

ELECTRIFICACIÓN DE COMUNIDADES AISLADAS DE LA RED

ELECTRIFICATION OF ISOLATED COMMUNITIES OF THE NETWORK

RESUMEN

En los países en vías de desarrollo, la conexión a la red eléctrica nacional de pequeños pueblos situados en zonas rurales conlleva unos costes excesivos comparados con la opción de su electrificación autónoma. Aunque los programas de electrificación rural autónoma suelen consistir en la creación de pequeñas redes alimentadas por generadores diésel, la escalada de los precios del petróleo hace intuir que en un futuro próximo los sistemas de generación renovable o híbrida puedan llegar a ser más rentables. Además, éstos aprovechan los recursos energéticos locales favoreciendo el desarrollo de la zona. En este artículo se analizan y comparan las diferentes alternativas viables de electrificación autónoma para determinar qué opciones tecnológicas son más adecuadas, tanto a día de hoy como en un futuro próximo.

Palabras clave: Energías renovables, electrificación, desarrollo rural, recursos energéticos, generación híbrida.

ABSTRACT

In the developing countries, the connection to the electrical national network of small villages placed in rural zones carries excessive costs compared with the option of autonomous electrification. Though these programs of rural electrification usually consist in the creation of small networks fed by Diesel electrical generators, the continuous oil price increase intuits that in a near future the systems of renewable or hybrid generation may become more profitable. Another advantage of these systems is that they use the energetic local resources, favouring the local development. This article analyzes and compares different viable alternatives of autonomous electrification, to determine which technological options are more suitable nowadays or in a near future.

Recibido: 18/12/06

Aceptado: 26/02/07

Manuel Solaguren-Beascoa
Ingeniero Industrial
Departamento de Ingeniería Civil
Escuela Politécnica Superior
Universidad de Burgos



Key words: *Renewable energy, electrification, country development, energetic resources, hybrid generation.*

1- INTRODUCCIÓN

En la parte del mundo que llamamos desarrollado, tener electricidad en nuestras ciudades y pueblos es algo que damos por normal desde hace muchas décadas. Sin embargo, se estima que en la actualidad cerca de la cuarta parte de la población mundial, unos 1.600 millones de personas, no tienen acceso a ella y al bienestar que supone [1]. De esta cifra, más de 500 millones viven en India y otros 500 en el África subsahariana.

El retraso en el desarrollo de muchos países sólo se explica por su permanente crisis de energía que les hace ir siempre a la zaga de los países industrializados. La principal traba con la que se encuentran estos países en vías de desarrollo es el precio de la energía. Querer utilizar las mismas fuentes de energía que los países industrializados hace que, cuando la importan o compran a consorcios energéticos globales, deban pagar casi siempre los precios del mercado mundial, lo cual supera sus posibilidades adquisitivas.

Y no sólo eso: los países en vías de desarrollo se equivocan al querer imitar la estructura del sistema energético de los países más avanzados. No son un buen ejemplo a seguir por

dos razones: su modelo de abastecimiento agotable y la inadaptabilidad de su estructura centralizada.

En lo que respecta al modelo de abastecimiento, el previsible agotamiento de las fuentes de energía de origen fósil y la necesidad de controlar las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera han puesto de manifiesto que el modelo energético de los países industrializados no es prolongable durante mucho tiempo más y, menos aún, no es ampliable a los países en desarrollo.

En cuanto a la estructura de la red eléctrica, hay que tener en cuenta que en el África meridional, India y el resto de Asia la población rural alcanza más del 70% del total. Con la energía concentrada en las ciudades, como copia del modelo energético de las sociedades industriales, se ha frenado el desarrollo rural en todos estos países. La población rural o bien no puede pagar la energía comercial o ni siquiera tiene acceso a ella por falta de infraestructura. Esto está causando su éxodo y el crecimiento de las grandes ciudades, evidenciando la inadecuación del modelo actual para dichos países.

La solución a esta situación es compleja e implica políticas energéticas, aspectos tecnológicos, económicos e institucionales; no obstante ofrece una oportunidad de inversión ya que estos países no cuentan con la capacidad tecnológica necesaria.

2- OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Proveer de electricidad a la población de los grandes mercados emergentes que representan los países en vías de desarrollo supone un reto técnico y una posibilidad comercial que hace cuando menos interesante el estudio de las alternativas tecnológicas para llevarlo a cabo.

Los programas de electrificación rural suelen centrarse habitualmente en el empleo de pequeñas redes alimentadas por generadores diesel. No obstante, la escalada de los precios del petróleo hace que en un futuro próximo el coste de la electricidad suministrada con los sistemas de generación renovable o híbrida sea menor que las soluciones tradicionales de generación exclusiva con combustibles fósiles. Todo esto independientemente de las subvenciones a la in-

las posibilidades que estos sistemas ofrecerán en un futuro cercano para la electrificación de comunidades aisladas de la red.

3- DISPONIBILIDAD DE RECURSOS ENERGÉTICOS

Está claro que cada emplazamiento requiere un análisis detenido para adaptar la solución a sus condiciones socioeconómicas y ambientales concretas. Dado el carácter general que se pretende dar a este estudio, se ha tomado un caso tipo como referencia sobre el cual poder basar cada proyecto en particular. Supondremos que el emplazamiento tipo dispone de unas características adecuadas (Figura 1), aunque no excelentes, para la instalación de las distintas tecnologías, como podría ser un núcleo rural localizado en el sudeste de China.

