

**ENERGIAS  
RENOVABLES  
Y MEDIO AMBIENTE**

**asades**

**Volumen 2**

**Junio de 1997**

**Revista de la Asociación  
Argentina de Energía Solar**

## INDICE

V. Nunes, J. Cataldo y G. Casaravilla	1	Evaluación de los recursos energéticos renovables realizada en Uruguay y su aplicación para electrificación rural.
L. Odicino, D. Perello y A. Fasulo	11	Estudio de iluminación en un laboratorio de la Universidad Nacional de San Luis.
J. Franco, L. R. Saravia, R. Caso y C. Fernández	17	Desarrollo de un destilador multiefecto atmosférico de superficies inclinadas.
V. Tacchi y A. Monrós Nacente	25	Máquina de vapor de pequeña potencia para el bombeo de agua por vía solar.
I. Blasco Lucas y F. Garcés	33	Método de análisis microeconómico de varios tipos de sistemas térmicos solares.
M. Condorí y L. Saravia	43	La producción de secadores invernaderos de simple y doble cámara.
M. Rivas, E. Rojas, R.D. Piacentini, E. Luccini y J. Herman	53	Dosis eritémicas solares medidas en el Norte de Chile en el solsticio de verano de 1995.
C. Filipín y C. de Rosa	57	Eficiencia energética y emisión de gases invernadero en el parque educacional de una urbe en crecimiento.
E. Rosenfeld, O. Ravella, C. Discoli, C. Ferreyro, J. Czajkowski, G. San Juan, Y. Rosenfeld, A. Gómez, I. Martini y J. Tesler	65	PIGUR. Programa informatizada de gestión urbana y regional.
H. Grossi Gallegos	75	Acerca del campo de los promedios anuales de la radiación solar global diaria en América del Sur.
F. Ponta y C. Luna Pont	81	Alternativa para posibles aprovechamientos energéticos en canales primarios de distribución de agua para riego.
A. Coronel, O. Sacchi, V. Bisaro, M. Costanzo, M.A. Lara y S. Bischoff	89	Pronóstico objetivo de temperatura mínima en el sur de la provincia de Santa Fe.

**TRABAJO INVITADO****EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES REALIZADA EN URUGUAY Y SU APLICACIÓN PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL****V. Nunes, J. Cataldo y G. Casaravilla.**Grupo de Trabajo en Energías Renovables,  
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República,  
J. Herrera y Reissig 565, CP 11300 Montevideo, Uruguay  
Tel:(5982) 710974, Fax (5982) 717435, E-mail electro@iie.edu.uy

**RESUMEN** El Grupo de Trabajo en Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería de Montevideo, Uruguay ha realizado estudios sobre la evaluación del potencial eólico y minihidráulico de todo el país y la aplicación de estas energías y la solar fotovoltaica a la electrificación rural. Se describen las metodologías desarrolladas para la evaluación del potencial, concebidas como las más adecuadas en vista de la información meteorológica y cartográfica disponible. Para el diseño de sistemas autónomos de electrificación rural, se creó un paquete de herramientas software que simula sistemas energéticos (SIMENERG). Se realizaron estudios de viabilidad y diseño de instalaciones que emplean energía solar fotovoltaica o sistemas híbridos solar fotovoltaico - eólico. Se han implementado instalaciones en escuelas, puestos policiales y sanitarios que están en servicio en forma satisfactoria. Se realizó la comparación del costo actualizado de inversión y operación de sistemas autónomos que utilizan energías renovables con el tendido de líneas de electrificación rural en función de la distancia a la red eléctrica existente. Este mapa permite elegir, desde el punto de vista del usuario, la mejor tecnología para la electrificación en la zona rural.

**1. INTRODUCCIÓN**

La Facultad de Ingeniería de Montevideo, Uruguay en el marco de Convenios celebrados con la Administración de Usinas y Transmisiones Eléctricas del Estado ha realizado la evaluación del potencial y estudios de viabilidad de utilización de energías renovables para generación de energía eléctrica.

Los estudios realizados comprenden la energía eólica, la solar fotovoltaica y los pequeños, mini y micro aprovechamientos hidroeléctricos.

La posible utilización de fuentes alternativas renovables en régimen de cogeneración con el sistema eléctrico nacional se presenta como muy interesante desde los puntos de vista económico y ambiental. En ese sentido, está en ejecución un proyecto de instalación de un aerogenerador de aproximadamente 200 kW en una zona de topografía compleja donde las medidas realizadas y la modelación numérica y física permiten esperar factores de capacidad anuales de por lo menos 35 %.

Si bien el servicio eléctrico nacional alcanza a un muy alto porcentaje de la población del país, aproximadamente el 95%, existen zonas de muy baja densidad de población que están alejadas de la red nacional, en las cuales podría ser económicamente viable la utilización de energías renovables en sistemas autónomos.

Existen instalaciones que satisfacen pequeños consumos rurales individuales con energía solar fotovoltaica. También se ha instalado un sistema híbrido solar fotovoltaico eólico para un pequeño poblado y algunos otros para consumos individuales.

**2. ENERGÍA EÓLICA***2.1 Evaluación*

En Uruguay, los sitios de más interés para la explotación del recurso eólico se encuentran en zonas de orografía compleja donde no existen medidas de velocidad de viento. La metodología aplicada para estimar los valores horarios de velocidad y dirección de viento hasta la microescala meteorológica usa una combinación de modelos numéricos y físicos.

*2.1.1. Modelo Numérico*

El modelo numérico empleado para hallar el campo de velocidades medias hasta la mesoescala meteorológica es del tipo de conservación de masa.

El modelo tiene como datos de entrada las series históricas de velocidad media obtenidas en las estaciones meteorológicas situadas en la zona en estudio.

