

ESTUDIO DE CAMPO DE LA GENERACIÓN HÍBRIDA DIESEL/RENOVABLE PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL

Pablo Díaz - pablo.diaz@uah.es

Rafael Peña - rafael.pena@uah.es

Universidad de Alcalá, Escuela Politécnica Superior

Carlos Alberto Arias – carias@ejesa.com.ar

Daniel Sandoval – dsandoval@ejesa.com.ar

Empresa Jujeña de Servicios Energéticos Dispersos (EJSEDSA)

Resumen. *Este trabajo presenta el estudio operativo de tres tecnologías de generación aislada utilizadas para la electrificación de aldeas rurales. Los generadores térmicos diesel constituyen la tecnología más extendida. Es una tecnología simple y bien conocida, aunque tiene algunas desventajas: los costos de transporte y consumo de combustible, las necesidades de mantenimiento y los problemas medioambientales, fundamentalmente. El uso de recursos energéticos locales (básicamente renovables) constituye una opción a tener en cuenta. Debido al carácter intermitente de estos recursos, los sistemas de generación renovables se asocian a veces con el generador diesel, con el fin de aumentar la fiabilidad del abastecimiento eléctrico. Se realiza un análisis comparativo entre los generadores diesel, los sistemas híbridos hidro-diesel y fotovoltaico-diesel, en términos de tasas de consumo de combustible. Asimismo, se estudia la evolución de la demanda energética de las comunidades, por su influencia sobre el funcionamiento del sistema y su sostenibilidad. El trabajo se basa en datos de campo obtenidos de los sistemas instalados en la zona rural de la provincia de Jujuy, al noroeste de Argentina. El estudio abarca desde el año 2001 hasta 2008, con un universo de investigación de 16 localidades suministradas por la generación térmica (1 con un sistema diesel grande y otros 15 con sistemas más pequeñas), 5 localidades con hidro-diesel y 7 con sistemas fotovoltaicos-diesel.*

Palabras-clave: energía renovable, sistema híbrido, electrificación rural, off-grid

1. INTRODUCCIÓN A LA ELECTRIFICACIÓN SIN CONEXIÓN A RED

En la actualidad, la mayor parte del suministro eléctrico en el mundo se genera en grandes plantas generadoras (carbón, nuclear, gas, fuel o gran hidráulica), conectadas a las redes nacionales. Como es bien sabido, en los últimos años se ha producido un desarrollo significativo de los llamados sistemas de generación distribuida: aerogeneradores, biomasa, solar fotovoltaica o pequeña hidráulica, para complementar la estructura de la red. Sin embargo, amplias zonas rurales y periurbanas todavía carecen de un acceso fiable al suministro eléctrico en red.

El suministro eléctrico debe incluirse dentro de una visión global basada en acciones de desarrollo local que abarquen tanto infraestructuras como servicios: carreteras, telecomunicaciones, agua potable, sanidad, educación, etc., con la participación fundamental de instituciones y gobiernos, además del sector privado. La electrificación por sí misma no resuelve los problemas de pobreza, ni siquiera los problemas de acceso a la energía, ya que la necesidad de otras fuentes de energía en muchos casos permanece, como el uso de madera, carbón o fuel para cocina o para usos térmicos (Bhattacharyya, 2006). Sin embargo, un suministro eléctrico fiable se puede considerar como una herramienta válida y necesaria para el desarrollo rural.

En este contexto, la extensión de la red eléctrica todavía se considera como la primera opción para la electrificación de áreas hasta ese momento sin acceso. Además de por el propio suministro eléctrico, la llegada de la red es percibida comúnmente por la población de las zonas rurales como síntoma de integración en las estructuras regionales o nacionales. La realidad muestra que incluso después de la instalación de un sistema autónomo, este se percibe como una solución temporal previa a la llegada de la red, si bien se pueden encontrar bastantes ejemplos de redes de baja calidad, con frecuentes cortes de suministro, mantenimiento deficiente o conexiones ilegales.

Sin embargo, hay muchos lugares en el mundo donde la red eléctrica no ha llegado y es seguro que no va a llegar en el futuro, al menos en el corto y medio plazo. Para todos esos lugares existen diferentes alternativas de suministro eléctrico, dependiendo de las condiciones locales. Las acciones de electrificación rural no deben abordarse únicamente desde el punto de vista técnico, en la elección de la tecnología óptima, si no que de la misma importancia resultan factores como las necesidades y capacidad de consumo energético de las comunidades, el desarrollo del mercado o la financiación (Reiche *et al.*, 2000). Las diferentes opciones de financiación y estructuración de los programas de electrificación rural, la implicación de los sectores público y privado o el acceso a la electricidad visto como servicio o como producto de mercado son temas de discusión recurrentes (Lorenzo, 2000), (Reiche *et al.*, 2006) y todavía abiertos.

En estos entornos aislados, las principales tecnologías de generación eléctrica utilizadas en la actualidad son grupos diesel, turbinas micro-hidráulicas, pequeños aerogeneradores y sistemas fotovoltaicos.

El uso de generadores diesel autónomos está ampliamente extendido por todo el mundo. Es una tecnología probada, de gran difusión, sencilla y conocida por los habitantes de los mercados rurales. Presenta ciertas desventajas,

como es el elevado costo que el combustible puede alcanzar en el lugar de uso, por el transporte a localidades que, en ocasiones, no cuentan con buenos caminos. Las dificultades de acceso se pueden agravar en determinadas épocas del año, siendo necesario contar con cisternas de almacenamiento de combustible de gran tamaño, lo que supone un costo financiero elevado. Junto a ello, cabe destacar los posibles problemas medioambientales, cada vez más tenidos en cuenta en los últimos años.

En este contexto, se puede comprender que la reducción del consumo de combustible sea siempre un objetivo básico en todo sistema autónomo, no sólo por razones económicas sino de garantía de suministro. Además de las medidas de ahorro en la demanda, una opción interesante es la hibridación de los sistemas diesel con otras fuentes de energía, fundamentalmente renovables como viento, sol o agua. Este tipo de sistemas han experimentado una gran difusión en las últimas dos décadas y se espera que continúen en esa línea en los próximos años.

El uso de sistemas híbridos para la electrificación rural aparece con dos orígenes diferentes. Por una parte, existen localidades que disponen de un generador diesel ya con años de operación que suministra electricidad durante un reducido número de horas al día, en muchos casos con un elevado consumo de combustible y algunos problemas de fiabilidad. En estos sistemas, la conexión en paralelo de un generador renovable permite la ampliación del número de horas de suministro eléctrico y/o el ahorro de combustible. El aumento del precio de los combustibles en el mundo ha contribuido a la implantación de este tipo de soluciones de repotenciación de los generadores diesel existentes.