El dimensionado se caracteriza principalmente por dos parámetros: el consumo total y la potencia máxima. Una de las particularidades del consumo eléctrico rural es el gran peso del consumo residencial frente al comercio o la industria, caracterizado por una gran variabilidad de la demanda a lo largo del día. Consideraremos la población a analizar formada por 50 viviendas con un nivel de electrificación medio, que suponen un consumo diario de 246 kWh y una potencia máxima continua de 49,3 kW (Fig. 2).

En cuanto a la calidad del servicio, directamente relacionado con los costes, la autonomía o tiempo que el sistema puede satisfacer la demanda en ausencia de recursos energéticos

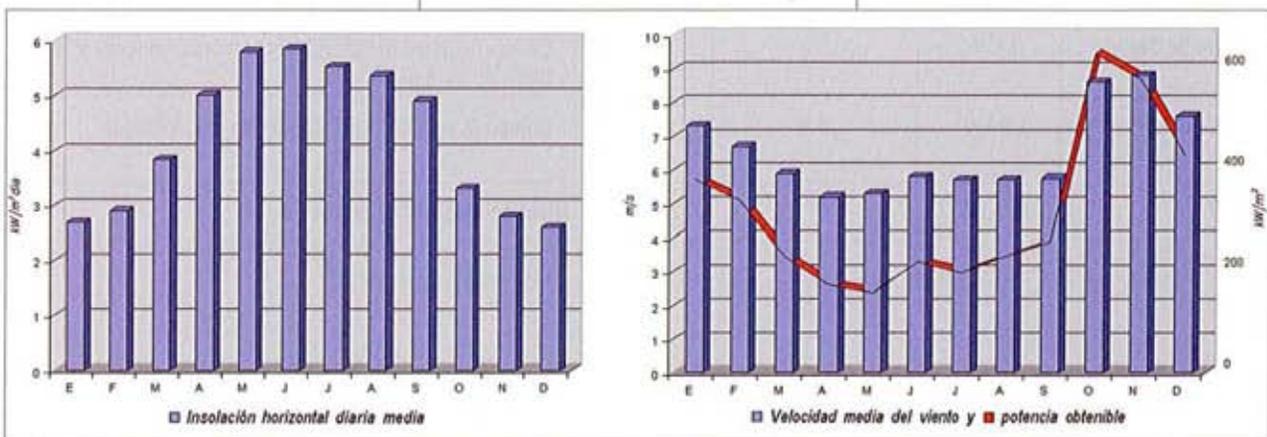


Figura 1: Recursos solar y eólico en un emplazamiento tipo del sudeste chino (Fuente: United Nations Environment Program SWERA-Solar and Wind Energy Resource Assessment).

versión y ayudas al desarrollo que puedan favorecer la realización de dichos proyectos.

En este artículo se analizan comparativamente, a modo de anteproyecto, las diversas tecnologías autónomas de generación energética basándose en los siguientes criterios [2]: coste, robustez, potenciación de los recursos locales y adaptabilidad a consumos pequeños e intermitentes. La metodología de estudio empleada parte del análisis de la disponibilidad de recursos energéticos del emplazamiento y de las características requeridas al sistema para, tras establecer las posibles opciones tecnológicas, valorarlas, compararlas y así dilucidar

Puede considerarse una insolación horizontal media de 4 kWh/m².día y que el recurso eólico es bueno, con una velocidad media anual de 6,5m/s. Asimismo suponemos que en el emplazamiento la distribución de gasóleo se realiza de forma regular, característica ésta muy común salvo para lugares especialmente inaccesibles; sin embargo, la disponibilidad de otros combustibles (tales como el gas natural) no se tiene en cuenta.

4- REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN [3]

La instalación debe cumplir una serie de condiciones en lo que respecta a su dimensionado, calidad del servi-

la fijaremos en un valor medio de tres días, lo que supone aproximadamente un 5% de demanda anual no satisfecha. Bajo los criterios de un usuario de un país desarrollado esta carencia de suministro podría considerarse inadmisibles, no obstante representa una mejora respecto al suministro centralizado de electricidad en buena parte de los países en vías de desarrollo [4]. Asimismo, si bien no es de esperar la presencia de aparatos especialmente sensibles a picos de voltaje o distorsión armónica de la corriente, se requerirá que los sistemas vayan dotados de inversores de onda senoidal pura (salvo en los casos de generación exclusiva con diésel) para

	Potencia requerida	Horas de consumo	Consumo diario	Características
Viviendas:	50 x	50 x		50 viviendas con 4,4 habitantes de media, con nivel de electrificación medio. Se ha aplicado un factor de simultaneidad de 0,8 para el cálculo de la potencia máxima.
- Iluminación	0,3 kW	3 h	0,9 kWh	
- Lavadora	0,18 kW	1 h	0,18 kWh	
- Frigorífico	0,14 kW	9 h	1,26 kWh	
- Radio / TV	0,07 kW	4 h	0,28 kWh	
- Otros	0,3 kW	2 h	0,6 kWh	
	39,6 kW		161 kWh	
Alumbrado público:	45 x		45 x	45 farolas con bombillas de vapor de mercurio de 125 W, funcionando 9 h diarias en invierno y 6 h en verano, coincidiendo con el máximo periodo de demanda en el día.
- Farolas	125 W	9 h	1,13 kWh	
	5,63 kW		50,7 kWh	
Bomba de agua	1,5 kW	6 h	9 kWh	Considerando un pozo alejado del pueblo y un consumo de 50 litros por persona y día, se estima una bomba de 1500 W funcionando 6 horas sólo en periodo de baja demanda, por lo que no afecta a la potencia requerida.
Escuela	1,5 kW	5 h	7,5 kWh	Consta de 15 fluorescentes, 4 ordenadores personales, TV, video y fax-teléfono.
Centro de Salud	1 kW	5 h	5 kWh	Consta de dependencia para el personal, consulta y refrigeración para productos.
Pequeño comercio	1,5 kW	8 h	12 kWh	Comercio pequeño con alumbrado y congelador.
Total	49,3 kW		246 kWh	Nivel de electrificación medio.