Se calcula la velocidad media del viento en cada nodo de una grilla de aproximadamente 10 km de paso definida en dicha zona. Las velocidades medias calculadas en la forma mencionada se utilizan como condición de borde para resolver el flujo a una menor escala.

El algoritmo que relaciona los datos con los resultados es de tipo lineal (ecuación de Poisson). Como ya se señaló, los datos utilizados son los obtenidos en estaciones meteorológicas. Una primera peculiaridad que presentan estos métodos es que los datos se conocen en el interior del volumen de cálculo y no en la frontera. Como es usual la medida de velocidad de viento en estaciones meteorológicas se realiza cada hora. Sea el vector de viento

$$\begin{bmatrix} u_i(\tau_j) \\ v_i(\tau_j) \end{bmatrix}$$

con  $u$  y  $v$  las componente oeste-este y sur-norte del viento medio en la estación  $i$ , de las  $N$  consideradas, en el instante  $\tau_j$ . Aplicando el modelo mencionado para cada instante al conjunto de datos considerado sería posible determinar el viento en cada nodo de la grilla definida antes.

Con el objetivo de disminuir el tiempo de cálculo, en primera instancia, se aplicó la metodología de los Patrones Principales para resolver el flujo a la mesoescala meteorológica. En primer lugar se considera el conjunto de datos para cada instante  $\tau_j$  ordenado en la siguiente forma

$$X_j = \begin{pmatrix} u_1(\tau_j) \\ v_1(\tau_j) \\ \vdots \\ u_N(\tau_j) \\ v_N(\tau_j) \end{pmatrix}$$

generándose un vector con  $2N$  componentes. Se elige la base del espacio de  $R^{2N}$  formada por los patrones principales,  $e_1, e_2, \dots, e_{2N}$ . Tales vectores se calculan como los vectores propios de la matriz de correlación del conjunto de datos. Físicamente tales patrones representan o bien estados reales de la atmósfera o bien ruido introducido por mediciones defectuosas. Cada vector  $X_j$  se podrá escribir

$$X_j = a_1(\tau_j)e_1 + a_2(\tau_j)e_2 + \dots + a_{2N}(\tau_j)e_{2N}$$

como una composición vectorial de los vectores de la base formada por los patrones principales

El modelo numérico se aplicará entonces a cada uno de los patrones principales. Cabe señalar que cada par de componentes  $u, v$  de los patrones principales representan un viento ficto. Suponiendo dicho viento ficto como dato se calcula el viento resultante en cada nodo de la grilla definida. Es decir que el patrón  $e_k$  producirá en el nodo  $s$  un vector de velocidad de viento

$$\begin{pmatrix} u_{k,s} \\ v_{k,s} \end{pmatrix}$$

Como ya se señaló el algoritmo de cálculo es lineal por lo que el vector velocidad de viento en el nodo  $s$  y en el instante  $\tau_j$  se calcula como

$$\begin{pmatrix} u_s(\tau_j) \\ v_s(\tau_j) \end{pmatrix} = a_1(\tau_j) \cdot \begin{pmatrix} u_{1,s} \\ v_{1,s} \end{pmatrix} + \dots + a_{2N}(\tau_j) \cdot \begin{pmatrix} u_{2N,s} \\ v_{2N,s} \end{pmatrix}$$

Es posible mostrar que la reconstrucción de la serie histórica del parámetro velocidad media del viento puede ser realizada con aceptable precisión si se utilizan sólo aquellos patrones principales que representan estados sinópticos de la atmósfera.

Se obtuvo, para todo el territorio nacional, las curvas iso-velocidad media del viento para vientos de llanura utilizando para la reconstrucción de las series históricas sólo los patrones principales más significativos. Asimismo, se obtuvo las curvas de iso-factor de capacidad para vientos de llanura utilizando para el cálculo la curva característica de un aerogenerador marca NORDTANK modelo 150.

Cabe señalar que la metodología de los patrones principales fue utilizada además con particular éxito en la evaluación de calidad de los datos, así como en el rellenado de huecos existentes en las series obtenidas en algunas estaciones meteorológicas. Detalles de tales aplicaciones se encuentran en López (1992).

### 2.1.2 Modelo físico.

La resolución del flujo a la micro-escala meteorológica se realizó utilizando la técnica de la modelación física. Esto implica simular el viento atmosférico y la topografía de la zona de estudio en un túnel de viento.

El viento atmosférico fue simulado en condiciones de "vientos fuertes" en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería. El método utilizado para realizar la modelación fue la inicialmente presentada en Counihan (1969) y luego en Robins (1983). Los elementos que se interponen en la corriente de aire para lograr el flujo similar al viento atmosférico, son una grilla de los llamados generadores de vorticidad de cuña elíptica y una barrera corriente arriba de la grilla.

La correcta simulación del viento atmosférico se verifica en una posición inmediatamente corriente arriba del modelo, para lo cual se caracteriza la distribución en altura de la componente media de la velocidad media, la distribución en altura de la intensidad de turbulencia longitudinal, el espectro de potencia de la componente fluctuante de la velocidad y la distribución vertical de la escala de longitudes integrales de la turbulencia. La escala geométrica de la simulación fue determinada a partir de las características geométricas del flujo, resultando 1/6000.

Las zonas de topografía compleja modeladas se eligieron circulares de 6 km de diámetro. Para su selección se tuvo en cuenta que estuvieran en las regiones en que se presentaban las mayores velocidades de viento medias en llanura, topografía favorable y cercanas a la red eléctrica y a caminos de acceso. En la figura 1 se presentan las zonas seleccionadas.