Por otra parte, generadores que utilizan una fuente renovable, e intermitente, ya sea agua, viento o radiación solar, se han dotado con un generador diesel adicional, para incrementar la fiabilidad total y prevenir de cortes de energía en momentos de escasez del recurso renovable.

En este tipo de instalaciones híbridas, el generador diesel está pensado para operar como sistema de apoyo, únicamente cuando el generador renovable no sea capaz de suministrar la potencia requerida. Sin embargo, dependiendo de la disponibilidad del recurso renovable, de las condiciones técnicas de los equipos y de la potencia pico de consumo demandada, la contribución del generador diesel puede variar. Este es uno de los aspectos en los que se profundiza en el presente trabajo.

En primer lugar se presenta la evolución del consumo eléctrico en localidades rurales aisladas en función de las del sistema de generación disponible o, como se verá, de las características de la propia localidad. A continuación se realiza un análisis comparativo del consumo de combustible en las diferentes tecnologías diesel/renovable.

Los datos de campo expuestos provienen de los sistemas instalados en la zona rural de la provincia de Jujuy, en Argentina. El estudio cubre el período 2001-2008, en un universo de 16 localidades con generación térmica, 5 localidades con generación híbrida hidro-diesel y 7 localidades FV-diesel. No se incluyen sistemas aislados eólicos, puesto que en la zona de trabajo no es una tecnología extendida, si bien se prevé la instalación de algunos aerogeneradores en el futuro.

Este artículo puede contemplarse como un complemento de estudios teóricos existentes sobre sistemas de electrificación rural. El dimensionado y la optimización de los sistemas son temas habituales de análisis en relación con los sistemas híbridos, especialmente los formados por fotovoltaica y diesel (Musselli et al., 1999), (Dufo-López y Bernal-Agustín, 2006). También se han publicado estudios comparativos sobre la viabilidad de las diferentes opciones tecnológicas, en los que los factores regionales o locales tienen un papel preponderante. Asumiendo este hecho, se acepta que las conclusiones no son las mismas si un problema de electrificación rural es analizado en India (Kohle et al., 2002), Vietnam (Nguyen, 2007) o Senegal (Camblong, 2009).

2. DEMANDA DE ENERGÍA Y POTENCIA EN COMUNIDADES AISLADAS

La estimación de la demanda eléctrica es absolutamente necesaria en la etapa de diseño de un sistema de generación eléctrico aislado, sin conexión a una red nacional. Sin embargo, es una tarea compleja y costosa. Si el lugar no estaba electrificado por otros medios hasta ese momento, la información disponible será escasa. El uso de referencias de experiencias similares resulta de utilidad, aunque los factores locales pueden llegar a tener una gran influencia.

Junto a esto, una vez que la electrificación se ha realizado, es esperable un aumento progresivo del consumo, por dos motivos: incremento de población y aumento del consumo per-cápita, tal y como ocurre en las ciudades, en conexión a red. La comunidad de reciente electrificación habitualmente constituye un polo de atracción de personas que viven en lugares aún más remotos, con menos servicios. Además, las familias pueden ir adquiriendo poco a poco nuevo equipamiento eléctrico y también ir cambiando su comportamiento de consumo con la llegada de la electrificación. Estos cambios sociales/económicos causados por la electrificación de un entorno rural también han sido objeto de estudio, como muestran Madubansi y Shackleton en Sudáfrica (2006).

Así pues, la evolución de la demanda de energía es un factor clave en la operación de los sistemas. En las redes eléctricas interconectadas su influencia se centra principalmente en la capacidad de las líneas de transporte y distribución. Esto es un problema cuya solución se aborda en planificaciones a medio y largo plazo. Sin embargo, en los sistemas autónomos, sin la cobertura de la red general, la capacidad de generación y de almacenamiento son puntos clave en el suministro eléctrico diario.

En Tab. 1 se presentan los valores medios de consumo eléctrico de una serie de comunidades rurales agrupadas según el tipo de sistema de generación existente. Cabe indicar que en la electrificación rural de zonas aisladas no es extraño limitar el número de horas diarias de suministro eléctrico, como forma de ahorro y garantía de suministro futuro. Así, entre los sistemas analizados solo uno de ellos, localizado en la población de Susques ofrece 24 horas al día

de servicio, con una generación diesel de 570kVA. Los sistemas híbridos hidro-diesel están limitados a 18 horas al día, mientras que los grupos diesel de menor tamaño se conectan 8 horas al día.

Tabla 1: Demanda eléctrica por tipo de sistema (año 2008)

Tipo de sistema	N sistemas	N clientes	Demanda eléctrica total (kWh por día)	Demanda eléctrica por cliente (kWh por día)
Diesel grande(24h)	1	283	2054	7.25
Diesel pequeño (8h)	15	873	853	0.98
Hidro-diesel (18h)	5	811	1084	1.34
FV-diesel	7	358	128	0.36

Al observar los datos de consumo por cliente (familia, local, taller, ...) se concluyen diferencias significativas. Esa diversidad no se debe al tipo de tecnología de generación en sí, si no a las características de las comunidades suministradas. Así, las localidades de mayor tamaño presentan un mayor consumo, debido a la mayor actividad económica y mayor disponibilidad de equipamiento eléctrico por parte de sus habitantes. A medida que uno se aleja de las zonas más concurridas se encuentran comunidades de menor población y demanda eléctrica inferior.

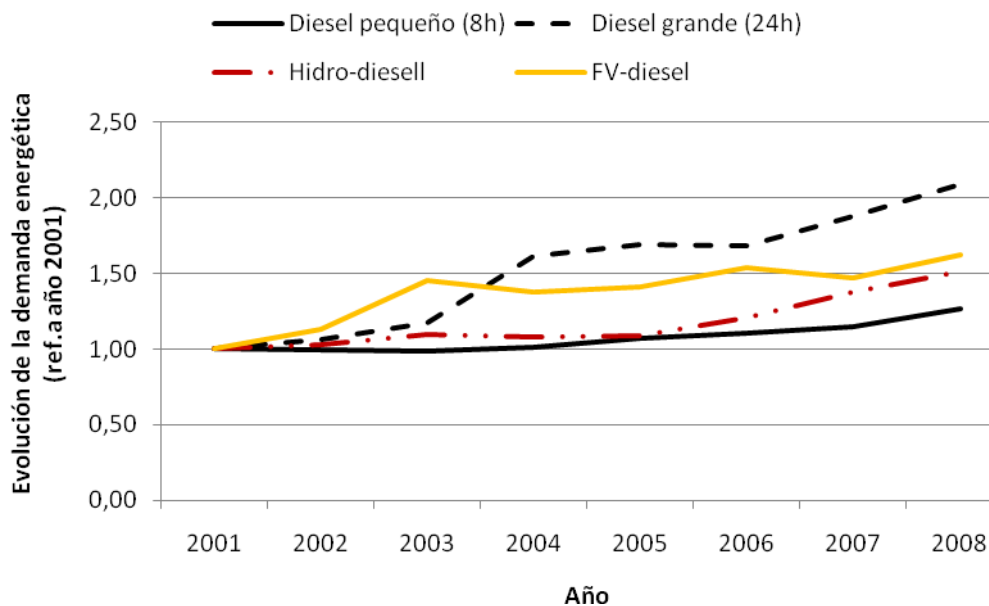


Figura 1: Evolución relativa de la demanda energética diaria media, por tipo de sistema

