

Planificación integrada de electrificación mediante SIG



José Luis Parrondo Pons

Ingeniero Industrial del ICAI (Promoción 2012). Voluntario de la Fundación de Ingenieros del ICAI para el Desarrollo. Beca de Excelencia de la Comunidad de Madrid en el curso 2011/2012. Estudiante de intercambio en la University of Alberta (Edmonton, Canada) en el curso 2010/2011.



Julio Eisman Valdés

Ingeniero Industrial por la UP Comillas-ICAI (1973). PDG del IESE (Universidad de Navarra, 1998). Actualmente, director gerente de la Fundación Acciona Microenergía y Vicepresidente de Acciona Microenergía Perú y Acciona Microenergía México. Vocal del Comité de Ingeniería y Desarrollo Sostenible del Instituto de la Ingeniería de España.



Luis Díez Maroto

Ingeniero Industrial del ICAI (Promoción 2008). Investigador en Formación en el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) (2010-presente). Voluntario de la Fundación de Ingenieros del ICAI para el Desarrollo. Ingeniero en Alstom Suiza (2008-10). Becario en Elytt Energy S.L. (2007-08). Beca de Excelencia de la Comunidad de Madrid (2003-2006).

Palabras clave: Electrificación rural integrada, Comunidades Rurales Aisladas (CRA), Sistema de Información Geográfica (SIG), IntiGIS, ArcGIS, Coste de Electrificación Equivalente (LEC), Santo Tomé, renovables, cooperación.

Resumen

La Fundación Acciona Microenergía, comprometida con el objetivo de lograr el acceso universal a la energía para el año 2030, ha identificado la necesidad de disponer y poder ofrecer metodologías de planificación integrada de electrificación rural basadas en la consideración de las diferentes tecnologías existentes actualmente, tanto extensión de redes como híbridas y renovables. IntiGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) que busca servir como herramienta útil en la toma de decisiones en los proyectos de electrificación rural y generación descentralizada de electricidad con energías renovables. Su funcionalidad se basa en el cálculo del Coste de Electrificación Equivalente (LEC) por unidad de superficie para distintas tecnologías. A partir de dicho cálculo, la aplicación posibilita efectuar tanto comparativas sobre el terreno entre las tecnologías en función del LEC local, como análisis de sensibilidad centrados en las variables consideradas más significativas. Este proyecto busca evaluar el potencial de IntiGIS, analizando sus ventajas e inconvenientes y proponiendo las mejoras que se juzguen convenientes o deseables. Para ello se toma como región objeto de estudio la isla de Santo Tomé, para la que se pretende realizar una propuesta razonada de acceso universal a la electricidad.

Key words: *Integrated rural electrification, Isolated Rural Communities, Geographic Information System (GIS), IntiGIS, ArcGIS, Levelized Energy Cost (LEC), São Tomé, renewables, cooperation.*

Abstract:

Acciona Microenergía Foundations, committed to the goal of achieving universal access to energy by 2030, has identified the need to supply integrated planning methodologies for rural electrification based on the consideration of several existing technologies, these being grid extension, hybrid and renewable. IntiGIS is a Geographic Information System (GIS) which seeks to serve as a useful decision-making tool on rural electrification and decentralized electricity generation projects with renewable energies. Its functionality is based on the Levelized Electricity Cost (LEC), per unit area, calculation for several technologies. With this calculation, the application allows field comparisons between the technologies based on the local LEC, as well as sensitivity analysis focused on the parameters that are considered the most significant. This project seeks to evaluate IntiGIS's potential, analyzing its advantages and disadvantages and suggesting the improvements as are deemed advisable or desirable. With this purpose in mind, São Tomé Island has been taken as the region where the study will take place, with the intent to set up a reasoned proposal for the universal access to electricity".

Introducción

La electricidad es un vector energético sumamente versátil y, por ello, goza de un uso considerablemente extendido. Su potencial se basa tanto en el volumen de demanda que actualmente es capaz de atender, como en el modo en que dicha demanda es atendida, como también en la proyección futura de ese potencial la energía eléctrica procedente de fuentes de energía renovables es contemplada como una alternativa real a los combustibles fósiles. Para llevar esto a cabo, es primordial conseguir incrementar la producción de electricidad a partir de fuentes de energía renovables.

