

UTILIZACION DE MICROTURBINAS PARA LA GENERACION ELECTRICA EN EL MEDIO RURAL.

José Luis Genta
Alvaro Acosta

Instituto de Mecánica de los Fluidos e
Ingeniería Ambiental.

Ventura Nunes
Ruben Chaer

Instituto de Ingeniería Eléctrica

FACULTAD DE INGENIERIA, MONTEVIDEO, URUGUAY.

RESUMEN

La utilización de microturbinas para generación eléctrica ya sea en sistemas autónomos o en conexión a la red nacional se presenta como una alternativa cuya viabilidad ha sido estudiada en el marco de un Convenio celebrado entre la Administración de Usinas y Trasmisiones del Estado y la Facultad de Ingeniería.

El estudio tiene dos componentes bien diferenciadas según el tipo de aprovechamiento:

Para potencias mayores de 1 MW y hasta 5 MW (pequeños aprovechamientos hidráulicos), se evaluó el potencial de generación en todo el país, caracterizando los sitios según la longitud y altura del cierre y el caudal a turbinar, a través de un coeficiente que relaciona volumen del dique con la potencia a instalar.

Si se consideran potencias menores a 1 MW o menores a 100 kW (mini o micro aprovechamientos), la información disponible en mapas con curvas de nivel, inclusive en los de escala 1:50.000, no es suficiente para identificar los sitios más adecuados, siendo indispensable en estos casos el conocimiento del lugar.

Para todo el rango del estudio (hasta 5 MW) se implementó una metodología de cálculo primario, a partir de un mínimo de información de campo, que permite una primera estimación de la viabilidad de un determinado sitio y la selección del tipo de turbina, para un posterior estudio más detallado.

1. INTRODUCCION.

En el estudio realizado tuvo un papel protagonista el censo de potenciales usuarios y el análisis preliminar de sitios representativos de las diferentes soluciones técnicas adecuadas a la diversidad de condiciones topográficas y de demanda.

Para potencias entre 1 y 5 MW, se determinará el potencial de generación de todo el país a partir de cartas hipsográficas.

Se realizó el anteproyecto de diversos sitios, uno de los cuales se describe con cierto detalle.

En el costo total de estos aprovechamientos, el costo de la obra civil constituye la parte principal. Resulta casi imprescindible vincular la instalación de microturbinas a condiciones ventajosas en relación a la obra civil, ya sea por condiciones topográficas muy favorables, o por que existan otros objetivos económicos para las obras.

Se analizó en general el tipo de generador eléctrico más apropiado para cada aplicación, el sistema de control y la protección eléctrica a instalar en cada caso.

2. EVALUACIÓN PARA TODO EL TERRITORIO NACIONAL DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ENTRE POTENCIAS DE 1 Y 5 MW.

Para la evaluación del potencial de generación en potencias (W) entre 1 y 5 MW, se predefinió la escurrentía (Q), el rendimiento de turbinas (τ), y el salto hidráulico (H) y se supuso que existe un embalse suficiente por lo cual los diferentes rangos de potencias (1,2,3,4 y 5 MW) están asociados al área de la cuenca (Ac) tributaria del punto de localización de las micro-represas.

A partir de cartas hipsográficas 1:500.000 con curvas de nivel cada 50 m se identificaron 107 puntos de localización de microrepresamientos, a partir de los cuales se trazaron las curvas de isopotencia. El área encerrada por dichas curvas permite calcular el potencial de generación en cada rango de potencia.

	Area (Km ²)	Potencia (MW)	Puntos
1 MW	47704	55.2	55
2 MW	38073	44.8	22
3 MW	44375	52.2	17
4 MW	39739	46.7	11
5 MW	8698	10.2	2
Total	178598	209.1	107

Figura 2.1. Potencial de generación

cartográfica disponible en el país, no se puede esperar un gran desarrollo de la generación hidroeléctrica a no ser que la misma se realice en el marco de un desarrollo económico global de una región, justificándose la realización de un embalse si el mismo es compartido para otros fines tales como: riego, abastecimiento de agua potable, control de crecidas.