En la figura 2, se presentan los sitios específicos dentro de una zona donde se realizará la evaluación. En cada uno de esos sitios se supone que existe un aerogenerador. Los ensayos consisten, por un lado, en determinar la relación entre la velocidad media del viento en cada sitio de interés y la medida en un punto ubicado inmediatamente aguas arriba de la zona. Por otro lado se mide también la intensidad de

turbulencia en cada sitio. Estas mediciones se realizan para diferentes direcciones de viento. Cabe señalar que los resultados obtenidos permiten realizar una depuración de

Para terrenos de topografía compleja los factores de incremento de velocidad media obtenidos alcanzaron valores de 1.62.



Fig.1.- Zonas estudiadas: 1 Pirial, 2 Piria2, 3 Animas, 4 Fromento, 5 Eden, 6 Caracoles, 7 Cañas, 8 Aiguá, 9 Mariscal.

los sitios de interés, descartándose aquéllos que presenten bajo incremento de velocidad media o alta intensidad de turbulencia

### 2.1.3 Reconstrucción de la serie histórica en cada sitio

La velocidad media calculada con el modelo numérico es utilizada como condición de frontera para el modelo físico. Multiplicando la serie histórica obtenida mediante cálculo para la frontera de la zona considerada por los coeficientes de incremento de velocidad obtenidos a partir de la medida

A partir del resultado obtenido mediante esta metodología es posible analizar el recurso eólico en la zona.

Dentro de los estudios realizados para la instalación de parques eólicos industriales se identificaron varias zonas con potencias de por lo menos 100 MW cada una, calculada a partir de las características de potencia en función de la velocidad de viento de aerogeneradores industriales.

### 2.1.4 Verificación de la metodología

La metodología aquí presentada fue contrastada con mediciones realizadas en campo por la Dirección Nacional de Energía. Tales medidas se realizaron siguiendo la estrategia de medidas de corta duración, por lo que la verificación se realizó en períodos de hasta 6 meses.

Los cálculos, a estos efectos, se realizaron utilizando como datos las medidas efectuadas en estaciones meteorológicas en los mismos períodos de tiempo en los cuales se realizaron las medidas en los sitios de interés. La modelación física impone restricciones en la cantidad de direcciones que es posible ensayar. A los efectos de la comparación se eligieron las medidas en campo cuyas direcciones se correspondían con las direcciones ensayadas.

Se encontró que la diferencia entre la media anual calculada y la medida siempre fue inferior al 8 %. En todos los casos, los valores obtenidos siguiendo la metodología desarrollada subestimaron a las medidas realizadas en campo.

### SIERRA DE CARACOLES

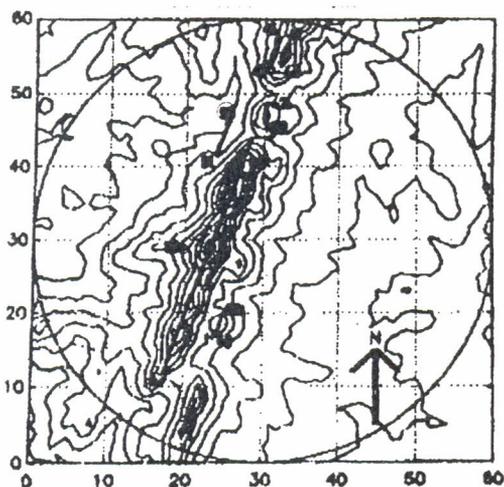


Fig.2.- Topografía de una zona estudiada.

en el modelo físico, se obtiene la serie histórica del parámetro velocidad de viento en cada sitio de interés.

Cabe señalar que el resultado obtenido de la forma descrita sería equivalente a lo medido por un anemómetro ubicado en cada sitio, el cual debería permitir obtener un registro a partir del cual se pudiera caracterizar la turbulencia atmosférica.

### 2.1.5 Estimación de la interferencia aerodinámica

Como ya se señaló la metodología desarrollada permite obtener el mismo resultado que se obtendría en cada sitio de interés ubicando un anemómetro cuyo registro permitiera caracterizar la turbulencia atmosférica. Para el cálculo de la energía que es posible obtener del parque es necesario estimar las pérdidas de potencia. En general las pérdidas dependen fuertemente de la disposición relativa de los aerogeneradores. La interferencia aerodinámica es responsable de una parte de las pérdidas. Esta interferencia se debe a la alteración que produce el rotor de los aerogeneradores sobre el flujo atmosférico. El intercambio de potencia en el rotor de los aerogeneradores produce un déficit de velocidad media, el cual desaparece a medida que aumenta la distancia flujo abajo del aerogenerador. Si este flujo perturbado encuentra otro aerogenerador, la potencia que generará éste será menor a la que produciría si incidiera el viento sin perturbar.

La evaluación de la interferencia aerodinámica se realizó utilizando modelos numéricos. Un primer modelo caracteriza el flujo corriente abajo del rotor del aerogenerador. Un segundo modelo numérico, utilizando el resultado anterior, calcula el déficit de velocidad media aguas arriba de cada aerogenerador producido por todos los demás.

Cabe señalar que tales modelos fueron obtenidos a partir de

un Convenio de intercambio con la Universidad Politécnica de Madrid y financiado por el Instituto de Cooperación Iberoamericano.

### 3. PEQUEÑOS, MINI Y MICRO APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS

La energía hidroeléctrica disponible en gran escala en el país ha sido utilizada en su casi totalidad: en el Río Uruguay en la represa binacional de Salto Grande y en el Río Negro con tres represas de las cuales la situada más aguas arriba dispone de un embalse regulador de grandes dimensiones.

Este conjunto satisface en la actualidad más del 80% de la demanda de energía anual.