El acceso universal a la energía es un derecho humano de especial importancia, al ser indispensable para garantizar otros muchos derechos, así como para elevar la calidad de vida de la población en general. En el año 2009 se estimó que alrededor de 1.300 millones de personas en el mundo carecían de acceso a la electricidad. De ese conjunto, aproximadamente 1.090 millones vivían en áreas rurales y más de un 95% lo hacía en países subsaharianos y en naciones asiáticas en vías de desarrollo. El rango de consumo eléctrico anual per cápita en Norteamérica —de 8.900 a 10.900 kWh/habitante/año— contrasta con el de muchos países de África, Hispanoamérica o Asia —de 500 a 2.600 kWh/habitante/año—.

Ya sea para uso puramente doméstico o también productivo, la electrificación de aquellas zonas rurales y periurbanas que tradicionalmente han carecido de

suministro contribuye muy significativamente a reducir en ellas la pobreza, mejorar las condiciones sanitarias y promover el crecimiento económico a través del auge de la competitividad y la productividad. La electrificación rural genera expectativas de progreso que, junto con otros factores, conforman el motor de desarrollo de estas zonas. De acuerdo con los estudios de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), para hacer del acceso universal a la electricidad una realidad en 2030, se precisa incrementar la inversión anual mundial desde los 9.100 millones de dólares de 2009 hasta los 48.000 millones (aproximadamente un 3,32% del PIB español en 2010).

Electrificación rural: problemática y opciones

Electrificar el medio rural conlleva proveer de suministro eléctrico a todas las comunidades de este medio independientemente de la tecnología, las fuentes de energía y la forma de generación empleadas. La electrificación rural se caracteriza principalmente por una baja densidad de carga local (de 2 a 50 kW/km²), una baja densidad de consumidores (de 1 a 75 conexiones/km²), un bajo número de consumidores por kilómetro de línea de media y baja tensión (de 1 a 75) y una baja densidad de consumo (de 5.000 a 200.000 kWh/km²).

Por otro lado, el consumo eléctrico mínimo en el medio rural es un 50% inferior al urbano (AIE 2011). La siguiente curva de carga —correspondiente a un proyecto de suministro ru-

ral en Perú—, da idea de la magnitud de la demanda eléctrica en un hogar rural. La máxima demanda de potencia registrada en este caso fue de aproximadamente 450 W y el factor de forma o ratio entre potencias media y máxima demandadas de 0,32.

Dentro del ámbito rural destacan las Comunidades Rurales Aisladas (CRAs). En sentido amplio, una CRA es un enclave humano escasamente poblado, de difícil acceso, carente de conexión a una macro-infraestructura energética (red eléctrica nacional, tubería de gas, etc.) y en el que no se dispone de los servicios básicos de energía, agua, saneamiento, telecomunicaciones, salud, transporte, educación y cultura. La electrificación de CRAs es objeto de diversos proyectos de cooperación y desarrollo, y requiere un nivel de compromiso alto y constante de sus poblaciones. Para lograrlo, conviene aprovechar las estructuras organizativas autóctonas, que han demostrado una alta eficiencia al conseguir asegurar la supervivencia de las comunidades a lo largo del tiempo en condiciones adversas.

Actualmente existen tres formas de llevar la electricidad a los hogares de las CRA: la extensión de red, las micro-redes o redes aisladas y los sistemas domiciliarios. La conexión directa a red o método tradicional es, a partir de un umbral mínimo de densidad de carga, el sistema de electrificación más efectivo en términos de usuarios conectados por euro invertido. Por debajo de dicho umbral, se enfrenta a altos costes

Figura 1. Curva de carga típica de comunidades rurales aisladas. Fuente: AMP





por conexión (€/km) y energía suministrada (€/kWh), así como a un riesgo considerable de empeoramiento del servicio debido a la ausencia de un mantenimiento apropiado. Las micro-redes consisten básicamente en una central de generación –comúnmente híbrida– y una red de distribución en baja tensión a cada casa. Por su parte, los sistemas domiciliarios constituyen la alternativa idónea para la alimentación de cargas reducidas (típicamente de entre 100 y 200 W) y dispersas, que requieren emplazar los generadores próximos a las casas. Estos sistemas suelen servir para alimentar dispositivos básicos (radios, iluminación, cargadores de móvil, etc.) durante aproximadamente cuatro horas al día.