Tabla 1: Cálculo del consumo diario y potencia requerida para una población tipo.

adecuarlo a probables aumentos del nivel de electrificación.

Respecto a los costes (tanto de instalación como de mantenimiento y servicio), serán el factor fundamental a la hora de comparar las diferentes alternativas, pues su desarrollo sólo es posible, en la mayoría de las ocasiones, gracias a programas de subvenciones y créditos blandos financiados por gobiernos u otras instituciones.

Debe considerarse también la facilidad de implantación en una gran diversidad de emplazamientos, así como aspectos medioambientales tales como el impacto acústico o visual, las emisiones contaminantes o la peligrosidad.

5- OPCIONES TECNOLÓGICAS

A la hora de seleccionar las diferentes opciones tecnológicas que se adecuan a nuestro estudio, considerare-

mos sus características en cuanto a generación, almacenamiento y distribución.

La generación fotovoltaica es cara y además actualmente el aumento de la demanda ha propiciado un repunte de los precios; no obstante, se espera que el aumento de la producción provoque un descenso de éstos a corto plazo. También es un inconveniente su mala adecuación a la demanda residencial a lo largo del día. Por lo demás, el recurso solar tiene buena disponibilidad en amplias regiones del globo, se puede aumentar con facilidad la potencia instalada para adaptarla al posible crecimiento de la demanda, se poseen datos de insolación de prácticamente cualquier emplazamiento, el ciclo de vida de la instalación es largo (25 a 30 años) y posee una gran implantación comercial con redes de distribución y venta en muchos países en vías de desarro-

llo (China e India son fabricantes importantes de células y módulos fotovoltaicos). Por su gran disponibilidad, consideraremos la opción de módulos fotovoltaicos de células policristalinas, desechando la utilización de sistemas de seguimiento solar por su complejidad que, para nuestro caso, no justifica los costes añadidos, y desechando también la posibilidad de uso de concentradores solares por no estar su uso ampliamente extendido ni aprovechar la luz difusa.

La generación eólica presenta mucha variabilidad de unos emplazamientos a otros pues depende de gran cantidad de factores como la densidad del aire (temperatura y altitud), turbulencias (presencia de obstáculos y altura de la torre) o la disponibilidad del recurso eólico de la zona (velocidad y dirección del viento). Los emplazamientos óptimos son reducidos. Además, el ruido produci-

Generación →		Fotovoltaica	Eólica	Diésel		Fotovoltaica y eólica			
Almacenamiento →		Baterías	Baterías	Sin baterías	Baterías	Baterías			
%	↓	Componentes principales →	FV: 600 m ² , 84 kW pico. Batería: 224 ud., 15.400 Ah, 48 V, C/20, 22.400 kg.	Aherrojen.+torre: Dos unidades, φ=11 m, 50 kW. Bat.: 224 unidades., 15.400 Ah, 48 V, C/20, 22.400 kg.	Generador: Dos unidades, 50 kW.	Generador: Dos ud., 50 kW. Bat: 112 unidades, 7.700 Ah, 48 V, C/20, 11.200 kg.	FV: 140 m ² , 20 kW pico. Aerogenerador+torre: Una unidad, φ=11 m, 25 kW. Bat: 224 ud., 15.400 Ah, 48 V, C/20, 22.400 kg.		
		7	Adecuación a la potencia	3	6	6	5	5	
				<ul style="list-style-type: none"> - Escasa adecuación. Demasiada potencia instalada de paneles. 	<ul style="list-style-type: none"> + Muchos modelos comerciales para este rango de potencias. - Economía de escala. A mayor potencia menor coste euros/kW. - Tamaño del banco de baterías muy grande (no apto en lugares remotos). 	<ul style="list-style-type: none"> + Disponibilidad de gran cantidad de modelos comerciales en este rango de potencias. - Necesaria distribución regular de combustible. 	<ul style="list-style-type: none"> + Disponibilidad de gran cantidad de modelos comerciales en este rango de potencias. - Tamaño del banco de baterías muy grande (no apto en lugares remotos). 	<ul style="list-style-type: none"> + Opción válida para sistemas de decenas de kW de potencia instalada. - El peso de generación recae sobre la eólica. - Tamaño del banco de baterías muy grande (no apto en lugares remotos). 	
		7	Adecuación a la demanda	Escalabilidad	9	4	6	6	6
					<ul style="list-style-type: none"> + Posibilidad de aumento gradual de paneles fotovoltaicos y del banco de baterías. 	<ul style="list-style-type: none"> - Saltos altos en la potencia instalada. 	<ul style="list-style-type: none"> + No es muy costoso sustituir o añadir generadores. + No hay otros componentes que sustituir o añadir. 	<ul style="list-style-type: none"> + No es muy costoso sustituir o añadir generadores. - Es necesario añadir inversores en paralelo. 	<ul style="list-style-type: none"> + Posibilidad de aumento gradual de paneles fotovoltaicos y del banco de baterías.
		6	Adecuación al consumo diario	1	1	2	8	9	2
					<ul style="list-style-type: none"> - Al anochecer, máxima demanda y producción casi nula. - Producción impredecible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Producción eléctrica impredecible. 	<ul style="list-style-type: none"> + El generador adapta su producción eléctrica a la demanda. - Escaso rendimiento gran parte del día. 	<ul style="list-style-type: none"> + El generador adapta su producción eléctrica a la demanda. + Rendimiento mejorado por el uso de baterías. 	<ul style="list-style-type: none"> - Producción eléctrica no predecible.
		10	Cortes de suministro	2	2	4	8	9	3
<ul style="list-style-type: none"> 8% de la demanda anual no satisfecha por periodos de poco recurso solar. 	<ul style="list-style-type: none"> 6% de la demanda anual no satisfecha por periodos largos sin recurso eólico. 4 Menos demanda no satisfecha que el caso anterior por mayor vida de las baterías. 				<ul style="list-style-type: none"> 0% de la demanda anual no satisfecha. Al contar con dos generadores, en las paradas por sustitución o mantenimiento uno de ellos puede seguir funcionando. 	<ul style="list-style-type: none"> 0% de la demanda anual no satisfecha. Las baterías cubren la demanda en las paradas técnicas. 	<ul style="list-style-type: none"> 6% pues los recursos son completamente estacionales. Las probabilidades de escaso recurso solar y eólico simultáneamente son altas. 		
4	Facilidad de mantenim.	6	5	5	5	3	4		
			<ul style="list-style-type: none"> + Limpieza de paneles y relleno del electrolito. + Fácil acceso a los componentes. - Componentes electrónicos complejos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión anual del aerogenerador por personal cualificado para garantizar larga vida útil. - Difícil acceso al aerogenerador. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesario conocimientos específicos. + Pocos componentes en el sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesario conocimientos específicos. - El inversor es complejo. - Mayor número de componentes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Complejidad en el sistema de control por tratarse de un sistema híbrido. 		
8	Coste de sustitución de componentes	2	2	3	8	4	6		
			<ul style="list-style-type: none"> Vida de las baterías: Cinco años. 12.450 €/año. 	<ul style="list-style-type: none"> Vida de las baterías: Siete años. 10.200 €/año. 	<ul style="list-style-type: none"> Vida del generador. ppal.: tres años. 3.300 €/año. 	<ul style="list-style-type: none"> Vida de las baterías: 7 años. 4 Vida gen. ppal.: Cuatro años. 8.760 €/año. 	<ul style="list-style-type: none"> Vida de las baterías: Siete años. 6 6.400 €/año. 		
8	Coste de operación	8	8	7	1	5	7		
			<ul style="list-style-type: none"> Muy bajo. Mantenimiento de 	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento de aerogenerador y 	<ul style="list-style-type: none"> 35.000 litros gasóleo/año. 	<ul style="list-style-type: none"> 21.000 litros gasóleo/año. 	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento de aerogenerador y 		