En aquellos sitios donde existe información cartográfica con curvas de nivel cada 10 metros, se pudo realizar una estimación de la longitud del dique, en dichos casos es posible realizar una selección de los sitios más convenientes para diferentes rangos de potencia, que está indicado en la figura 2.1 (mayores a 1 MW y menores a 5 MW), obteniéndose así una primera aproximación a la localización de los sitios donde posiblemente es económicamente viable la instalación de microturbinas.

De la metodología seguida, ajustada a la información

3. PRIMERA ESTIMACIÓN DE LA VIABILIDAD DE UN DETERMINADO SITIO Y SELECCIÓN DEL TIPO DE TURBINA

3.1 Caudal a turbinar y Salto disponible.

El caudal a turbinar depende de las características hidrogeológicas de la cuenca y de las precipitaciones. El salto disponible, de las características topográficas del punto de cierre de la cuenca.

Cuando el caudal a turbinar es muy bajo, éste debe compararse con el caudal de estiaje.

Cuando se necesita una regulación, la altura y longitud del dique y el volumen de embalse se estiman a partir de las características topográficas del punto de cierre de la cuenca y del salto disponible, que es la diferencia entre el nivel aguas arriba de la obra civil y el nivel de restitución de aguas abajo.

Para disponer de una información de todo el país, se realizaron análisis lluvia-caudal (precipitación efectiva) y cálculos numéricos para un gran número de estaciones pluviométricas y para dos cuencas de comparación y se confeccionó un mapa con isoyetas de precipitación media efectiva mensual (P_{mef}).

Se relacionó el número de meses (N) de almacenamiento del caudal medio (Q_m) en el embalse de volumen (V) con el grado de regulación (r)

$$N = 24.195 * r^{2.00359} \text{ si } r < 0.8$$

$$\text{donde } N = V / P_{mef} / Ac * 10^3$$

$$r = Qt / Qm$$

siendo Ac el área de la cuenca y Qt el caudal turbinado.

Estos cálculos son una primera aproximación pues no se tuvo en cuenta factores como la evaporación y la precipitación directa en el vaso.

Para realizar un diseño más ajustado, se ha desarrollado una metodología que utiliza la serie histórica de lluvias mensuales de un pluviómetro cercano.

3.2 Selección de la turbina.

Una vez determinado el salto disponible y el caudal a turbinar, sea por la regulación o a partir del caudal de estiaje, para realizar la selección de la turbina (potencia, tipo y costo) se confeccionó el Cuadro 3.1.

Este cuadro se determinó en la hipótesis de empleo de una sola turbina para la potencia indicada. El uso de turbinas en paralelo es una posibilidad que debe analizarse en cada caso particular, ya que, al reducirse el caudal que pasa por cada turbina, permite obtener una mayor velocidad de giro con una máquina del mismo tipo.

Ql(m ³ /s)	SALTO DISPONIBLE (m)			
	2	5	10	15
0.05	0.5*	1.4*	2.3*	4.3*
0.01	1.1*	2.8*	5.5*	8.5*
0.50	7.0	14.0*	28.0*	45.0*
1.00	14.0	35.0*	55.0*	98.0*
2.00	40.0	65.0	150.0	204.0*
5.00	68.0	190.0	400.0	600.0*
10.00	155.0	380.0	760.0	1260.0
20.00	305.0	760.0	1750.0	2400.0
50.00	760.0	1970.0	4000.0	6000.0

Cuadro 3.1. Potencia (kW) y tipo de turbina

Tipos de turbinas y costos considerados incluyendo el generador

(1) Michell Banki (Indicado con *)

potencias < 200 kW autónoma 300 U\$/kW

potencias > 200 kW autónoma 500 U\$/kW

conectado a la red 200 U\$/kW

(2) AXIAL

potencias < 200 kW autónoma 400 U\$/kW

potencias > 200 kW autónoma 780 U\$/kW

potencias > 40 kW conectado

red equipo sumergible 600 U\$/kW

potencias < 200 kW con. red 300 U\$/kW

Los criterios utilizados para la confección del cuadro de selección propuesto fueron los que se indican a continuación:

a. Para el rango de potencias menores de 1 MW (mini y micro aprovechamientos) se supuso que minimizar el costo inicial del equipo resulta prioritario frente al rendimiento de la microturbina. Esta suposición es particularmente válida para los casos en que la potencia requerida por el usuario se obtiene con un caudal mucho menor que el caudal medio del río y no existe regulación del embalse.