La planificación integrada de electrificación evalúa los tres métodos anteriores en una región determinada, atendiendo principalmente, para cada comunidad, a su densidad de carga (determinante del coste del kWh) y a su distancia a la red de media tensión (condicionante de los costes de conexión, operación y mantenimiento). Una planificación exitosa dejará sin suministro eléctrico al menor número de usuarios, y conducirá a un incremento gradual de la demanda, hasta alcanzar un nivel a partir del cual la extensión de red sea económicamente viable.

Las energías renovables desempeñan un papel importantísimo dentro de la planificación integrada de electrificación, al ser un recurso descentralizado (idóneo para zonas remotas energéticamente aisladas), distribuido mucho más homogéneamente que los combustibles fósiles y muy generosamente presente en multitud de países en vías de desarrollo. Según previsiones de la AIE, la generación eléctrica procedente

de energías renovables no hidráulicas se incrementará desde un 3% en 2009 hasta un 15% en 2035.

Santo Tomé

La isla de Santo Tomé forma parte de la República Democrática de Santo Tomé y Príncipe, una nación archipiélago estratégicamente situada en el golfo de Guinea, que alcanzó su independencia de Portugal en 1975 y en la que hay instaurado un régimen democrático desde 1990. Se trata de un pequeño y aislado territorio insular de aproximadamente 860 km², en el que un gran porcentaje de sus más de 145.000 pobladores están diseminados por el terreno en multitud de CRAs. Aproximadamente un 40% de los santotomenses carece de acceso a la electricidad y un 54% vive bajo el umbral de la pobreza.

Al igual que sucede con otras islas-estado de reducido tamaño, Santo Tomé está expuesta a una fortísima dependencia energética del exterior: El coste de importar petróleo constituye un pesado fardo para la economía nacional, ya de por sí lastrada debido a su fuerte deuda externa. Otros factores se vienen a sumar a esta situación crítica, como la reducida dimensión de la demanda eléctrica local o los altos costes en infraestructuras y distribución de la electricidad. El sistema eléctrico de Santo Tomé, actualmente inmerso en un importante y necesario proceso de transformación, se ha caracterizado hasta la fecha por su alto grado de ineficiencia –principalmente debido a una opaca e inadecuada gestión del sector por parte del poder público–, un elevado déficit en términos de generación, transmisión y distribución de la electricidad, una baja eficiencia técnica y operacional, un régimen tarifario incapaz de cubrir costes y un grave deterioro de la situación comercial y financiera de la empresa eléctrica pública nacional (EMAE).

Al mismo tiempo, Santo Tomé presenta un respetable potencial en recursos renovables. El relieve isleño ocasiona saltos de agua suficientemente grandes como para proveer al país con buenos recursos hídricos (que, inexplicablemente, han visto decrecer su contribución al mix energético nacional en los últimos años) y el clima tropical de

la zona lleva aparejadas altas tasas de radiación solar. La biomasa y la energía eólica aparecen como fuentes energéticas aún por estudiar.

Metodología

¿Qué es un SIG?

Un SIG es el conjunto integrado por hardware, software, información geográfica y capital humano que permite la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, gestión y presentación de todo tipo de información geográfica. Básicamente se trata de una herramienta basada en un soporte informático capaz de resolver problemas de índole espacial. Los SIG trabajan con representaciones discretizadas y georeferenciadas de realidades geográficas, compuestas por diferentes elementos –puntos, líneas y polígonos en el caso de las representaciones vectoriales y píxeles en los rásteres–. Estas representaciones geográficas están asociadas, elemento a elemento, a datos de muy diversa índole. Los SIG incluyen una variada gama de funciones que permiten manejar con facilidad una gran magnitud de datos, así como inferir nuevos resultados o generar mapas.

¿Por qué tecnología SIG?

La relación entre la metodología SIG y los proyectos de electrificación rural viene dada por la naturaleza geográfica de los mismos. Más aún cuando éstos implican el uso de recursos territorialmente dispersos como son los renovables.

