interna del lago)			3 m
Altura máx. (parte externa del lago)			7 m
Longitud de la corona			160 m

Según la DINAC, la precipitación media total anual (1979 - 2004) en la Microcuenca es de 1.887,2 mm. El año hidrológico se inicia en el mes de Octubre con las primeras lluvias, sigue un periodo de descargas altas desde Noviembre hasta Marzo y otro de descarga bajas o estiaje de Junio a Setiembre.

El lago de la República se emplaza en el cauce del arroyo, comprende: la presa que se utiliza como vía, el aliviadero. Está ubicado en el centro del Municipio de Ciudad del Este, aproximadamente a 25° 31' de latitud Sur y 54° 37' de longitud Oeste.

La presa se localiza sobre el curso inferior del arroyo Amambay, en un estrechamiento del valle con laderas inclinadas. Se constituye como el de mayor capacidad, en lagos artificiales del Paraguay.

Para la evaluación del potencial hidroeléctrico del lago de la república se utilizó el Método Directo - Potencial Hidroeléctrico Bruto o Lineal.

El potencial medio anual bruto está dado por la siguiente ecuación:

$$PMAB = 0,00981 * Q_M * A_{MB}$$

Estimando como dato: el caudal medio anual del lago de la república igual a 2,5 [m³/s] y la altura máxima bruta del lago igual a 10 metros [m]. A pesar de constituirse en la principalmente fuente de abastecimiento de agua de la ciudad, no se tiene ningún registro de los valores de afluencia al embalse. La estimativa está basada en los registros de consumo de agua obtenido de la Planta de Tratamiento de Agua de Itaipu.

$$PMAB = 0,00981 * 2,5 * 10$$

$$PMAB = 0,245 \text{ [MW]}$$

$$PMAB = 245 \text{ [KW]}$$

El potencial hidroeléctrico que el lago de la república puede generar mediante una pequeña central hidroeléctrica es de 245 [KW].

Para el cálculo estimativo del potencial hidroeléctrico no se ha considerado las pérdidas hidráulicas posibles en las turbinas instaladas en la PCH, ya que estas pérdidas dependerán de las dimensiones del circuito hidráulico.

Considerando el consumo de energía de la iluminación de los alrededores del lago, de los parques que están a su alrededor, y algunas viviendas que están aledaños a él se tiene el siguiente cálculo realizado:

Tabla V: Ejemplo de consumo las iluminaciones de los alrededores del lago y de los parques.

Consumo iluminación del lago y parques.	Potencia en Watts	Horas de uso diarias	Consumo Mensual en Watts
Lámparas	80 * 100 = 8000	8	1.920.000
Lámparas (reflectores)	150 * 100 = 15.000	8	3.600.000
Total consumo mensual en [W]			5.520.000
Total consumo mensual en [kWh]			5.520

$$\frac{5.520 \text{ kWh}}{30 \text{ días} * 24 \text{ horas}} = 7,76 \text{ KW}$$

Tabla VI: Ejemplo de consumo de una vivienda.

Ruth Concepción Alvarez Páez ruth_17a@hotmail.com

Consumo iluminación o electrodomésticos.	Potencia en Watts	Horas de uso diarias	Consumo Mensual en Watts
Fluorescente	6 * 40 = 240	3	21.600
Foco incandescente	3 * 100 = 300	3	27.000
Ducha eléctrica	1 * 300 = 300	0.6	5.400
Lavadora	1 * 400 = 400	0.58	7.000
Heladera	1 * 400 = 400	8	96.000
Licuada	1 * 300 = 300	0.25	2.250
Bomba de agua ½ HP	1 * 440 = 440	0.25	3.300
Plancha	1 * 1000 = 1000	0.5	15.000
Ventilador de techo	3 * 100 = 300	3	9.000
Varios	2 * 100 = 200	1	6.000
TV de 14 plg.	1 * 180 = 180	5	27.000
Total consumo mensual en [W]			219.550
Total consumo mensual en [kWh]			219,55

$$\frac{219,55 \text{ KWh}}{30 \text{ días} * 24 \text{ horas}} = 0,305 \text{ KW por vivienda}$$

Consumo por iluminación del lago y los parques = 7,73 KW
 Consumo de una vivienda = 0,305 KW
 Total = 8,035 KW

245 KW (PCH) - 7,73 KW (iluminación) = 237,27 KW

$$\frac{237,27 \text{ KW}}{0,305 \text{ KW}} = 777 \text{ viviendas}$$

Por los datos de consumo estimados en las tablas V y VI se puede destacar que el potencial hidroeléctrico del Lago de la República es suficiente para atender la demanda del alumbrado público en las proximidades del propio lago como también otras demandas equivalentes a 700 viviendas típicas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Viceministerio de Minas y Energías disponible en:
http://www.ssme.gov.py/VMME/sector%20energetico/PlandeEnerg/pese/13%20VII%20%20Ener_Renovab.pdf. Acceso el 22 de Mayo de 2008
- [2] Diego Camilo Mora Navarro y Jorge Mauricio Hurtado, 2004. Guía para Estudios de Prefactibilidad de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas como parte de Sistemas Híbridos. Tesis de Trabajo Final de Grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C.
- [3]] Viceministerio de Minas y Energías disponible en:
www.ssme.gov.py/VMME/sector%20energetico/PlandeEnerg/pese/13%20VII%20Ener_Renovab.pdf. Acceso el 19 de Mayo de 2008.
- [4] Secretaria del Ambiente disponible en www.seam.gov.py. Acceso el 12 de Mayo de 2008
- [5] Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Ramiro. McGraw Hill, 2001
- [6] Estimación del Potencial Hidroeléctrico, Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT) y el Departamento de Desarrollo Regional de la Organización de los Estados Americanos (OEA), 1987, páginas 7 al 9; 47 al 51; 56; 59; 64; 83 al 85; 87; 93; 106.
- [7] Intranet. Itaipu Binacional. Disponible en:
http://intranetbr/bibvirtual/evento/files_meio_ambiente/recursos_hidricos_congresso/index_trabalhos/calidad_de_agua/caracterizacion_lago_de_la_republica_cde.pdf