En base a este criterio, se seleccionaron turbinas de flujo cruzado (Michell-Banki) siempre que fue posible.

b. Se trató de asegurar una velocidad mínima de giro de la microturbina para evitar en lo posible el uso de multiplicadores de velocidad de engranajes, los cuales son costosos e introducen pérdidas de potencia adicionales. Se eligió como velocidad de giro mínima de la turbina 150 rpm.

c. Para el rango de potencias mayores a 1 MW se seleccionó el equipo de mayor rendimiento que satisface la explotación. En este caso, se trata de pequeñas centrales, que tienen seguramente un embalse regulador.

El tipo de máquina que ofrece el mayor rendimiento para los casos seleccionados son las turbinas axiales, siendo en general equipos bulbo.

Como consecuencia de las características de funcionamiento de los equipos elegidos, el cuadro de selección garantiza un rendimiento global mayor al 56% para los equipos de potencias mayores a 5kW y un rendimiento global del 80% para los equipos de potencias mayores a 1 MW.

4. SELECCION DE LA OBRA CIVIL.

La selección de la obra civil está vinculada a las características topográficas y geológicas, a los materiales disponibles y a la potencia a ser instalada.

Se considera que cuando hay un embalse sin o con una pequeña regulación, la presa debe ser vertedora, o sea que desaparece sumergida durante las crecidas. Eventualmente, la presa no tiene núcleo o pantalla impermeable. Esto es importante para localizaciones en contextos geológicos rocosos. Se eligen como posibles materiales para su construcción: hormigón o enrocado.

Cuando hay una gran regulación, se elige como posibles materiales de la presa: tierra o enrocado.

Las presas de tierra (suelos cohesivos) constituyen un tipo de obra de cierre muy utilizado debido a su bajo costo así como por la disponibilidad de tales materiales dadas las características geotécnicas y topográficas de buena parte del territorio. En estos casos se debe considerar un aliviadero para evacuar las grandes crecidas.

5. EQUIPAMIENTO ELÉCTRICO.

El sistema básico de generación comprende la turbina hidráulica, el generador eléctrico, el control y los aparatos de conexión a la red externa y de protección del sistema.

El equipamiento eléctrico asociado puede variar según el valor de potencia del sistema en consideración, justificándose la utilización de componentes de más costo en los que generan mayor potencia

5.1 Modalidades de generación.

Desde el punto de vista de la utilización conexión del generador eléctrico de mini y micro aprovechamientos hidroeléctricos, se distingue la generación dentro de un sistema eléctrico, en el cual el aporte de la planta cogeneradora es marginal, o de un sistema autónomo.

En el primer caso, la estación cogeneradora no afecta a la red eléctrica en su comportamiento, salvo en las inmediaciones de la planta. En el segundo caso, la planta será la única fuente del sistema o se integrará a otras fuentes.

Las soluciones de equipamiento eléctrico adoptadas en cada caso son diferentes.

La generación autónoma, surge como alternativa muchas veces económicamente más conveniente, al tendido de líneas para llegar con la red eléctrica, hasta consumidores remotos.

La integración de diversas fuentes renovables no contaminantes a un sistema ha despertado un interés creciente en los últimos años por sus ventajas económicas y ecológicas.

5.2 Selección del generador.

Es posible elegir como generador eléctrico máquinas de corriente continua o de corriente alterna. Las primeras pueden ser con devanado de excitación o de imanes permanentes. Los generadores de alterna pueden ser asíncronos o síncronos. En este último caso, además de los convencionales, se emplean los de imanes permanentes o los de reluctancia variable.

Los dos aspectos más importantes a tener en cuenta en el diseño de generadores para aplicaciones hidro-eléctricas en el rango de 500kVA - 5MVA son la inercia y la capacidad de sobre-embalamiento.

La falla más importante a considerar es la pérdida de carga del generador. Ante esta contingencia, el conjunto turbina-generador aumentará de velocidad quedando fijada la aceleración por la inercia del conjunto.

Es importante que el conjunto turbina-generador tenga una inercia suficientemente elevada como para permitir a las protecciones contra sobrevolución actuar a tiempo. La capacidad de sobrevolución determina el valor de la velocidad de rotación máxima que puede alcanzar el conjunto sin daño mecánico.