Los SIG han llegado a ser considerados como una de las más poderosas tecnologías de la información existentes gracias a su gran capacidad de integración del conocimiento, amalgamando datos procedentes de múltiples fuentes para crear ámbitos de conocimiento transversales. En un proyecto como éste es clave saber, para cada punto de la superficie de estudio, el número de viviendas y personas por vivienda, el nivel de radiación solar, la velocidad del viento, la distancia al punto más cercano de la red de media tensión, la longitud de línea de baja tensión, etc. Al mismo tiempo y con aplicación en todo el territorio, es también preciso determinar otros parámetros económicos y funcionales asociados a las tecnologías renovables existentes y a sus

componentes. Finalmente, se requiere poder trabajar analíticamente con este heterogéneo conjunto de información. La metodología SIG se adapta perfectamente a esta necesidad, ofreciendo la funcionalidad requerida para operar de manera consistente con la totalidad de los datos recogidos.

IntiGIS

IntiGIS apareció en 2010 como una nueva herramienta de escala local gracias al trabajo desarrollado por el grupo de Tecnologías de la Información Geográfica y Energías Renovables (gTIGER) del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). El programa IntiGIS entronca directamente con el proyecto europeo SOLARGIS, que a mediados de los noventa, hacía ya hincapié en la idoneidad de los SIG para abordar los proyectos de electrificación rural basados en energías renovables.

IntiGIS ha sido desarrollado en una aplicación novedosa escrita en lenguaje VB.NET y ejecutada sobre ArcGIS 9.3 con la extensión Spatial Analyst. Su principal propósito es servir como herramienta útil en la toma de decisiones, dentro del marco de la planificación integrada de electrificación rural, permitiendo comparar entre sí las seis tecnologías anteriormente mencionadas de cara a satisfacer la demanda eléctrica existente o estimada en el área

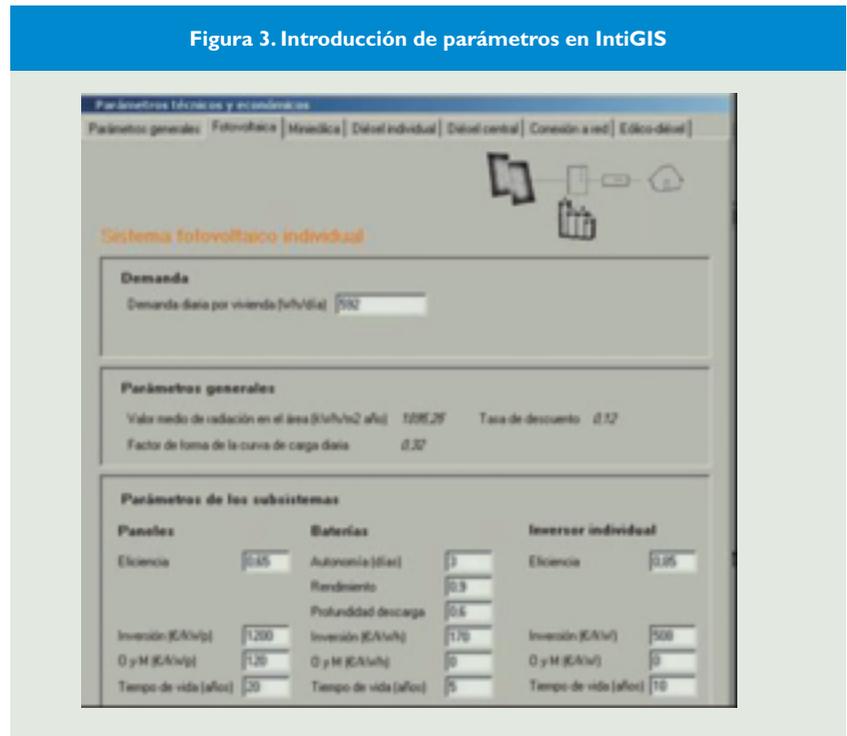


Figura 3. Introducción de parámetros en IntiGIS

de estudio. Biomasa, microhidráulica y minihidráulica quedan al margen. El estudio comparativo se lleva a cabo a través del LEC, un parámetro típico en el análisis de rentabilidad de instalaciones de producción de energía eléctrica. El LEC indica la cuantía de los ingresos necesarios por unidad de energía eléctrica (€/kWh) producida para recuperar el coste total del sistema durante el tiempo de vida de éste. La ventaja de este índice radica en su capacidad

para comparar tecnologías con diferentes tipos de inversión y tiempos de operación.