En la evaluación realizada por la Facultad de Ingeniería se consideraron sólo los posibles aprovechamientos hidroeléctricos de potencia hasta 5 MW.

#### 3.1 Evaluación

En el estudio realizado tuvo un papel protagónico 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.

La disponibilidad de agua en cada cuenca se evalúa usando los datos de precipitación mensual obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional y de los coeficientes de escurrimiento ajustados para cada condición del terreno.

La distribución espacial de la precipitación se presentó en un mapa de isoyetas de precipitación media efectiva mensual, calculada a partir de los coeficientes de escurrimiento y de los datos de 100 pluviómetros, la mayoría de los cuales tiene registros de más de 70 años. En la figura 3 se muestra dicho mapa.

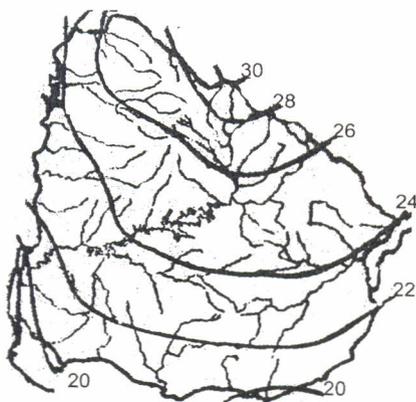


Fig. 3.- Isoyetas de precipitación media mensual, mm.

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. Se realizó el anteproyecto de

diversas instalaciones.

Para potencias mayores de 1 MW y hasta 5 MW (pequeños aprovechamientos hidroeléctricos), 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 lago con la potencia a instalar.

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 isotencia. El área encerrada por dichas curvas permite calcular el potencial de generación en cada rango de potencia. En la figura 4 se ven las curvas isotencia para 1MW en todo el territorio nacional.

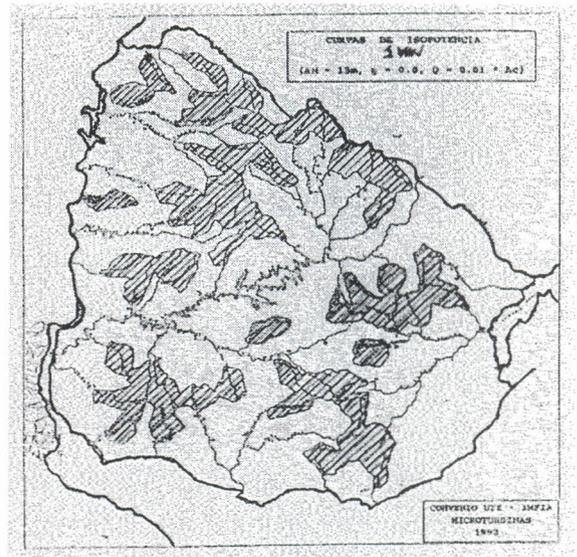


Fig 4.- Curvas isotencia para 1MW.

En la figura 5, se indica para cada rango de potencia el número de puntos y la potencia estimada así como el área involucrada.

	Área (Km <sup>2</sup> )	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

Fig.5.- Potencial de generación.

De la metodología seguida, ajustada a la información 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. La realización de un embalse sería factible si el mismo es compartido para otros fines tales como: riego, abastecimiento de agua potable, control de

crecidas. El uso múltiple justificaría no solo la inversión sino también el efecto sobre el medio ambiente que produce la inundación de tierras.

#### 4. SISTEMAS AUTÓNOMOS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL

El área no electrificada del país corresponde al medio rural. Su topografía es medianamente ondulada sin accidentes geográficos relevantes. Está casi exclusivamente dedicada a la explotación pecuaria tradicional, actividad que no requiere un uso intensivo de la energía eléctrica. Por lo tanto, los problemas de abastecimiento de energía que se presentan corresponden a consumos individuales o de muy pequeños conjuntos de viviendas situados a grandes distancias entre sí y de las redes de distribución existentes.

El consumo domiciliario típico rural es de aproximadamente 100 kWh/mes con densidades que van desde 30 a 5 km/usuario lo que hace inviable económicamente la conexión al sistema de distribución.

La experiencia ha mostrado que, en medios de características como las descritas, no es cierto que por el hecho de disponer de energía eléctrica el consumo por usuario aumente más allá del inicial estimado, por lo menos en el mediano plazo.

Las opciones que se presentan como más atractivas para satisfacer estas demandas son: sistemas fotovoltaicos, sistemas eólicos y la combinación de ambos.

A estas opciones se agrega el uso de energías hidroeléctricas en pequeños, mini y micro aprovechamientos.

##### 4.1 Instalaciones existentes

El Grupo de Trabajo en Energías Renovables realizó el asesoramiento para un programa de electrificación de escuelas, puestos policiales y sanitarios alejados de la red eléctrica nacional, con numerosas instalaciones en funcionamiento utilizando energía solar fotovoltaica.

Los consumos previstos en cada una de estas instalaciones individuales fueron iluminación, utilización de medios audiovisuales, bombeo de agua, equipos de radiocomunicación y de refrigeración. Estos últimos, sólo para los puestos sanitarios.

La experiencia obtenida en su funcionamiento fue muy buena. Está en curso un nuevo programa de electrificación para usuarios con pequeños consumos de características similares.

Asimismo, existe un buen número de instalaciones realizadas de forma privada para pequeños y medianos consumos individuales.

En Polanco, en el centro del país, está en servicio un sistema híbrido eólico solar-fotovoltaico con tres aerogeneradores de 10 kW cada uno y tres campos de 27 paneles solares 48 Wp cada uno, que alimenta un pequeño pueblo construido por la Comisión Honoraria para la Erradicación de la Vivienda Rural Insalubre (MEVIR). Este

Proyecto fue financiado por la Comunidad Europea.