1 5	Índice de coste	las baterías. 0,65 €/kWh - Módulos FV caros. 2 - Gran diferencia estacional de recurso solar.	baterías. 0,39 €/kWh + Relación coste de aerogenerador/generación buena en el emplazamiento tipo.	17.500 €/año. 0,34 €/kWh. - Coste de combustible. 8 - Corta vida útil. + El desembolso inicial es tres veces menor que el resto.	10.500 €/año. 0,41 €/kWh. - Coste de combustible. 4 + Mayor eficiencia del generador. - Sustitución de baterías.	baterías. 0,36 €/kWh. + Emplazamiento bueno para solar y eólica. 7 + La generación eólica es predominante.
		Desembolso inicial (componentes más instalación) 559.000 €. FV: 336.000 €. Reg / inv: 54.000 €. Bat: 85.100 €. Instalación: 83.850 €. 2	238.400 €. aerogenerador.+ torre: 70.600 €. Reg./inv.:35.000 €. 3 Bat: 85.100 €. Instalación: 47.700 €.	36.350 €. Generador: 22.000 €. Depósitos: 8.750 €. 9 Instal.: 5.600 €.	141.300 €. Gen.: 22.000 €. Depósitos: 8.750 €. 6 Reg / inv: 46.800 €. Bat.: 42.550 €. Instalación: 21.200 €.	283.700 €. Aerogen+torre: 35.300 €. FV: 79.500 €. Reg / inv: 27.100 €. Baterías: 85.100 €. Instalación: 56.700 €.
1 0	Repetitividad de implantación	+ Recurso solar óptimo en amplias zonas del mundo. - Transporte de baterías. 8	- Emplazamientos aptos escasos (recurso eólico óptimo, terreno disponible). - Transporte de baterías. 4	+ Tecnología implantada globalmente. - Distribución regular de combustible inexistente en algunos lugares. 8	- Transporte de baterías. 7	- Emplazamientos óptimos escasos (recurso eólico óptimo, terreno disponible). 4
3 3 2 2	Medio ambiente	Emisiones - Evaporación de H ₂ del banco de baterías. 9	- Evaporación de H ₂ del banco de baterías. 9	- CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , partículas. 1	- CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , partículas. - Evaporación de H ₂ . + Disminución frente a la generación sin baterías. 3	- Evaporación de H ₂ del banco de baterías. 9
		Impacto acústico + FV silencioso. 9	+ Generalmente instalado a suficiente distancia. 5	- Generador ruidoso. 2	- Generador ruidoso. + No funciona siempre. 3	+ Generalmente instalado a suficiente distancia. 5
		Impacto visual + Posibilidad de integración arquitectónica. 7	± Depende del emplazamiento. Visible a gran distancia. 4	+ Generador no visible. 8	+ Generador no visible. 8	± Depende del emplazamiento. Visible a gran distancia. 4
		Peligrosidad - Derrames e hidrógeno de las baterías. 7	- Derrames e hidrógeno de las baterías. - Acceso a torre. 5	- Emisiones CO. - Fugas de combustible. 4	- Emisiones CO. - Fugas de combustible. - Derrames y H ₂ baterías. 3	- Derrames e hidrógeno de las baterías. 5
TOTAL:		436	457	672	565	489

Tabla II. (parte 1): Tabla resumen donde se valoran los requisitos para los diferentes sistemas de generación eléctrica.