Como se muestra en la Fig. 1, se ha producido un aumento general del consumo eléctrico a lo largo de los años, como era de esperar, si bien a diferentes tasas. Esta variabilidad no depende intrínsecamente de la tecnología sino, de nuevo, de determinadas condiciones particulares, como el lugar de instalación (tamaño de la población, accesibilidad, equipamiento, etc.) y del plan horario de suministro eléctrico ya mencionado. Por ello, este estudio no pretende establecer ningún modelo de aplicación universal sobre demanda eléctrica en zonas rurales, sino simplemente introducir algunas pistas sobre las diferentes situaciones que pueden aparecer en el terreno.

Si bien la evolución de la demanda no es característica de la tecnología de generación, los problemas de sobreconsumo serán tratados de diferente forma dependiendo del tipo de sistema y recurso energético.

La microrred con el generador diesel de mayor tamaño suministra la electricidad a la zona más populosa de la región, donde la demanda se ha duplicado en los últimos 8 años. La disponibilidad de equipamiento eléctrico y el número de familias con capacidad económica para su adquisición es superior a la de zonas más remotas y comunidades de menor tamaño. El transporte de combustible no resulta excesivamente costoso, ya que las comunicaciones viarias son aceptables. Además, la población de estas comunidades de mayor concentración aumenta debido a la emigración desde zonas de la región más lejanas.

Al alejarse aún más de la red las condiciones cambian. Poblaciones de menor tamaño, suministradas por generadores diesel de pequeña potencia han incrementado su consumo a menor tasa de crecimiento. Allí el ahorro de consumo presenta aún mayor relevancia, ya que el transporte del combustible es más caro y en ocasiones complicado. Además, las condiciones económicas de los habitantes son más proclives a actividades de bajo consumo eléctrico, con escasez de equipamiento.

En los sistemas híbridos renovable-diesel, el exceso de energía sobre lo previsto (y diseñado) normalmente es cubierto por el grupo diesel. El sistema renovable suele ser menos flexible una vez diseñado, debido a la limitación del recurso energético y su almacenamiento.

Los sistemas hidro-diesel analizados suministraron en media unos 200kWh al día en el año 2008, variando entre los 85kWh/día de las localidades de La Puna hasta los 310kWh/día en zonas con mayor régimen de lluvias. Han experimentado un incremento de demanda/producción reducido en una primera etapa y superior posteriormente, en parte debido a la conexión a una de las miniredes de una localidad adicional en 2006. En estos casos, el diseño del sistema y la disposición de agua año a año resulta clave en el aporte de combustible, como se describe en el apartado siguiente.

Los sistemas fotovoltaicos con apoyo de grupo diesel (15kWh por día en media, hasta 42kWh/día en el mayor de ellos), han visto incrementada la demanda eléctrica en un 50% en 8 años, pero siempre con valores de consumo bajos como se mostró en Tab. 1. En estos sistemas, en los que el recurso solar y el almacenamiento en baterías está limitado, el aumento de consumo se traduce en un mayor gasto en combustible, por lo que debe ser controlado. Existen diversas estrategias de control del consumo en este tipo de sistemas donde el comportamiento inadecuado de uno de los vecinos puede poner en riesgo el suministro de toda la comunidad. En poblaciones de pequeño tamaño puede bastar con la propia relación de confianza entre los vecinos. Si eso no es posible existe la opción de aplicar tramos crecientes de tarifas al consumo que sancionen los excesos o dispositivos limitadores de energía, con valores ajustables.

Experiencias similares con sistemas híbridos en Marruecos (Muñoz et al., 2007) o Tailandia (Phuangpornpitak y Kumar, 2007) también inciden en la importancia del consumo de energía real sobre el funcionamiento de los sistemas autónomos.

Si bien el consumo energético diario es un factor clave, también los valores pico de demanda tienen su relevancia en la operación de los sistemas híbridos. En las instalaciones hidro-diesel analizadas, el umbral de encendido del grupo térmico era ajustable entre 10 y 36kW. En los FV-diesel dicho umbral está controlado por el voltaje de las baterías, por lo que depende de su tamaño pero también de su grado de envejecimiento. Se puede concluir que, para un mismo valor de energía diaria consumida, un perfil de potencia más suave y constante reduce la necesidad de encendido del grupo diesel y, por tanto, el consumo de combustible. Sin embargo, es habitual que los patrones de consumo se muevan entre horas de consumo muy reducido junto a otras de picos de demanda elevados. Se puede encontrar en la literatura en interesante estudio sobre la influencia de esta potencia de consumo máxima, o perfil de consumo, en sistemas híbridos eólico-diesel (Rehman et al., 2007).

3. CONTRIBUCIÓN DIESEL VS. RENOVABLE EN ELECTRIFICACIÓN AISLADA

Al analizar la operación de los generadores diesel en electrificación rural, resulta imprescindible estudiar las tasas de consumo de combustible que presentan. El combustible supone aproximadamente un 50% de los gastos corriente en los sistemas de generación aislada durante su tiempo de vida y su reducción uno de los motivos para la introducción de las alternativas renovables. En electrificación rural, no debe contemplarse sólo el precio de mercado del combustible, sino que en determinados lugares su transporte hasta las instalaciones generadoras resulta difícil y costoso, debido a las largas distancias y problemas de acceso. Como referencia, en un estudio realizado en Brasil, se menciona que el coste del combustible puede incrementar su precio entre un 15 y un 45% debido al transporte, dependiendo del lugar de suministro (Leoni y Amaral, 2004).

Se estudian tres tipos de sistemas, caracterizados por su tecnología de generación: diesel, híbrido hidro-diesel, híbrido fotovoltaico-diesel.