IntiGIS demanda los siguientes datos de entrada para trabajar:

- Seis mapas de tipo ráster con formato GRID de ESRI debidamente georreferenciados: de densidad de demanda, de recurso solar, de recurso eólico, de distancias a la red de media tensión y de longitudes de líneas de baja tensión. Para la creación de estos mapas ha sido necesario trabajar con ArcGIS.
- Parámetros generales y parámetros específicos de cada tecnología.
- Dato de demanda eléctrica diaria por hogar.

A partir de estas entradas, IntiGIS devuelve una serie de modelos espaciales, indicadores tanto del potencial territorial de cada tecnología considerada, como de las tecnologías más competitivas. Estos modelos espaciales o mapas adjudican gráficamente a cada comunidad rural o centro de demanda la tecnología más ventajosa en cada caso. IntiGIS permite realizar a continuación múltiples análisis de sensibilidad, que buscan indicar el modo en que los parámetros considerados más influyentes sobre la determinación del coste de distribución de potencia por tecnología, afectan a la solución final

Figura 2. Mapas ráster de densidad de demanda y distancias a la red de media tensión (ArcGIS).

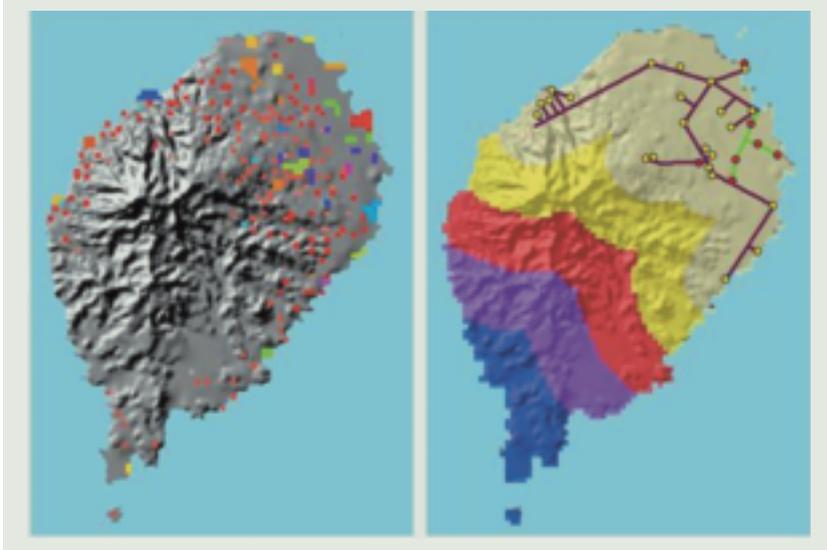


Figura 4. Entorno IntiGIS



obtenida. Los análisis pueden ser uni o multivariantes; en este proyecto todos los análisis realizados son univariantes. Puesto que analizar cada comunidad resulta excesivo desde el punto de vista computacional, IntiGIS utiliza para dichos análisis la comunidad tipo. Ésta resulta de promediar todos los parámetros y valores georreferenciados para una hipotética comunidad modelo cuya representatividad depende de la heterogeneidad del territorio. Cuanto mayor parecido exista entre las distintas comunidades afectadas por la planificación, mayor sentido cobrará el uso de la comunidad tipo. En el caso de Santo Tomé, los resultados obtenidos para esta comunidad tipo no son extrapolables a ninguna otra comunidad real de la isla, dadas las diferencias existentes entre las distintas poblaciones.

Resultados

Se han llevado a cabo análisis de sensibilidad alternativos, en los que se ha estudiado la influencia de cinco parámetros en el LEC de cada tecnología para todo el territorio: la velocidad del viento, la tarifa eléctrica, el precio del diésel, la potencia contratada y la demanda energética por vivienda (ligados estos dos últimos). Para estudiar el impacto de estos parámetros, se han tomado dos valores de cada uno, comparando el resultado obtenido con el del

caso base. Este método de trabajo ha dado lugar a nueve escenarios diferentes, cada uno de los cuales ha sido analizado sobre una muestra de catorce localidades santotomenses convenientemente escogidas. El escenario más interesante, atendiendo a los cambios que comporta, es el de potencia contratada y demanda eléctrica diaria altas (1 kW y 5.920 kWh, respectivamente).