Fotovoltaica y diésel		Eólica y diésel		Fotovoltaica, eólica y diésel	
Baterías	Sin baterías	Baterías	Sin baterías	Baterías	Sin baterías
FV: 140 m ² , 20 kW pico. Gen. Diésel: 40 kW. Bat: 40 ud., 2.750 Ah, 48 V, C/20, 4.000 kg.	FV: 140 m ² , 20 kW pico. Gen. Diésel: Dos ud., 40 kW.	Aerogen+torre: Una unidad., $\phi=11$ m, 25 kW. Gen. Diésel: 40 kW. Bat: 40 ud., 2.750 Ah, 48 V, C/20, 4.000 kg.	Aherrojen.+torre: Una unidad, $\phi=11$ m, 25 kW. Gen. Diésel: Dos unidades, 40 kW.	FV: 36 m ² , 5 kW pico. Aerog.+torre: $\phi=11$ m, 25 kW. Gen. Diésel: 1 ud., 40 kW. Bat: 64 ud., 4.400 Ah, 48 V, C/20, 6.400 kg.	FV: 36 m ² , 5 kW pico. Aerog.+torre: $\phi=11$ m, 25 kW. Gen. Diésel: Dos unidades, 40 kW.
3 - Generación fotovoltaica sólo	4 - Generación fotovoltaica sólo	6 + Si el emplazamiento	6 + Si el emplazamiento	7 + El rango de potencias	7 + El rango de potencias

<p>adecuada como aporte extra, no como generación principal. - Necesaria distribución regular de combustible.</p>	<p>adecuada como aporte extra, no como generación principal. - Necesaria distribución regular de combustible. - Se desaprovechan 30 kWh/día producidos por los paneles FV.</p>	<p>es apto, la eólica puede ser la fuente principal de electricidad. - Necesaria distribución regular de combustible.</p>	<p>es apto, la eólica puede ser la fuente principal de electricidad. - Necesaria distribución regular de combustible.</p>	<p>necesarias para este tipo de electrificación se adecua a este sistema híbrido. + Gran penetración de la generación con fuentes renovables (sobre todo eólica)</p>	<p>necesarias para este tipo de electrificación se adecua a este sistema híbrido. + Gran penetración de la generación con fuentes renovables (sobre todo eólica)</p>
<p>+ Posibilidad de aumento gradual de paneles FV y del banco de baterías. + Se pueden añadir reguladores e inversores a los ya existentes.</p>	<p>+ Posibilidad de aumento gradual de paneles fotovoltaicos. 6 - Se requiere el cambio de regulador e inversor.</p>	<p>- Saltos en la potencia instalada altos. + Posibilidad de cambio de generador diésel no muy costosa.</p>	<p>- Saltos en la potencia instalada altos. + Posibilidad de cambio de generadores diésel no muy costosa.</p>	<p>+ Posibilidad de aumento gradual de los paneles fotovoltaicos y del banco de baterías.</p>	<p>+ Posibilidad de aumento gradual de los paneles fotovoltaicos.</p>
<p>+ Los generadores adaptan su producción eléctrica a la demanda. + Rendimiento mejorado por el uso de baterías.</p>	<p>+ Los generadores adaptan su producción eléctrica a la demanda. - Escaso rendimiento gran parte del día.</p>	<p>+ Los generadores adaptan su producción eléctrica a la demanda. + Rendimiento mejorado por el uso de baterías.</p>	<p>+ Los generadores adaptan su producción eléctrica a la demanda.</p>	<p>+ Los generadores adaptan su producción eléctrica a la demanda. + Rendimiento mejorado por el uso de baterías.</p>	<p>+ Los generadores adaptan su producción eléctrica a la demanda.</p>
<p>0% pues las baterías cubren la demanda en las paradas técnicas del generador.</p>	<p>0% de demanda anual no satisfecha. Al contar con dos generadores, en las paradas por sustitución o mantenimiento uno de ellos puede seguir funcionando.</p>	<p>0% de la demanda anual no satisfecha. Las baterías cubren la demanda en las paradas técnicas de mantenimiento.</p>	<p>0% de la demanda anual no satisfecha. Al contar con dos generadores, en las paradas por sustitución o mantenimiento uno de ellos puede seguir funcionando.</p>	<p>0% de la demanda anual no satisfecha. Las baterías cubren la demanda en paradas técnicas de mantenimiento.</p>	<p>0% de la demanda anual no satisfecha. Al contar con dos generadores, en las paradas por sustitución o mantenimiento uno de ellos puede seguir funcionando.</p>
<p>- Complejidad en el sistema de control por tratarse de un sistema híbrido. - Componentes electrónicos complejos.</p>	<p>+ Menor complejidad del sistema de control que con baterías.</p>	<p>- Complejidad en el sistema de control por tratarse de un sistema híbrido. - Componentes electrónicos complejos.</p>	<p>+ Menor complejidad del sistema de control y menor número de componentes que con baterías.</p>	<p>- Complejidad y elevado número de componentes.</p>	<p>+ Menor complejidad del sistema de control y menor número de componentes que con baterías.</p>
<p>Vida de las baterías: Siete años. Vida del generador: Ocho años. 6.000 €/año.</p>	<p>Vida de los generadores: Tres años. 3.700 €/año.</p>	<p>Vida de las baterías: Siete años. Vida del generador: ocho años. 5.300 €/año.</p>	<p>Vida de los generadores: tres años. 3.900 €/año.</p>	<p>Vida de las baterías: ocho años. Vida del generador: 12 años. 5.600 €/año.</p>	<p>Vida del generador: Cuatro años. 235 €/año.</p>
<p>18.000 litros de gasóleo/año. 9.000 €/año.</p>	<p>33.600 litros de gasóleo/año. 16.800 €/año.</p>	<p>11.900 litros de gasóleo/año. 5.950 €/año.</p>	<p>28.450 litros de gasóleo/año. 14.225 €/año.</p>	<p>3.800 litros de gasóleo/año. 1.900 €/año.</p>	<p>23.500 litros de gasóleo/año. 11.750 €/año.</p>
<p>0,40 €/kWh. - El bajo precio del generador no contrarresta</p>	<p>0,36 €/kWh. + Ahorro en componentes. - Escaso ahorro</p>	<p>0,37 €/kWh. - El alto desembolso inicial equilibra el</p>	<p>0,37 €/kWh. - El bajo desembolso inicial se</p>	<p>0,39 €/kWh. - Inversión inicial. - Coste de</p>	<p>0,40 €/kWh. - El ahorro por menor número de componentes</p>