3.1 Micro-redes con grupos Diesel (sin renovable)

Se ha analizado el comportamiento de 16 generadores diesel de diferentes potencias nominales. De Fig. 2 se puede concluir sin duda que los sistemas de mayor potencia tienen mejores valores de eficiencia en el gasto de combustible, como era esperable. Existen dos razones que explican este comportamiento: primero, los generadores de mayor potencia tienen una mayor eficiencia de operación en condiciones nominales; segundo, para el mismo modelo de generador, la eficiencia se reduce a bajos niveles de carga, situación que se produce a menudo durante el día en la electrificación aislada de comunidades rurales. Como ejemplo, un generador diesel que consume alrededor de 0.3-0.35 l/kWh a potencia nominal, aumenta esta cifra hasta 0.6 l/kWh al 25% de carga (Wakao y Nakao, 2006).

En el estudio de campo realizado se observa que el generador de potencia consume algo menos de 0.35l/kWh, que está en concordancia con las especificaciones y con los valores comúnmente empleados en simulaciones y estudios teóricos. Cabe destacar, además, que para optimizar la operación en las horas de baja demanda eléctrica se utiliza un grupo de 250kVA, reservando el de 570kVA para las de mayor consumo. Los generadores de tamaño medio están consumiendo alrededor de 0.4 a 0.6l por kWh, mientras que los de potencia inferior y los que están operando más tiempo a bajo régimen elevan su tasa de consumo desde 0.6 hasta incluso 0.9l por kWh.

Hay que resaltar la importancia de estos resultados, ya que los estudios teóricos o de simulación de sistemas rara vez consideran otros valores de consumo de combustible diferentes a los estándar para generadores de tamaño medio-grande en condiciones nominales, alrededor de 0.3-0.4 l/kWh. Se puede comprender, por tanto, que la realidad de la generación rural aislada es más compleja y variada, siendo necesaria una mayor dedicación al análisis de la operación y evolución de las instalaciones. Debe resaltarse también la influencia de la altitud: una baja densidad de aire afecta a la operación del sistema, cuanto mayor es la altitud, menor es la eficiencia en la combustión.

Habitualmente la potencia del grupo diesel se selecciona para cubrir la demanda pico de consumo más un 10%, si bien la realidad muestra que el sistema opera por debajo del 25% de carga la mayor parte del tiempo, con la consecuente reducción de eficiencia.

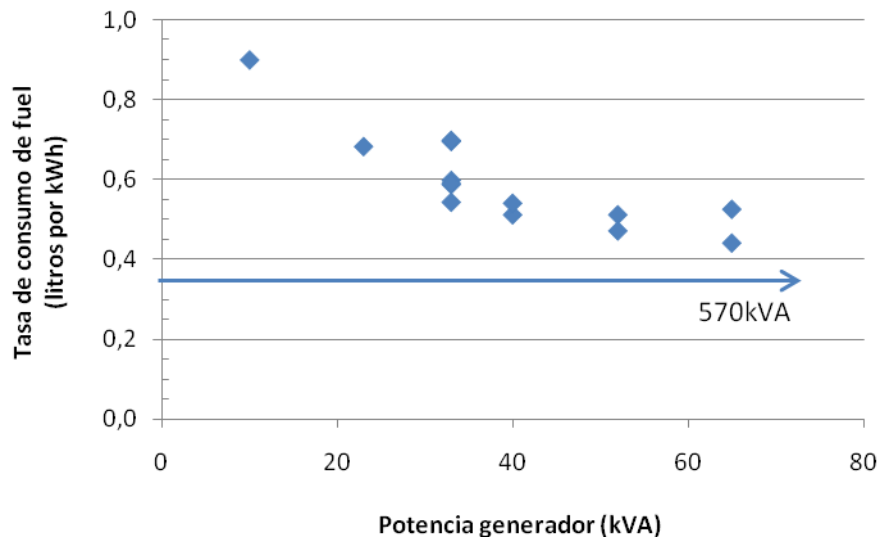


Fig. 2: Consumo de fuel vs.potencia (instalaciones Diesel, media de 5 años 2003-2007)

3.2 Microrredes con instalaciones híbridas hidro-diesel

Se ha analizado la operación de 5 instalaciones con generación híbrida hidráulica-diesel. Están constituidos por un conjunto turbina-alternador de entre 20 y 60kVA, en paralelo con los grupos electrógenos. Están suministrando entre 20 y 130 MWh al año a comunidades rurales de tamaño medio, con alrededor de 100 a 300 viviendas.

La instalación de una turbina hidráulica con apoyo del generador diesel debe reducir el consumo de combustible de forma apreciable respecto a los sistemas que únicamente disponen de grupo diesel para el suministro eléctrico.

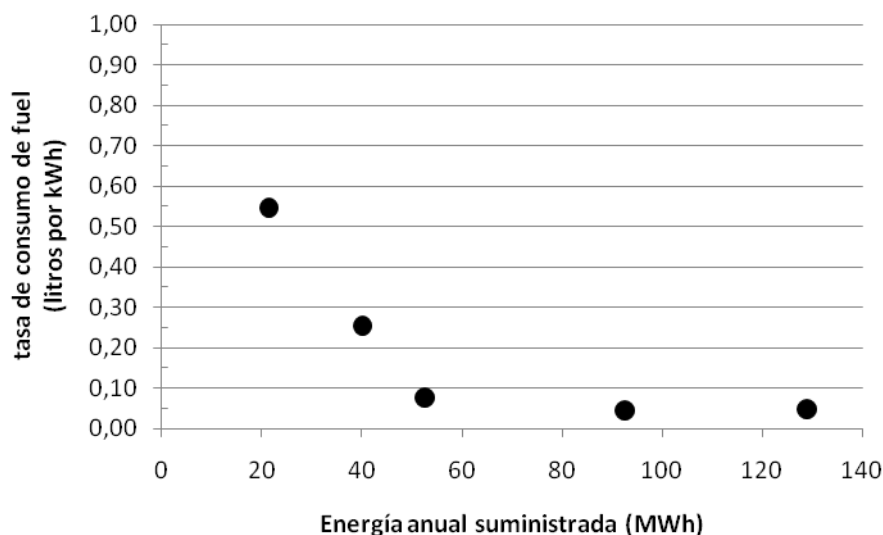


Fig. 3: Consumo de fuel vs. generación eléctrica (Sistemas hidro-diesel, media de años 2003-2007)

Como se muestra en la Fig. 3, la tasa de consumo de combustible se reduce drásticamente respecto a los sistemas solo diesel, con valores alrededor de 0.11 por kWh. Este ahorro en fuel compensa la inversión en el sistema hidráulico, ya que su aprovechamiento es elevado. Otra de las instalaciones el consumo de combustible alcanza los 0.25 litros por kWh, todavía bastante por debajo de los sistemas sin aporte renovable de tamaño similar. El último de los sistemas consume hasta 0.551 por kWh, ya en valores cercanos a los sistemas diesel, es decir, con un aprovechamiento limitado del subsistema hidráulico.