A la luz de los resultados obtenidos, parece claro que la tecnología fotovoltaica individual es la más competitiva para electrificar la mayor parte de las

comunidades rurales de Santo Tomé; tanto más cuanto menor es el número de hogares en una comunidad. Esta tecnología presenta, además, el LEC más estable y con el rango de variación más ajustado para todo el territorio (entre 130,89 y 132,74 €/kWh). Dentro del ámbito rural, le sigue el grupo diésel individual, con un LEC generalmente en torno a los 200 €/kWh.

Si se desplaza el foco de atención hacia el noreste de la isla, donde se hallan muchas de las comunidades más densamente pobladas –por encima de los 300 hogares por comunidad–, aparece la eólica diésel como opción más competitiva. El LEC de esta tecnología es muy sensible a la velocidad del viento, al precio del diésel y a los incrementos de demanda, de tal manera que escenarios de poca ventosidad, de escalada del precio del petróleo o de caídas de la demanda convierten casi automáticamente al grupo diésel central en la opción sustitutoria ideal para los mismos núcleos de población, aún con un LEC entre un 7 y un 12% superior; aproximadamente.

Finalmente, la eólica individual y la conexión a red son los dos grandes descartes. El coste de la primera es demasiado alto, incluso con vientos de 8 m/s (por otra parte improbables en la mayor parte del territorio). La extensión de red es viable únicamente para comunidades situadas a menos de 1 km de la red

Figura 5. Tecnologías de electrificación más competitivas. De izquierda a derecha: escenario base y escenario de potencia contratada y demanda eléctrica diaria altas

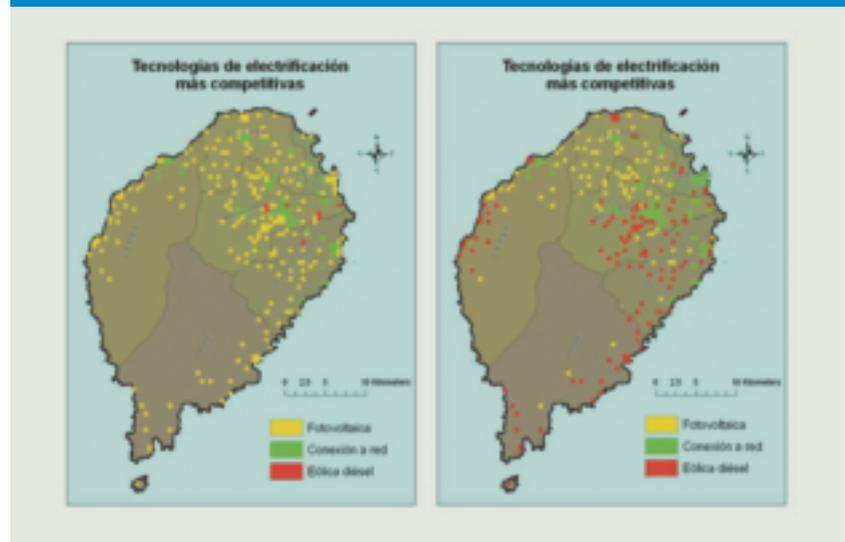


Tabla 1. Propuesta de electrificación universal en Santo Tomé

	Electrificación		
	Hogares	Personas	%
Fotovoltaica individual	17.692	70.768	51,91
Conexión a red	13.498	53.992	39,61
Eólica diésel	2.891	11.564	8,48
		136.324	100,00

nacional de media tensión; para el resto del país es impensable con el actual nivel de demanda eléctrica en los hogares. Se precisa incrementar esta demanda entre 5 y 10 veces para poder avanzar por este camino.

Con todo, la propuesta de acceso universal a la electricidad para Santo Tomé quedaría descrita en líneas muy generales (Ver Tabla 1).