el coste de los paneles fotovoltaicos.	de combustible.	ahorro de combustible obtenido.	contrarresta con el coste de operación elevado.	mantenimiento. + Gran ahorro de combustible.	se contrarresta por el mayor consumo de gasoil.
193.300 €. FV: 78.400 €. Generador: 12.300 €. Depósitos: 8.750 €. Reg / inv: 49.650 €. Bat: 15.200 €. Instalación: 29.000 €.	121.400 €. FV: 78.400 €. Generador: 20.000 €. Depósitos: 8.750 €. Reg / inv: 2.850 €. Instalación: 11.400 €.	163.150 €. Aerogen+torre: 35.300 €. Generador: 12.300 €. Depósitos: 8.750 €. Reg / inv: 50.800 €. Bat: 15.200 €. Instalación: 40.800 €.	88.200 €. Aerogen+torre: 35.300 €. Generadores: 20.000 €. Depósitos: 8.750 €. Reg / inv: 4.000 €. Instalación: 20.150 €.	202.600 €. FV: 20.150 €. Aerogen+torre: 35.300 €. Gen.+dep.: 44.050 €. Baterías: 24.300 €. Reg / inv: 51.300 €. Instalación: 50.500 €.	151.450 €. FV: 20.150 €. Aerogen+torre: 35.300 €. Generadores: 20.000 €. Depósitos: 8.750 €. Reg / inv: 31.350 €. Instalación: 35.900 €.
8 + Recurso solar óptimo en amplias zonas. + Gran disponibilidad comercial de generadores - Transporte de baterías.	8 + Recurso solar óptimo en amplias zonas del mundo. + Gran disponibilidad comercial de generadores.	6 - Emplazamientos aptos escasos (recurso eólico óptimo, terreno disponible). + El generador suple la falta de recurso eólico.	6 - Emplazamientos aptos escasos (recurso eólico óptimo, terreno disponible). + Los generadores suplen la falta de recurso eólico.	4 - Emplazamientos aptos escasos (recurso eólico óptimo, terreno disponible). + El generador suple la falta de recurso eólico.	4 - Emplazamientos aptos escasos (recurso eólico óptimo, terreno disponible). + Los generadores suplen la falta de recurso eólico.
5 - CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , partículas. - Evaporación de H ₂ . + Disminución por uso de baterías y paneles FV.	2 - CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , partículas. + Disminución por uso de paneles FV.	6 - CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , partículas. - Evaporación de H ₂ . + Disminución por uso de aerogenerador y baterías.	3 - CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , partículas. + Disminución por uso de aerogenerador.	8 - CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , partículas. + Gran disminución por uso de aerogenerador, paneles FV y baterías.	4 - CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , partículas. + Gran disminución por uso de aerogenerador y paneles FV.
3 - Generador ruidoso. + No funciona siempre.	2 - Generadores ruidosos. - Funcionan casi siempre.	2 - Aerogenerador y generador ruidosos.	1 - Aerogenerador y generadores ruidosos.	1 - Aerogenerador y generador ruidosos.	1 - Aerogenerador y generadores ruidosos.
7 + Posibilidad de integración arquitectónica de los paneles. + Generador no visible.	7 + Posibilidad de integración arquitectónica de los paneles FV. + Generador no visible.	4 ± Depende del emplazamiento. - Visible a gran distancia.	4 ± Depende del emplazamiento. - Visible a gran distancia.	3 ± Depende del emplazamiento. - Visible a gran distancia.	3 ± Depende del emplazamiento. - Visible a gran distancia.
3 - Emisiones CO. - Fugas de combustible. - Derrames y H ₂ baterías.	4 - Emisiones CO. - Fugas de combustible.	3 - Emisiones CO. - Fugas de combustible. - Derrames y H ₂ baterías.	4 - Emisiones CO. - Fugas de combustible.	3 - Emisiones CO. - Fugas de combustible. - Derrames y H ₂ baterías.	4 - Emisiones CO. - Fugas de combustible.
566	626	604	611	572	557

Tabla II. (parte 2): Tabla resumen donde se valoran los requisitos para los diferentes sistemas de generación eléctrica.