Se puede asumir que la operación instantánea de los grupos diesel es similar en ambos tipos de instalaciones, hidro-diesel y solo diesel, en términos de eficiencia y consumo de combustible. En estas condiciones, se estima que alrededor del 80-90% del total de producción eléctrica demandada por tres de los pueblos se ha suministrado con el

sistema hidráulico, valores muy positivos en instalaciones aisladas, sometidas a variaciones estacionales de lluvias. En otra de las microrredes el reparto entre generación hidráulica y térmica se sitúa alrededor del 50%, mientras que en la última de ellas tan sólo el 10% de la electricidad proviene del sistema renovable.

Existen diversas causas para el mejor o peor aprovechamiento de la tecnología hidráulica. En primer lugar, de forma destacada, se encuentra la disposición de agua, los regímenes de lluvias pero también el correcto estado de los depósitos y conducciones. Como es lógico, durante los períodos de sequía el generador diesel debe conectarse bastante más a menudo que durante la temporada de lluvias.

Otro motivo para tener que utilizar el grupo diesel se debe de la aparición de fallos en el sistema hidráulico. Sin embargo, en los datos estudiados el comportamiento ha sido muy positivo, con escasos casos de parada técnica a lo largo del año.

Una tercera razón que implica diferencias en el balance productivo entre los sistemas hidráulico y diesel proviene del propio diseño de los sistemas, de la potencia de los equipos y de la demanda eléctrica (diaria y puntual) de las comunidades, como se explicó en la sección anterior.

Si se observa el comportamiento año a año de los sistemas, se puede comprobar que la instalación con la contribución hidráulica más baja no ha experimentado un incremento de la demanda eléctrica significativo (Fig. 4). El consumo de combustible varía de un año a otro, inicialmente en valor inferior pero estabilizándose posteriormente, con las variaciones debidas a la disponibilidad de agua.

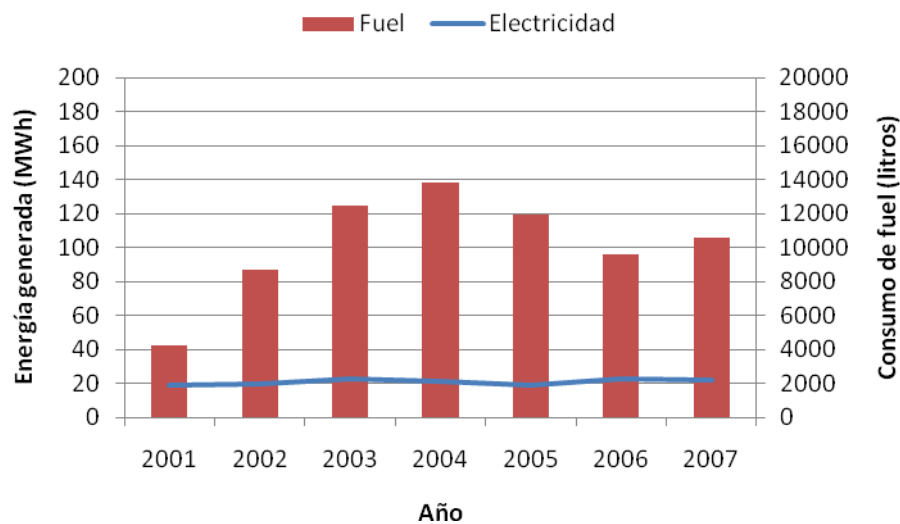


Fig. 4: Consumo global de combustible y generación eléctrica total (Instalación hidro-diesel, La Ciénaga, Jujuy)

En este lugar la dependencia del suministro eléctrico en el grupo diesel es muy elevada, pudiendo considerarse como un generador diesel con apoyo hidráulico. Esta comunidad está situada en el altiplano andino (La Puna argentina), con escasa pluviosidad y muy concentrada en determinados momentos del año.

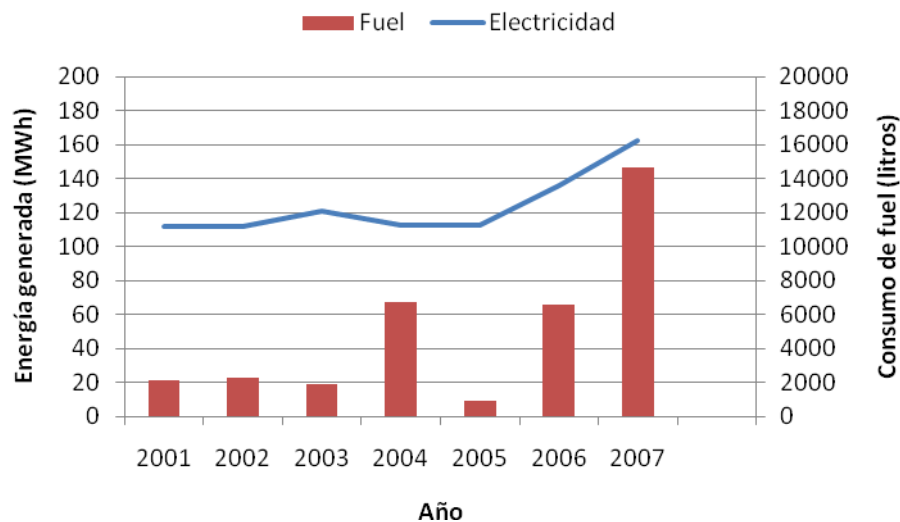


Fig. 5: Consumo de combustible y generación eléctrica total (Instalación hidro-diesel, Valle Grande-Valle Colorado, Jujuy)

En el otro extremos, la instalación reflejada en Fig. 5, ofrece una tasa de utilización del sistema diesel muy baja, con un consumo de combustible reducido. Se muestra, sin embargo, que en los últimos años se ha producido un incremento progresivo de la demanda eléctrica, lo que ha requerido el encendido del grupo diesel más a menudo. En ocasiones, la potencia pico demandada ha superado la potencia nominal del turbo-alternador hidráulico y se tenido que conectar el generador diesel, en un umbral establecido en los 36kW. A pesar de ellos, la contribución anual del recurso hídrico todavía estaba por encima del 75%, con sólo 0.1 litros de fuel por cada kWh generado, muy por debajo de los sistemas solo-diesel de similar tamaño.

La situación particular de este sistema cambió con la conexión de una localidad situada a 10km, con el consiguiente aumento de la potencia térmica instalada y la salida de servicio de la turbina hidráulica.