Para disminuir el riesgo de daño mecánico, se pueden adoptar distintas precauciones:

- Diseñar la turbina para que en funcionamiento sin carga, la velocidad límite alcanzada sea inferior a la máxima admisible por el generador
- Proveer al conjunto de frenos mecánicos de accionamiento automático.

De las dos soluciones propuestas, la primera tiene el inconveniente de condicionar el diseño de la turbina imponiendo un límite de funcionamiento en vacío que disminuye el rendimiento en funcionamiento normal con respecto a turbinas diseñadas sin estos requerimientos. Sin embargo si se elige una protección de este tipo, se obtendrá un sistema económico y muy robusto.

La segunda de las soluciones, si bien no disminuye el rendimiento de la turbina, agrega complejidad tanto en la implementación y mantenimiento de un freno mecánico como de la lógica de mecánica o electrónica que se utiliza para detectar la sobrevolución y accionar el freno.

5.2.1 Micro aprovechamientos para generación de corriente continua. (0.5 a 100kW).

Esta clase de micro aprovechamientos puede emplearse para disminuir sensiblemente el tamaño del banco de baterías necesario en un sistema autónomo basado en otro recurso renovable como puede ser el solar o el eólico.

Generador Sugerido:

potencia [kW]	MS	GI	IP
	número de sugerencia		
0.5 - 1	1	2	1
1 - 10	1	2	no
10 - 100	1	2	no

Donde:

MS = máquina sincrónica

GI = máquina de inducción

IP = máquina de imanes

permanentes

número de sugerencia = prioridad para elegir. (Por ejemplo, si el número de sugerencia es 1 se sugiere elegir esta máquina antes que las demás.)

En aplicaciones solares, se limita la potencia a no más de 1kW debido al alto costo tanto del banco de baterías como de los paneles. En aplicaciones eólicas es factible llevar el límite de potencia hasta los 100kW.

En este caso, las máquinas de alterna se emplean en conjunto con un rectificador, comúnmente un puente de diodos.

Las máquinas sincrónicas de imanes permanentes son las de más bajo mantenimiento y más robustas pero en general son de elevado costo, salvo en los casos en que se utilizan en otras aplicaciones.

Las GI son muy baratas y robustas, pero tienen el inconveniente de utilizar condensadores para generar en forma autónoma y de ser complejo su control. Por estas razones son poco atractivas para estaciones autónomas de poca potencia.

Sobre las MS existe mucha experiencia de campo en otras aplicaciones. Así, por ejemplo, es posible utilizar alternadores para automóviles, alternativa que se ha adoptado en varias instalaciones eólicas rurales para cargar baterías.

5.2.2 Sistemas autónomos para generación de alterna. (0.5 a 500kVA).

Generador Sugerido:		
potencia [kVA]	MS	GI
	número de sugerencia	
0.5 - 1	1	2
1 - 10	1	2
10 - 500	1	2

Aquí las sugerencias se basan principalmente en los sistemas autónomos que se encuentran funcionando. El generador más usado es la máquina sincrónica autoexcitada conocida como "Brushless". La tensión generada es fácilmente controlable por intermedio de la corriente de excitación.

Las máquinas de inducción son más baratas y robustas que las máquinas sincrónicas. Con el abaratamiento de la electrónica, tanto de

potencia como de control, el costo de la complejidad de su control es cada vez menor siendo ya en este momento económicamente conveniente para potencias menores que 300kW.

La falta de experiencia nacional en la utilización de las GI para estos propósitos permite prever que en las instalaciones que se realicen en el corto plazo se utilizarán MS.

5.2.3 Sistemas para generación conectados a una red fuerte (0.5 a 5MW) (cogeneración).

La regulación de frecuencia y tensión es responsabilidad prácticamente de la red de distribución existente, si bien es posible gobernar en cierto grado la tensión variando el valor de la potencia reactiva intercambiada en el punto de conexión.