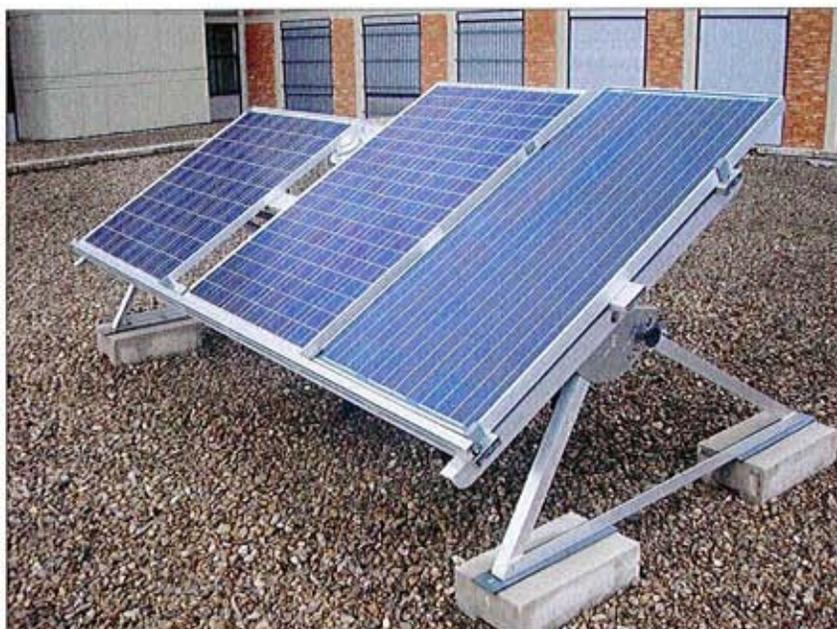


Figura 2 : Paneles solares

do por el aerogenerador aconseja la instalación a una cierta distancia de zonas habitadas. No obstante, es una tecnología sencilla y accesible, los aerogeneradores tienen un ciclo de vida largo y existen modelos muy sencillos y robustos. Optaremos por la simplicidad de los sistemas sin mecanismo multiplicador, orientación pasiva y alternador de imanes permanentes.

El aprovechamiento energético de la biomasa es una tecnología prometedora y con una rápida evolución

que explota su verdadero potencial con la cogeneración. La potencia de electrificación de nuestro pueblo tipo es demasiado pequeña para que esta opción tecnológica resulte atractiva. Esto se debe a los altos costes de adquisición y mantenimiento; además la disponibilidad de esta tecnología en lugares próximos al emplazamiento es escasa pues, aunque un gasificador simple y pequeño puede ser construido en talleres metal mecánicos convencionales, se requiere un gran conocimiento y experiencia de la

tecnología para obtener rendimientos óptimos. Descartamos, pues, esta opción tecnológica.

Los sistemas de generación microhidráulica son robustos (pueden funcionar 50 años sin requerir más que la sustitución de alguna pieza), muy eficientes en la conversión de energía, de generación continua y presentan un coste por vatio instalado inferior al resto de tecnologías analizadas siempre que el emplazamiento sea idóneo (entre 1 y 2 €/W). Lamentablemente esto no es lo común y el coste se dispara hasta los 7 €/W, de modo que muchas veces se hace más económico la distribución desde un línea existente que la implantación del sistema. Además es difícil garantizar el suministro a lo largo de todo el año, por lo que debería combinarse con otras tecnologías como la fotovoltaica. Descartaremos esta tecnología en el presente estudio.

Los equipos de almacenamiento de energía son necesarios tanto en los sistemas que no se adaptan a la demanda (eólica o fotovoltaica) como en los sistemas que sí lo hacen (combustibles fósiles o biomasa) para mantener un rendimiento óptimo y reducir el consumo de combustible. Existen múltiples sistemas de almacenamiento (baterías, bombeo de agua, almacenamiento neumático, cinético o por hidrógeno). Tras un examen minucioso de todas ellas, aun-

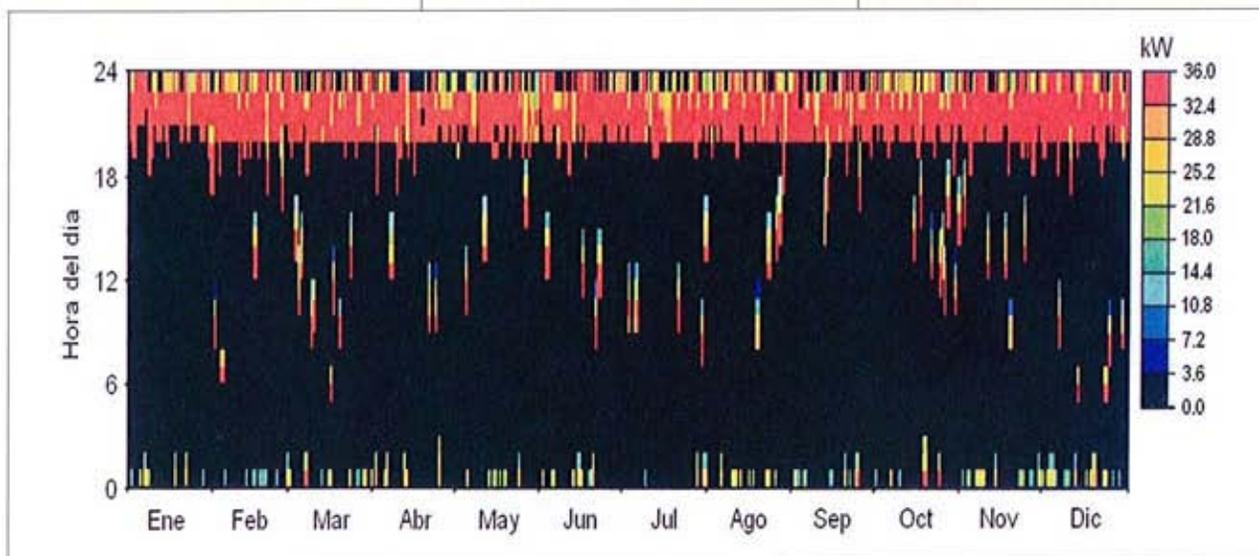


Figura 3: Simulación del régimen de funcionamiento del generador diesel para el sistema de generación fotovoltaica y diesel con almacenamiento por baterías.

que otras alternativas tienen un mejor comportamiento en cuanto a eficiencia del ciclo de carga/descarga, auto-descarga, seguridad o profundidad de descarga aconsejable, consideraremos la opción de baterías de plomo-ácido inundadas por motivo de costes y de disponibilidad tecnológica, siendo realistas a corto plazo. Ha de tenerse en cuenta que, al ser el elemento del sistema que menor vida tiene, podría ser sustituido por otro sistema mejor al cabo de unos años.