3.3 Microrredes con instalaciones híbridas FV-diesel

Por último, se han analizado diversos aspectos operativos de 7 instalaciones híbridas FV-diesel que suministran la electricidad a comunidades rurales de pequeño tamaño. Estos lugares han experimentado un incremento de población en los últimos años, en parte causado por la llegada de la electricidad y el desarrollo producido.

Los sistemas de generación de estas microrredes consisten en grupos electrógenos diesel de baja potencia (17kVA) con un generador fotovoltaico de entre 840Wp y 4.6kWp, dependiendo del lugar.

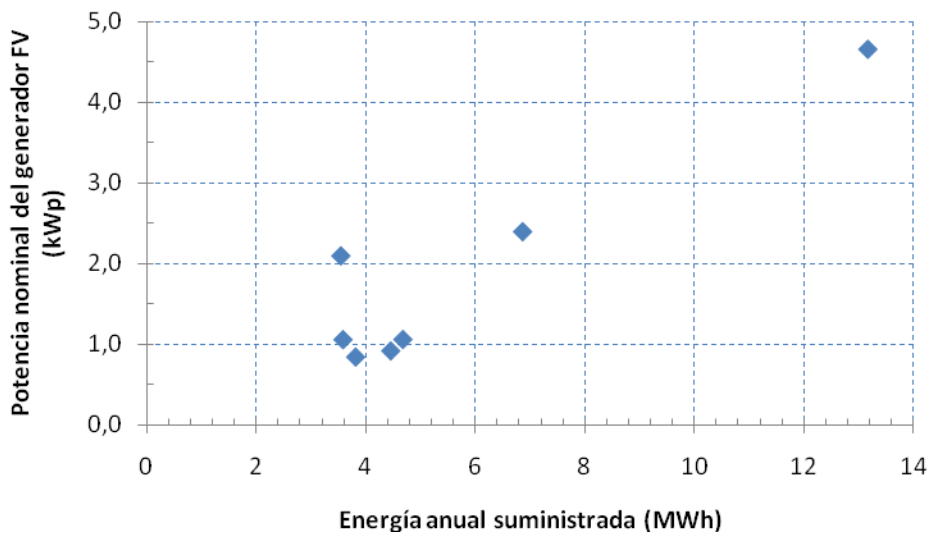


Fig. 6: Energía eléctrica suministrada vs. Potencia nominal generador FV (instalaciones FV-diesel, media de 5 años 2003-2007)

En general (Fig. 6) existe una proporcionalidad entre el tamaño del sistema FV y la demanda eléctrica registrada, con diferencias particulares. Puede concluirse que, a priori, los sistemas están correctamente dimensionados para el consumo de las localidades. Las localidades con sistemas sobre 1kWp de generador FV (y 17kVA de diesel) han consumido alrededor de 4MWh al año. Por otro lado, la instalación de mayor tamaño entregó unos 13MWh al año con un generador FV de 4.6kWp y el mismo diesel de 17kVA. Existen diferencias entre los sistemas de algo más de 2kWp: uno de ellos se mantuvo en valores esperados, de unos 7MWh al año, pero en el otro caso se ha producido un uso por debajo de lo estimado (inferior a 4MWh).

Volviendo a Fig. 2, se concluía que los generadores diesel de estas potencias, trabajando en momentos a bajo régimen de carga, presentabas tasas de consumo de entre 0.7 and 0.9l por kWh. Se muestra en Fig. 7 que la mitad de los sistemas analizados logran reducciones de consumo de fuel de más del 50% respecto a sistemas similares solo-diesel. Otra parte, sin embargo, ofrece valores solo ligeramente inferiores a los grupos diesel puros, entre 0.6-0.7l por kWh.

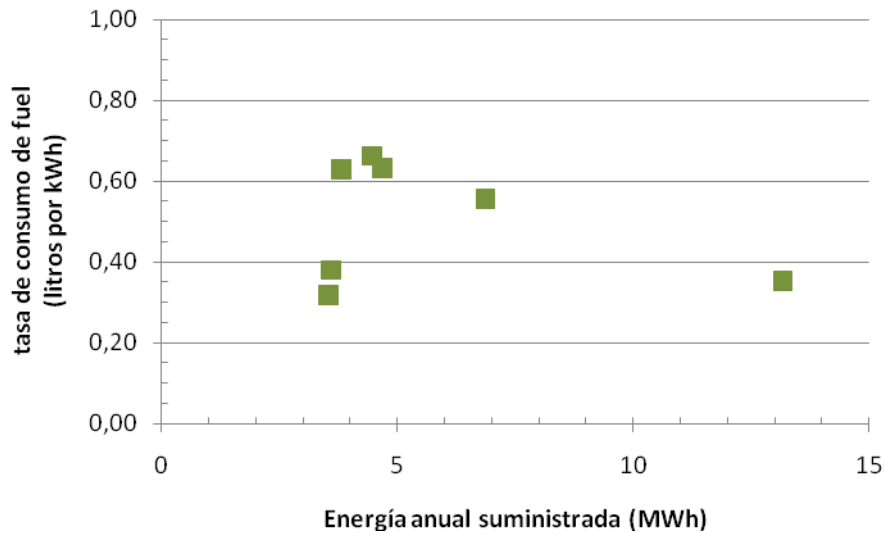


Fig. 7: Consumo de fuel vs. generación eléctrica (instalaciones FV-diesel, media de 5 años 2003-2007)

Pueden existir diversas causas detrás de una operación con poco peso de la tecnología renovable fotovoltaica. Por una parte, pueden producirse problemas técnicos, como una escasa generación eléctrica del sistema solar debido a sombreados, suciedad, mal posicionamiento de los módulos fotovoltaicos o incluso defectos en estos, aunque es menos habitual. Un motivo bastante común de operación deficiente en sistemas con un tiempo de vida medio (varios años) es la degradación de las baterías. En estos casos el generador diesel debe ser conectado de forma frecuente, ya que el voltaje de batería se reduce de forma rápida ante demandas de potencia elevada. Así mismo, aunque se pretendiera recargar las baterías con el exceso de potencia del generador funcionando a potencia nominal, no se podrían recuperar las condiciones iniciales de la batería.

Por otra parte, es posible que a pesar de disponer de un sistema fotovoltaico en buenas condiciones, un incremento del consumo provoque que aquel no sea capaz de suministrar dicha energía, debiendo recurrir al encendido del grupo diesel. En estos casos, comunes cuando la demanda se concentra en los mismos momentos de día se está desaprovechando el sistema fotovoltaico no por un problema de energía, si no de potencia.