Generador Sugerido:		
potencia [Kw]	MS	GI
	número de sugerencia	
0.5 - 1	2	1
1 - 10	2	1
10 - 300	2	1
300 - 5MW	1	2 (*)

(*) Para este rango, existen pocos casos de utilización de GI empleándose en general las MS. La principal ventaja del GI es la posibilidad de conexión directa, sin dispositivos de sincronización, pero en este rango, dicha conexión puede causar problemas a los usuarios más próximos.

menor costo por unidad, menos mantenimiento, rotor más robusto y sin escobillas (para el caso de jaula de ardilla) y operación en forma asíncrona.

5.3 Control

5.3.1 Estación para Cogeneración

En estas estaciones, la regulación de velocidad no es necesaria ya que tanto la tensión como la frecuencia de generación quedan fijadas por la red. La posibilidad de regular el caudal de agua permitiría en caso de que exista embalse, reservar agua para producir la energía en las horas en que es más necesaria o con una tarifa más conveniente.

Para este tipo de plantas de generación, el generador de inducción (GI) presenta varias ventajas respecto al clásico alternador tales como:

5.3.2 Estación Autónoma

En los sistemas autónomos, se necesita controlar la tensión y la frecuencia de generación, que dependen de las variaciones de la carga del generador. Las variaciones del caudal de agua son siempre de constantes de tiempo considerablemente mayores.

5.3.2.1 Control de velocidad por variación del caudal

Se basa en variar el caudal de agua que pasa por la turbina regulando así la potencia generada. Este tipo de control es lento y puede ser usado sin ninguna técnica adicional cuando el comportamiento esperado del sistema en cuanto a regulación de frecuencia no es muy exigente.

La principal utilidad del control de caudal es la posibilidad de cambiar el punto de funcionamiento dejando la regulación de frecuencia y tensión a otros tipos de control como el que se describe a continuación.

5.3.2.2 Control Electrónico de la Carga

El método empleado consiste en utilizar una carga "fantasma" en paralelo con el consumidor la cual se controla de manera tal que el total de carga del generador permanezca constante. La energía disipada en las cargas "fantasma" se puede utilizar para diversos usos tales como: calentamiento y enfriamiento de agua o accionamiento de molinos de granos, batidoras, etc.

La sofisticación del sistema de control quedará fijada por el costo y propósito del sistema final.

5.4 Protecciones eléctricas

En el caso de conexión a un sistema eléctrico, la explotación de la generación implica la definición de temas económicos, técnicos, legales y de seguridad, entre el propietario de los equipos de generación, la empresa eléctrica que tiene la responsabilidad de la operación de los circuitos de distribución y los otros clientes de la empresa.

La empresa eléctrica debe considerar los aspectos relativos a la calidad del servicio de todos sus clientes, aparte de las consideraciones particulares relativas a los que generan en paralelo.

5.4.1 Detección de fallas eléctricas y de condiciones anormales de funcionamiento.

Ante fallas del tipo de cortocircuito, la fuente adicional de aporte, debida a los generadores en paralelo, afectará la coordinación de los relés de protección, las capacidades de los equipamientos, la seguridad del personal de la empresa eléctrica y de las personas en general.

Según el valor de la potencia de cortocircuito con respecto al del sistema eléctrico deberán incorporarse relés instantáneos y temporizados o dispositivos del tipo de sobre o subfrecuencia, sobre o subtensión, para aislar el generador del sistema eléctrico en caso de defecto.

El equipo de generación deberá contar con los dispositivos usuales de protección ante las anomalías que se produzcan en el mismo.

Existe además un conjunto de situaciones anormales que deben detectarse como por ejemplo sobre o subtensiones, pérdidas de estabilidad, sobre o subfrecuencia, energización de circuitos sin tensión desde el generador particular, reconexión automática fuera de las condiciones de sincronismo, funcionamiento del generador en isla, alimentando un grupo de cargas en forma autónoma, aislados en algún punto de la red de distribución. En este caso, por lo general debido al tipo de control de velocidad y de tensión del generador, se producen frecuencias y tensiones anormales.

5.4.2 Equipamiento de maniobra

La conexión de generación en paralelo, impone exigencias adicionales a los equipos de maniobra, tales como por ejemplo capacidad de sincronización, u operación en condiciones de oposición de fase.

La sincronización está bajo la responsabilidad del encargado de la generación. En caso de generación sincrónica, el interruptor de sincronización debe tener un tiempo de cierre corto y estable, además de soportar entre sus contactos, la exigencia dieléctrica impuesta por la suma fasorial de las tensiones entre extremos.