La experiencia obtenida hasta el momento en Polanco no ha sido totalmente satisfactoria debido a que no se ha encontrado una forma de asegurar un correcto mantenimiento de las instalaciones. Por razones de limitación de presupuesto, el aporte de energía solar fotovoltaica ha sido insuficiente lo que ha dificultado la operación. Posiblemente, se realice una reingeniería de la instalación a la luz de las dificultades encontradas.

##### 4.2. Estudios realizados

###### 4.2.1 Sistemas viento diesel

Algunas ciudades pequeñas del país tienen todavía un sistema autónomo con generador diesel para alimentar su red eléctrica. Se realizó el estudio de dichos sistemas con vistas a instalar generadores eólicos constituyendo un sistema viento-diesel.

Lamentablemente, los valores de energía eólica disponible en esos lugares, calculada a partir de modelación numérica y en algunos casos física, no justifican las inversiones requeridas por la instalación de aerogeneradores.

###### 4.2.2. Microaprovechamientos hidroeléctricos

Se realizó el anteproyecto de varios microaprovechamientos en lugares cercanos a pequeños poblados o en represamientos existentes. En cada caso, se analizó la obra civil a construirse, el tipo de turbina, el generador y la regulación del grupo turbina - generador. En algunos casos, podía realizarse la conexión a la red y en otros, se establecía un sistema autónomo. Esto condiciona las características del equipamiento eléctrico necesario.

Realizando un estudio de factibilidad, sólo resultaron viables aquellos emprendimientos que utilizaban represamientos existentes o estaban ubicados en lugares donde las características topográficas eran muy favorables para realizar un represamiento de bajo costo.

#### 5. DISEÑO DE SISTEMAS AUTÓNOMOS: SIMENERG

SIMENERG (Chaer et al, 1993) es un paquete de herramientas software que simula sistemas energéticos y que es especialmente útil en la evaluación y el diseño de sistemas autónomos.

La calidad de servicio y otros aspectos del sistema pueden ser evaluados simulando muchos años de su vida útil. También, dejando libres algunos de los parámetros de diseño y eligiendo una función de costos se puede optimizar dichos parámetros para minimizar el costo garantizando una disponibilidad de energía dada en el sistema con una confiabilidad determinada.

SIMENERG permite construir simuladores eficientes de los sistemas energéticos en estudio. Siendo un conjunto abierto de herramientas, el usuario puede, siguiendo la filosofía del simulador, modificar y agregar herramientas sin límite. Los

simuladores creados por SIMENERG son sustancialmente despachos de carga que usan un criterio basado en oferta y demanda de paquetes de energía cada uno con su precio. Las transacciones se deciden en intervalos de tiempo dados.

El Índice de Calidad de Servicio (ICS) de cualquier sistema eléctrico se mide evaluando la magnitud y la frecuencia de las interrupciones de energía que ese sistema tiene en el transcurso de un período de tiempo dado, usualmente un año.

Para un sistema autónomo de pequeño tamaño prácticamente esta medida corresponde al funcionamiento de la fuente. En el caso de las energías renovables consideradas en este estudio, las fuentes tienen un alto componente de aleatoriedad en sus valores instantáneos lo que obliga necesariamente a manejarse con técnicas estadísticas. Para cada fuente (irradiación solar, velocidad del viento, caudales de agua) se construyó una "fuente" sintetizadora de valores horarios que se corresponden estadísticamente con series de datos reales. La cantidad de años que deben ser simulados debe ser tal que el estadístico de resultados obtenido sea representativo. De esta forma es posible evaluar el déficit que el sistema bajo estudio presenta año a año y crear un estadístico de déficit. Luego se podrá calcular la probabilidad que existe de que un cierto déficit anual no sea superado.

En consecuencia, la medida del índice de calidad de servicio estará dada por la esperanza de que el déficit de energía no supere un cierto valor en días.

Para una idéntica energía diaria, dos sistemas pueden resultar sustancialmente diferentes en el porte del sistema de generación (por ejemplo número de paneles y de baterías en un sistema solar fotovoltaico) si se varía el índice de calidad de servicio en ordenes de magnitud de 5 días al año con esperanza del 90 %.

Se han desarrollado paquetes para aplicaciones específicas como HIBRID que simula sistemas basados en paneles solares, un aerogenerador y un banco de baterías o el simulador de sistemas viento-diesel autónomos.

### 5.1 Modelado del recurso solar

Se implementó una metodología a seguir en el modelado del recurso solar para la construcción de sintetizadores de series de radiación solar con el mismo andamio (desde el punto de vista estadístico) que las series de datos utilizadas para el modelado.

Al disponer de un sintetizador de series de radiación, es posible realizar la simulación de un sistema sometiéndolo a un gran conjunto de series y obtener así resultados que indican el desempeño del sistema en forma estadística. Por ejemplo, calcular índices tales como la probabilidad de que el déficit energético anual de un sistema dado sea inferior a un determinado porcentaje de la demanda.

El enfoque utilizado es más sencillo que los clásicos sintetizadores basados en la identificación de las probabilidades de cambio de estados en una cadena de Markov, mostrando sin embargo un buen desempeño para el

propósito deseado.

El modelado del recurso solar, se realizó sobre la base de ocho años de medidas de la radiación global diaria de energía en plano horizontal. Estos ocho años de medida son suficientes para muchos propósitos de diseño, pero pueden resultar insuficientes para evaluar índices de desempeño de un sistema dado en forma estadística.

Se construyó un "generador de años de sol" que conserva las características fundamentales de los ocho años de medidas reales, agregando la variedad necesaria para lograr indicadores estadísticos significativos.