Algunos de los factores descritos pueden justificar los resultados observados en Fig. 8. En un plano teórico, si los sistemas están bien dimensionados, adaptados al consumo y en buenas condiciones, el consumo de combustible por kWh debería ser similar, con la salvedad de las diferencias climatológicas entre las ubicaciones y la consecuente falta de aporte solar. Existirían diferencias de operación en el encendido del grupo diesel, ya que todos ellos son de la misma potencia, cuando la demanda entre las localidades es bien diferente. Sin embargo, se observa en el gráfico que existen diferencias apreciables entre sistemas muy similares (por ejemplo, los de 1kWp). Varios de ellos tienen una elevada tasa de consumo de combustible por kWh generado, pero existe uno de ellos con un valor de casi la mitad.

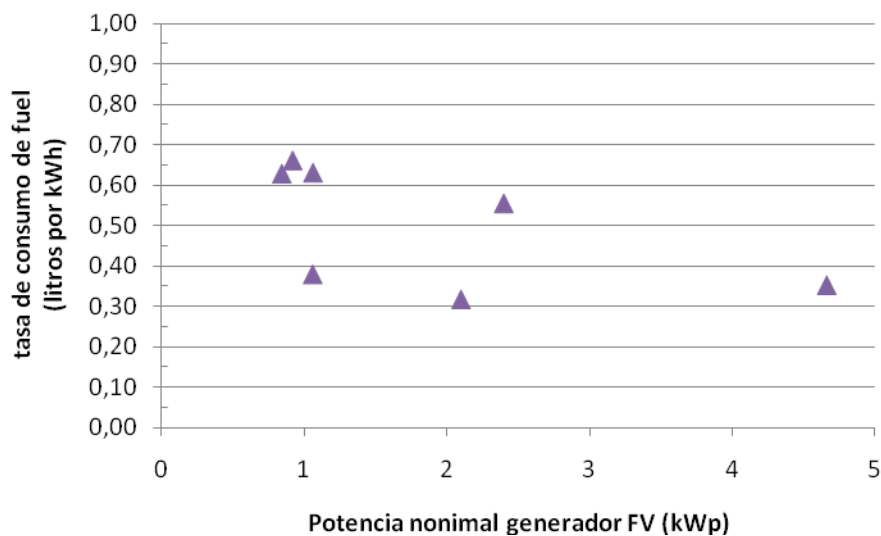


Fig. 8: Consumo de fuel vs. Potencia pico FV (instalaciones FV-diesel, media de 5 años 2003-2007)

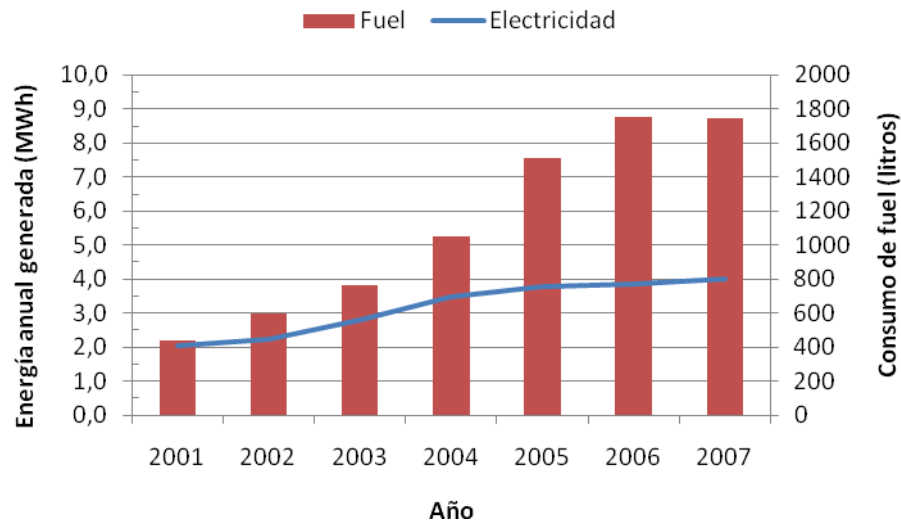


Fig. 9: Consumo de combustible y generación eléctrica total (instalación FV-diesel, Loma Blanca, Jujuy)

Al analizar la evolución anual de una instalación concreta con consumo de combustible elevado se pueden obtener más conclusiones. Por ejemplo, en Fig. 9 se muestra cómo la demanda eléctrica se ha duplicado en 6 años, pasando de 2 a 4MWh/año, mientras que en ese mismo período el gasto en combustible se ha multiplicado por más de 4 veces. Es una prueba de que el sistema fotovoltaico está generando a su máxima capacidad y que necesita ser repotenciado. Así, toda la energía extra requerida es suministrada por el grupo electrógeno. Pero se pueden obtener más conclusiones: si se observa la evolución desde el año 2004 en adelante, el incremento de generación eléctrica es pequeño o nulo, mientras que el aumento del consumo de combustible es considerable. Este hecho es una muestra de degradación del sistema fotovoltaico, con toda seguridad de las baterías, que han perdido capacidad. Variaciones menores pueden deberse a diferencias meteorológicas de un año para otro. A pesar de lo dicho, el sistema todavía consume entre 0.2 y 0.4 litros de fuel por kWh generado, por debajo de los grupos diesel de baja potencia estudiados.

Afortunadamente, la modularidad de los paneles fotovoltaicos permite incrementar la potencia instalada usando el equipamiento ya existente, si bien las baterías en mal estado deberán ser cambiadas por otras nuevas. Debe advertirse que las conexiones serie de paneles solares deben hacerse con equipos del mismo modelo, para reducir al mínimo las pérdidas por desajuste. También las baterías conectadas en serie deben ser del mismo modelo y edad, no pudiéndose asociar unidades nuevas y viejas.

4. CONCLUSIONES

La electrificación rural sin conexión a red es un campo extenso y difuso, en el que conviven diferentes tecnologías, recursos energéticos, aplicaciones y condiciones locales. En muchos casos se dan circunstancias que pueden dar una idea de las dificultades que aparecen al trabajar en este entorno: población dispersa, baja demanda eléctrica, ingresos económicos medios-bajos y comunicaciones deficientes.

Durante las últimas décadas se han implementado en el mundo rural un gran número de planes de electrificación, promovidos por el sector privado o, en la mayor parte de los casos por el sector público, ya sea nacional o internacional. Las condiciones anteriores muestran la difícil viabilidad económica de este tipo de acciones, que deben contemplarse en una gran medida en sus valores de desarrollo social y económico futuro.