En todos los sistemas que utilizan baterías una parte esencial es el regulador de carga. Su propósito es mantener las baterías alimentadas correctamente bloqueando la inversión de corriente, previniendo la sobrecarga y controlando el exceso de generación eléctrica. Así se prolongan su rendimiento y vida útil. El examen de los diferentes tipos conduce al siguiente resultado: para los sistemas de generación fotovoltaica se utilizarán reguladores MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) pues mejoran la eficiencia de los bancos de baterías de gran tamaño, como es nuestro caso, sobre todo en los meses de menor insolación; para la generación eólica se opta por reguladores PWM (*Pulse Width Modulation*), especialmente útiles en sistemas con exceso de generación; para los sistemas de generación híbrida fotovoltaica/eólica se emplearán reguladores *Power Center* que se encargan de la gestión del banco de baterías, del funcionamiento de todas las fuentes de generación y del exceso de electricidad generada por éstas.

Los inversores se encargan de la conversión en corriente alterna para consumo de la corriente continua entregada por los paneles fotovoltaicos, los bancos de baterías o algunos aerogeneradores pequeños. Aunque los inversores de onda senoidal pura cuestan el doble que sus equivalentes de onda senoidal modificada, se opta por emplear los primeros como previsión de un posible aumento de la calidad eléctrica demandada. Los efectos adversos por la utilización de inversores de onda senoidal modificada son: zumbido de altavoces y fluorescentes, parpadeos de monito-

res de ordenador, funcionamiento deficiente de microondas y aparatos con motores eléctricos de velocidad variable (algunos ventiladores, taladros, batidoras...), no funcionan los reguladores de intensidad de luz,...

6- VALORACIÓN Y COMPARACIÓN DE LAS OPCIONES TECNOLÓGICAS

Una vez conocidas las condiciones de operación y las tecnologías aplicables, se ha hecho un estudio, primero independiente y después comparativo, de los distintos sistemas válidos analizando el cumplimiento de los requisitos, ventajas e inconvenientes, costes y calidad del servicio. Para determinar los costes de operación y el porcentaje de la demanda anual no satisfecha en cada sistema propuesto se ha empleado el simulador *HOMER*, software de libre acceso del NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) del departamento de energía estadounidense.

La Tabla I resume dicho estudio. En ella se ha ponderado el peso de cada uno de los criterios y otorgado una puntuación entre 0 y 10 a cada uno de ellos (1-2 deficiente, 3-4 escaso, 5-6 adecuado, 7-8 bueno, 9-10 excelente). La adecuación de cada uno de los sistemas viene dada por su puntuación total.

7- CONCLUSIÓN

A la vista de la tabla comparativa, se observa que la opción más valorada es la generación diésel sin sistema de almacenamiento a pesar de los elevados costes de servicio. El resultado no es sorprendente en absoluto pues, a fin de cuentas, es la tecnología más usada hoy en día para emplazamientos con distribución regular de combustible. No obstante, se observa que los sistemas en los que la generación diésel se apoya en energías renovables tienen una buena valoración global.

Una de las premisas de este estudio es la posible evolución alcista del precio de los combustibles fósiles, a pesar de lo cual en el análisis realizado el precio de referencia del gasóleo se ha tomado conservador (0,5 €/litro). Por tanto, es de esperar que en unos años los sistemas híbridos sean

la opción más rentable. Como queda patente en las simulaciones realizadas, la generación diésel aún no puede eliminarse por completo pues garantiza la calidad del servicio. Asimismo, cuanto mayor es la penetración de la generación renovable en el sistema, adquiere mayor importancia el sistema de almacenamiento; lo cual nos hace mirar de reojo la evolución de la tecnología del hidrógeno.

En definitiva, el desarrollo de proyectos de electrificación autónoma destinados a los países en vías de desarrollo constituye una buena oportunidad empresarial. El presente estudio marca la línea de acción a seguir: la tecnología de generación híbrida, cuya penetración renovable crecerá con el paso de los años.

8- BIBLIOGRAFÍA

- [1] United Nations Development Report. *Making new technologies work for human development*. New York: Oxford University Press, 2001. ISBN 0-19-521835-3.
- [2] Federación Española de Ingeniería Sin Fronteras. *Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo*. Madrid: IEPALA (Institutos de Estudios Políticos para América Latina y África), 1999. ISBN: 84-89743-08-8.
- [3] ZHOU, Aiming y BYRNE, John. "Renewable energy for rural sustainability: Lessons from China". *Bulletin of Science, Technology & Society*: 2002. Volumen 20, nº 2, pp. 123-131.
- [4] JAMASB, Tooraj, MOTA, Raffaella, NEWBERY, David, POLLITT, Michael. "Electricity sector reform in developing countries: a survey of empirical evidence on determinants and performance". *World Bank Policy Research Working Paper*: 2005. Vol. 3549. ■