La información que se está agregando al realizar el "generador de años de sol" es la que se corresponde con la intuición cotidiana en el sentido de que la secuencia de días nublados y claros puede correrse en el tiempo, manteniendo su característica relativa. El estado nublado o claro de un día está fuertemente influenciado por los días anteriores.

Del relevamiento de los datos de iluminación en plano horizontal de energía global se obtiene una distribución como la indicada en la figura 6 para un año dado.

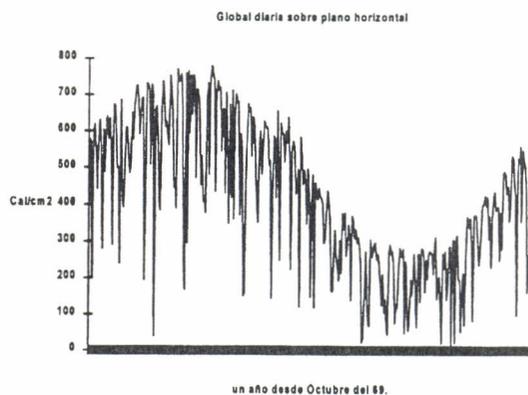


Fig.6.- Año de medidas.

En el modelo utilizado, la energía global recibida en plano horizontal en el día  $d$  del año se expresa por una expresión de la forma:

$$E_d = (A + B * \text{sen}(w * d + C)) * (1 + r_d)$$

donde  $d$  indica el día del año,  $E_d$  es la energía recibida el día  $d$ ,  $A$ ,  $B$  y  $C$  surgen del desarrollo de Fourier de los datos reales mientras que  $r_d$  es una variable aleatoria diaria que simula la nubosidad. Conceptualmente es un "ruido" de la señal.

Del estudio de los datos reales surge que es posible considerar  $A$ ,  $B$  y  $C$  como constantes, dado que, presentan una dispersión despreciable para los ocho años de medidas disponibles. Sus valores surgen de esa historia.

En consecuencia es posible generar una fuente de años de energía luminosa en plano horizontal considerando las distribuciones posibles de  $r_d$ .

De esta manera, una vez determinados los valores de  $A$ ,  $B$  y  $C$ , se evalúan los valores de  $r_d$  a partir de los datos reales (8 años) utilizando la ecuación:

$$r_d = E_d / \left( A + B * \sin(2 * \pi / 365 * d + C) \right) - 1$$

donde  $E_d$  son las medidas diarias reales de energía incidente para cada año.

Con estos valores de  $r_d$ , (2920 valores en los 8 años) se construye una fuente aleatoria randómica con una memoria apreciable de 3 días, valor éste que resultó consistente con los análisis de correlación efectuados. La fuente aleatoria se construyó sencillamente colocando todos los valores en orden cronológico en un anillo del cual se leen en forma consecutiva tres valores (3 días) y luego se salta aleatoriamente a cualquier otra posición.

De esta manera, se tiene para cada año simulado valores de  $E_d$ , flujos de energía luminosa global en plano horizontal, los cuales son transformados a plano inclinado para un ángulo dado, utilizando indistintamente los métodos de Liu-Jordan, Perez y HDKR.

Interesa agregar que se realizaron medidas de campo durante algunos meses del flujo en plano horizontal y en plano inclinado (45°), a los efectos de compararlos con los valores calculados por la transformaciones antes mencionadas. El análisis de los datos mostró que las transformaciones a plano inclinado propuestas son suficientes a los efectos del diseño de los sistemas.

Finalmente se tiene en cuenta la dispersión geográfica de los flujos luminosos para un día dado en el país. A estos efectos, se realizó un mapa del Uruguay con el promedio mensual de los valores medios de los flujos luminosos, calculándose coeficientes a aplicar a la fuente para una ubicación geográfica dada de forma de convertirla al punto donde se realizará la instalación.

### 5.2 Diseño de un sistema híbrido solar fotovoltaico - eólico

Se realizó el diseño de un sistema híbrido para alimentar las instalaciones de un lugar de reserva de fauna y flora en la zona de humedales al este del país. Teniendo en cuenta las claras connotaciones ecológicas del lugar, durante el diseño se tuvo presente el impacto visual que representa el eventual aerogenerador por lo que se estudiaron diversas ubicaciones y alturas de aerogenerador, llegándose incluso a considerar la eliminación del mismo.

El perfil de carga anual, teniendo en cuenta el uso estacional del lugar, se previó durante los tres meses de verano y en los meses previo y posterior al mismo con consumo nominal y del 10% de éste durante el resto del año.

El consumo medio diario es de 2.8 kW h con un 70 % en corriente alterna correspondiendo la mitad al centro de recepción (equipo multimedia, TV y video) y 20 % a una de las bombas para agua.

En primera instancia, se eligió la ubicación óptima del aerogenerador de acuerdo con la topografía y los vientos predominantes. En este lugar se instaló a 12 m de altura un registrador que midió los datos de vientos durante dos meses. Luego, en base a datos históricos en estaciones

meteorológicas cercanas y a registros de dichas estaciones en simultaneidad con los registrados en el sitio, se generó por correlación un archivo anual de viento esperado en el lugar inicialmente seleccionado y a 12 m de altura.

Posteriormente, se eligió, de acuerdo a criterios de impacto visual, el lugar definitivo para el cual se determinó una pérdida de 13% de velocidad de viento a la altura de 12 m en base a un estudio de rugosidad aguas arriba del aerogenerador. Para recuperar la energía perdida por esta causa se debería elevar el molino a 18 m en vez de los 12 m de altura del lugar óptimo.