Una vez que las instalaciones se han realizado, de una forma o de otra, y el suministro eléctrico llega a una población, no es habitual realizar labores de seguimiento de su operación. Son actividades que habitualmente no se financian, si bien su utilidad para el buen funcionamiento de los sistemas y como aprendizaje para instalaciones futuras es elevado.

Existe escasa información en la literatura sobre la evolución de sistemas colectivos instalados en comunidades rurales. Este trabajo ha pretendido cubrir parte de ese vacío revisando la operación de tres tipos de sistemas autónomos instalados en la provincia de Jujuy, Argentina: generadores diesel, híbridos hidro-diesel híbridos FV-diesel.

Una primera conclusión del estudio está relacionada con el consumo de energía y de potencia en las comunidades. La sensibilidad del suministro eléctrico y del consumo de combustible con la demanda es mucho mayor que en instalaciones conectadas a red. Sin embargo, rara vez se financian actividades de estudio de los consumos de energía en el entorno rural.

El consumo de combustible normalizado a la generación eléctrica (litros por kWh) en los grupos electrógenos depende de forma clara de la potencia del equipo y de su régimen de operación. Se ha registrado valores alrededor de 0.35l/kwh en sistemas de 570kVA, acordes con los valores de referencia habitual. Sin embargo, en generadores de potencia inferior, trabajando en ocasiones a baja carga, pueden incrementar su consumo desde 0.5 hasta 0.9 litros por

kwh. Cualquier estudio teórico de optimización o comparación entre tecnologías debe considerar que en el terreno coexisten generadores de muy diversa potencia y sometidos a regímenes operativos diversos, con edades diferentes y un mantenimiento más o menos adecuado.

El uso de tecnologías basadas en recursos renovables se ha extendido por el mundo para la electrificación de zonas remotas, entre otras aplicaciones. Algunas de estas tecnologías se utilizan en paralelo con la generación diesel, que actúa como apoyo, formando los llamados sistemas híbridos. La reducción del consume es significativa en la mayor parte de los sistemas analizados: hidro-diesel y FV-diesel, especialmente en el primero.

El ratio entre contribución renovable y diesel es variable, dependiendo de muchos factores, algunos en parte impredecibles, como la disposición del recurso renovable y otros detectables, como el aumento de demanda o las condiciones técnicas de los equipos. La toma de datos operativos de demanda eléctrica y de consumo de combustible y su posterior análisis permite conocer más en profundidad las ventajas y problemas de estas tecnologías en el entorno real de aplicación. Como propuesta de mejora futura, resulta recomendable disponer de medidores independientes para conocer con exactitud la contribución de cada tipo de generador eléctrico.

Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de la Acción 708AC0357: Electrificación con Fuentes renovables a Gran Escala para la Población Rural latinoamericana (ELECSOLRURAL, 2008-2011), financiada por CYTED (Ciencia y tecnología para el desarrollo)

REFERENCIAS

Bhattacharyya SC, 2006. Energy access problem of the poor in India: Is rural electrification a remedy?, *Energy Policy*, 34, pp 3387-3397.

Camblong C, Sarr J, Niang AT, Curea O, Alzola JA, Sylla EH y Santos M, 2009. Micro-grids project part 1: analysis of rural electrification with high content of renewable energy sources in Senegal, *Renewable Energy*, 34, pp 2141-2150.

Dufo-López R y Bernal-Agustin JL, 2005. Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms, *Solar Energy*, 79, pp 33-46.

Kolhe M, Kolhe S y Joshi JC, 2002. Economic viability of stand-alone solar photovoltaic system in comparison with diesel-powered system in India, *Energy Economics*, 24, pp 155-165.

Leoni-Schmid A y Amaral-Hoffmann CA, 2004. Replacing Diesel by Solar in The Amazon: short-term Economic Feasibility of PV-diesel Hybrid Systems, *Energy Policy*, 32, pp 881-898.

Lorenzo E, 1997. Photovoltaic rural electrification, *Progress in Photovoltaics*, 5, pp 3-27.

Madubansi M y Shackleton CM, 2006. Changing energy profiles and consumption patterns following electrification in five rural villages, South Africa, *Energy Policy*, 34, pp 4081-4092.

Muñoz J, Narvarte L y Lorenzo E, 2007. Experience with PV-Diesel Hybrid Village Power Systems in Southern Morocco, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15, pp 529-539.

Muselli M, Notton G y Louche A, 1999. Design of Hybrid-photovoltaic Power Generator, with Optimization of Energy Management, *Solar Energy*, 65, pp 143-157.

Nguyen KQ, 2007. Alternatives to grid extension for rural electrification: decentralized renewable energy technologies in Vietnam, *Energy Policy*, 35, pp 2579-2589.

Phuangpornpitak N y Kumar S, 2007. PV hybrid systems for rural electrification in Thailand, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp 1530-1543.

Rehman S, El-Amin IM, Ahmad F, Shaahid SM, Al-Shehri AM, Bakhshwain JM y Shash A, 2007. Feasibility study of hybrid retrofits to an isolated off-grid diesel power plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp 635-653.

Reiche K, Covarrubias A y Martinot E, 2000. Expanding electricity access to remote areas: off-grid rural electrification in developing countries, *World Power*.

Reiche K, Tenenbaum B y Torres de Mästle C, 2006. Electrification and regulation; principles and a Model Law, *Energy and Mining sector Board Discussion Paper n° 18*, The World Bank.

Wakao S y Nakao K, 2006. Reduction of Fuel Consumption in PV / Diesel Hybrid Power Generation System by Dynamic Programming Combined With Genetic Algorithm, IEEE, pp 2335-2338.

FIELD STUDY ON DIESEL/RENEWABLE HYBRID GENERATION FOR RURAL ELECTRIFICATION

Abstract. *This work studies the field operation of three off-grid generation technologies for the electrification of rural villages. Diesel generators are the most extended technology. It is a simple and well-known technology, although it has some disadvantages: fuel transportation and consumption costs, maintenance needs or environmental problems. The use of local energy resources (basically renewable) constitutes a interesting option. Due to the intermittent character of those resources, renewable generation systems are sometimes associated to diesel gen-sets in order to increase the reliability of supply of small and medium size communities. A comparative analysis between diesel, hydro-diesel and photovoltaic-diesel technologies is presented concerning fuel consumption rates. The energy demand evolution of rural villages is also studied because of its influence on the system operation and sustainability. It is based on data collected from systems installed in the rural area of the province of Jujuy, northwest of Argentina. The study covers from year 2001 to 2008, with a research universe of 16 locations supplied by thermal diesel generation (1 with a large diesel system and other 15 with smaller ones), 5 locations with hydro-diesel and 7 with photovoltaic-diesel systems.*

Keywords: *Renewable energy, hybrid generation, rural electrification, off-grid*