6. ESTUDIO DE UN SISTEMA AUTÓNOMO EN EL ARROYO SOPAS

6.1 Localización, características del sitio y objetivos

Este arroyo es un afluente del río Daymán (departamento de Salto), a unos 3 km aguas abajo de Paso Cementerio. Se ubica en una zona basáltica (formación Arapey).

El propósito de este micro aprovechamiento es suministrar energía a Pueblo La Bolsa.

De acuerdo a lo oportunamente discutido con los pobladores se requiere de una solución que implique el menor costo inicial y que suministre una potencia eléctrica de 20 kW.

6.2 Parámetros a determinar

1) Altura del embalse

Se eligió una presa vertedora sumergible. Dada las características topográficas, de la sección que fue relevada por los pobladores, se consideró un dique que permite un salto hidráulico medio de 3,5 m.

2) Determinación del caudal de diseño

Dado que la potencia a suministrar esta impuesta, el caudal de diseño será resultado del tipo de turbina que se seleccione. No obstante, a los efectos de evaluar la firmeza de la potencia instalada, debe tenerse en cuenta que el caudal medio del arroyo es de 6,53 m³ /s estimado a partir del área de la cuenca (677 km²) y de la precipitación de la zona.

6.2.1 Selección de la Turbina

Se optó por colocar el grupo generador en la cota -3, esto implicará colocar una torre de 5,5 m de altura sobre la parte superior del dique. La transmisión de potencia resulta más conveniente si el eje de giro de la turbina es vertical y si la velocidad es la mayor posible razones por las cuales se selecciona una turbina axial de eje vertical.

6.3 Análisis de los componentes eléctricos

La instalación autónoma de 20 kW requiere una línea aérea trifásica de un km de longitud. Se elige utilizar como generador un alternador tradicional, trifásico, de valores nominales 27,5 kVA, 380 V con neutro.

Para el control de frecuencia, se seleccionó el método de control electrónico por la carga utilizando para ello dos bancos trifásicos de resistencias y tiristores con control del ángulo de disparo de los mismos. Al separar la carga de regulación en varios bancos, es posible realizar un control más fino de la potencia consumida por el conjunto y también es menor el contenido de armónicos no deseados de la corriente que absorbe la carga de regulación.

La línea, en 380 V con neutro, se realiza con tres conductores de aluminio de 70 mm² de sección más un conductor de 35mm² de sección para el neutro. El neutro se colocará a tierra tanto del lado del generador como del consumidor (y de ser posible también a lo largo de la línea en algunos puntos).

Se consideran dos alternativas del esquema general según que se instale la carga de regulación del lado del consumidor o del lado del generador.

La primera de las alternativas tiene la ventaja de permitir utilizar la potencia disipada en la regulación de frecuencia en el lugar donde se encuentra el consumidor, quien sin duda le encontrará utilidad. Sin embargo, este esquema tiene el inconveniente de separar el control en dos partes uno en cada extremo de la línea de transmisión, del lado del consumidor el de frecuencia, y del lado del generador el de la tensión.

La separación de la función de control duplica el costo del control pues las mismas funciones son realizables por un solo módulo de control en lugar de dos.

El costo total de la instalación, a precios de abril de 1993, es de aproximadamente US\$ 105000 del cual el 85 % corresponde a la obra civil.

7. BIBLIOGRAFIA

- Chow, Ven Te., "Handbook of Applied Hydrology", Mc. Graw Hill Book Company , 1964.
- US. Bureau of Reclamation "Diseño de Presas Pequeñas", Compañía Editorial Continental, México, Agosto 1966.
- De Souza, Z., "Microturbina Hidráulica Axial Tubular", Escola Federal de Engenharia de Itajubá, M.G. Brasil, 1992.
- Fritz J.J., "Small and mini hidropower systems", Ed. Mc. Graw Hill, 1984.
- Genta, J., Silveira, L., Anido C., Acosta A., Cataldo J., Charbonnier F., Nunes V., Chaer R., Alonso J., "Estudio para la instalación de microturbinas en zonas alejadas de la red eléctrica nacional". Informe del Convenio UTE - FI, Montevideo, Uruguay, 1993.