Se analizaron dos configuraciones para a 12 m y 18 m, con coeficientes de speed-up de 1 y de 0.87 respectivamente.

Se destaca que el diseño de sistemas híbridos presenta en general diversos aspectos a tener en cuenta de tipo social, cultural, técnico, económico y ecológico.

Para el diseño físico se empleó el software HYBRID 95, una versión de SIMENERG aplicada a sistemas híbridos. Los componentes simulados fueron distintos tipos de aerogeneradores con dos alturas de torre de 12 y 18 m, de los que se conoce la característica potencia-velocidad de viento, paneles solares de 50 Wp considerados de a pares dado que la tensión elegida fue de 24 V y baterías limitándose su capacidad entre 200 y 500 AH en intervalos de 40 AH. Los otros componentes del sistema se eligieron entre los equipos estándar del mercado. En particular, reguladores de probado desempeño en los cuales se cuida a las baterías en forma racional.

En la figura 7, se muestra como uno de los resultado de la simulación, las zonas de igual calidad de servicio. Cada zona, avanzando del extremo superior derecho hacia abajo, representa un día de deficit energético anual comenzando de 0-1 día.

Para los sistemas propuestos, se obtuvo la tabla que se indica en la figura 8, con la consigna de una calidad de servicio de 3 a 4 días por año de déficit.

Se eligió la solución de menor costo con un aerogenerador Whisper 1000 con torre de 18 m de altura, cuatro paneles fotovoltaicos de 50 Wp y batería de 380 AH.

Con el mismo aerogenerador y una torre de 12 m de altura, lo que mejora el impacto visual, el costo es 18 % más caro. Sin generación eólica, el costo se incrementa en 75 %.

Es de destacar que los costos listados corresponden al sistema de generación y acumulación, restando considerar los costos de instalación eléctrica, protecciones, inversores, bombeo, reguladores, lámparas, luminarias y mano de obra. Estos costos se estudiaron en detalle obteniéndose un valor estimativo de 5500 US\$.

## 6. MAPA PARA LA ELECCIÓN DE LA MEJOR TECNOLOGÍA DE ELECTRIFICACIÓN RURAL EN URUGUAY

Se ha considerado distintos diseños para electrificación rural

para diferentes niveles de demanda supuestos, en primera aproximación, de valor constante en Wh/día.

anual de velocidad de 5.6 m/s, típico del sur del país, y de 3.3 m/s típico del norte del país.

Se realizó la evaluación en 20 años de cada solución usando una tasa de 5 % y un índice de calidad de servicio de 7 días.

Los sistemas unifilares con retorno por tierra de 15 kV de tensión nominal considerados son de diseño muy económico

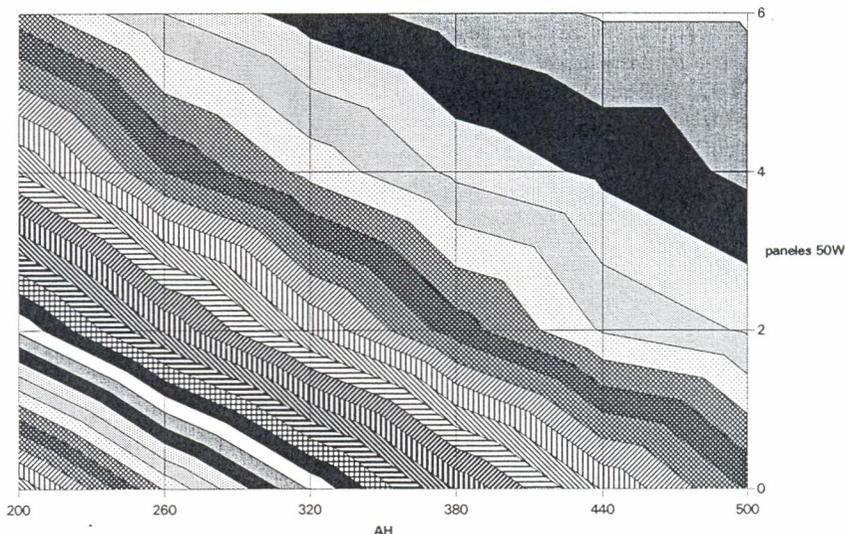


Fig. 7.- Zonas de déficit constante, Whisper 1000, 18 m.

Aerogenerador	Alt. torre	Wpico panel	AH bat.	Costo US\$
Whisper 1000	18	200	380	8400
Whisper 1000	12	300	440	9900
Whisper 600	18	300	440	9400
LMW 1003	18	100	260	10500
LMW 1003	12	100	440	11400
LMW 600	18	300	500	14100
BWC 1500	18	300	380	14300
Sistema sin aerogen.		1000	440	14700

Fig. 8.- Resultados de la simulación, paneles y baterías a 24 V.

Este último es evaluado simulando unos 200 años de comportamiento del sistema computando para cada año la cantidad de días sin servicio por falta de disponibilidad de energía y realizando un histograma de esos valores. El índice es el valor con 90 % de confianza en el histograma.

Los distintos diseños en consideración son: sistemas fotovoltaicos e híbridos y las líneas unifilares con retorno por tierra conectadas al sistema nacional. En los sistemas fotovoltaicos, el número de paneles solares y la capacidad de la batería para cada nivel de demanda se obtuvo por simulación incluyendo una optimización para minimizar el costo cumpliendo la restricción impuesta por el índice de calidad de servicio. En la figura 9 se da el resultado para los diseños óptimos.

En los sistemas híbridos se realizó la misma optimización empleando los modelos de aerogeneradores disponibles con sus valores de potencia nominal.

Los cálculos se realizaron para vientos con un valor medio

Demanda Wh/día	Baterías AH	Paneles 48 Wp	Costo US\$
100	100	1	1160
200	150	2	2090
300	200	3	3020
400	250	3	3250
500	350	4	4410
600	400	5	5340
700	450	6	6270
800	550	7	7430

Fig. 9.-Diseño óptimo de sistemas fotovoltaicos.

dados los muy pequeños niveles de demanda. En este diseño, cuyo costo es de 1100 US\$/km, el conductor es de acero cincado y los postes de madera, espaciados 200 m.

Dado que la evaluación se realizó desde el punto de vista del usuario el costo de la energía es sólo el de la consumida sin incluir las pérdidas.

En la figura 10, se muestra el mapa de comparación de tecnologías que permite para cada nivel de demanda y distancia por usuario (km/usuario) en el tendido de líneas aéreas de 15 kV.

Las curvas denominadas se 3.3 y se 5.6 corresponden a los sistemas con energías renovables más económicos correspondientes a las velocidades medias anuales de viento de 3.3 y 5.6 m/s. Las otras curvas paralelas entre sí corresponden a las líneas unifilares de distintas longitudes.

Por ejemplo, para un lugar con baja velocidad de viento (3.3 m/s) y una distancia de 15 km a la red de distribución, el sistema con energía renovables es más económico para

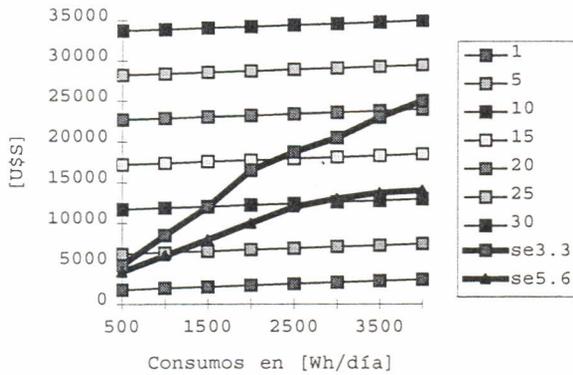


Fig. 10.- Comparación del costo actualizado de inversión y operación para el Usuario.

niveles de demanda que no superen el valor de 2200 Wh/día.

## 7. CONCLUSIONES

A partir de los estudios realizados de evaluación del potencial en energías renovables y de su aplicación a la electrificación rural y a la suma de los resultados obtenidos en la operación de las instalaciones existentes, surge que si bien el campo de aplicación de estas tecnologías en Uruguay es muy interesante desde los puntos de vista técnico y social.

Según los resultados de los estudios de evaluación del potencial eólico nacional ya realizados, la utilización de la energía eólica en gran escala tiene buenas perspectivas. La instalación de un aerogenerador de 200 kW como experiencia piloto que está en curso permitirá obtener información aplicable a la posible instalación de parques eólicos industriales

## ASSESSMENT OF RENEWABLE ENERGY RESOURCES IN URUGUAY AND ITS APPLICATION TO RURAL ELECTRIFICATION

**ABSTRACT.** This paper presents the up to date studies carried out by the Renewable Energy Workgroup, Republic School of Engineering in Montevideo, Uruguay. The potential of wind and mini and micro hydroelectric energy was assessed in the whole country. The application to rural electrification of these energies, as well as the solar-photovoltaic energy was studied. The methodologies developed to assess this potential are described. They were conceived as the most suitable to the meteorological and cartographical data available. To design autonomous systems for rural electrification, a set of software tools were developed (SIMENERG). This set performs the simulation of energetic systems. Feasibility studies and installation designs using solar photovoltaic energy or solar photovoltaic- wind hybrid systems were carried out. Numerous installations of these types in schools and police stations far away from the electrical grid are in service and with good performance. A comparison of investment and operating cost between different autonomous systems that use renewable energies and the cost of installation of overhead rural electrification lines as a function of the distance to the electric network was done. The resulting map allows to choose from the user's point of view the best technology for rural electrification.

- Briozzo C., Nunes V., Cataldo J., Mosto P., Wind Energy Activities in Uruguay. *EWEC'94, European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, Thessaloniki, Grecia, octubre 1994.
- Briozzo C., Casaravilla G., Chaer R., Oliver J.P., SimEnerg: The Design of Autonomous Systems. *World Renewable Energy Congress*, Denver, EEUU, 1996.
- Cataldo, J., Simulación física de flujos tipo Capa Límite Atmosférica, Tesis de M. Sc., Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay, 1992.
- Counihan, J., An improved method of simulating an atmospheric boundary-layer in a wind tunnel, *Atmos. Env.*, pp. 197-214, 1969.
- Genta J.L., Acosta A., Nunes V, Chaer R., Microaprovechamientos hidroeléctricos en zonas de poca pendiente y gran variación de caudal *Hidroenergía'95*, La Habana, Cuba.
- López C., Predicción de la serie temporal del campo de velocidades de viento sobre topografía compleja: Aplicación a la zona sur del Uruguay, Tesis de M.Sc., Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay, 1993.
- Nunes V., Cataldo J., Penza E., Alonso J, Oliver J.P., De Martini E., Acosta J., López C., Cuantificación del Potencial Eólico del Uruguay Aplicable a la Generación Eléctrica en Gran Escala, informe final del Convenio con UTE, Abril, 1994.
- Robins, A.G., The development and structure of simulated neutrally stable atmospheric boundary layers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **4**, pp. 71-100, 1979.
- Zeballos R., Casaravilla G., Chaer R., Oliver J., Planchon E., Normey R., Duomarco J., Zimberg B., Aplicación del recurso solar en la implementación de alternativas para la electrificación rural en el Uruguay, Informe final del Convenio con UTE, Julio 1994.