Buscando alcanzar un grado de compromiso aceptable con la realidad de Santo Tomé y a partir de las conclusiones obtenidas, se ha querido estimar la inversión necesaria para llevar electricidad a los casi 17.700 hogares santotomenses –situados en comunidades para las que la tecnología fotovoltaica ha resultado ser la más competitiva–, a través de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliarios (SFD). Tomando como punto de partida datos procedentes del proyecto “Luz en Casa” de Acciona Microenergía en Perú e introduciendo las pertinentes modificaciones correspondientes a las circunstancias concretas de Santo Tomé, se ha calculado un coste de, aproximadamente, 12,5 millones de euros para el proyecto. Esta cantidad, sin embargo, podría ser inferior atendiendo a la reducción de los precios de los paneles solares en los últimos años y dependerá en última instancia de la potencia que se desee instalar. De esta manera, la totalidad de los hogares indicados contarían tan solo con 3 luminarias de bajo consumo de 11 W cada una, suficientes no obstante para introducir una sensible mejora en las condiciones de vida de los usuarios beneficiados.

La principal componente del monto final, (Ver Tabla 2), es la correspondiente al coste de los equipos principales:

Tabla 2. Coste de inversión de un SFD en Santo Tomé

Concepto	Cantidad (€)
Trabajos previos	16,39
Materiales y accesorios	131,15
Equipos principales	459,00
Instalación	32,79
Total	639,33

Dejando aparte las luminarias, cada SFD cuenta con:

- un panel fotovoltaico de 175 W con un coste de inversión de 1200 €/kW, eficiencia del 65% y 20 años de vida.
- una batería de 12 V, capacidad de 100 Ah, prevista para una profundidad de descarga del 60% y autonomía de 3 días.

Conclusiones

La tecnología fotovoltaica domiciliaria es probablemente la opción más rentable para la electrificación rural en Santo Tomé. Únicamente un aumento significativo de la potencia contratada y la demanda eléctrica diaria en los hogares podría alterar este hecho. Los restantes parámetros analizados –la ventosidad, la tarifa eléctrica y el precio del combustible– desafían el dominio de la fotovoltaica en contados casos puntuales, sin que su impacto deba por ello ser tomado en demasiada consideración. Ante un efectivo incremento futuro del volumen de demanda eléctrica en la isla, el grupo eólico diésel aparece como mejor opción en ciertas zonas. Con una inversión ligeramente superior al 5% del PIB nacional, se conseguiría dotar de suministro eléctrico básico a la totalidad de la población santotomense a partir de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliarios (SFD).

En lo que respecta a la evaluación de IntiGIS, se ha comprobado el gran

potencial de esta aplicación como herramienta de planificación energética a escala local. No obstante, ello no impide que se hayan detectado una serie de posibles mejoras, entre las que destacan las relativas al dimensionamiento de las tecnologías que la aplicación lleva a cabo, al tipo de soporte comercial empleado (licencia libre frente a sistema propietario), a la amplitud restringida del campo de alternativas tecnológicas valoradas (no se cuenta con la hidráulica ni con la biomasa) y al tipo de demanda objeto de estudio (exclusivamente residencial, frente a uso industrial y servicios). Algunas de estas mejoras se abordarán en las nuevas versiones de IntiGIS. ■

Bibliografía

PARR12 José Luis Parrondo Pons, “Planificación integrada de electrificación de Comunidades Rurales Aisladas (CRA) mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicada a la isla de Santo Tomé”, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Pontificia Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Madrid, julio 2012.

PINE10 Irene Pinedo Pascua, “IntiGIS: Propuesta metodológica para la evaluación de alternativas de electrificación rural basada en SIG”, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA), Departamento de Ingeniería Rural, Madrid, 2010.

EISM11 Julio Eisman Valdés y otros, capítulo 4 “Suministro de energía” de “Tecnologías para el Desarrollo de las Comunidades Rurales Aisladas”, Real Academia de Ingeniería de España, 2011. Obtenido de <http://www.raing.es/es/publicaciones/libros/tecnolog%C3%AD-para-el-desarrollo-humano-de-las-comunidades-rurales-aisladas>

ARE_11 Alliance for Rural Electrification, “Rural electrification with renewable energy. Technologies, quality standards and business models”, junio 2011.

GILB11 Gilberto M. Jannuzzi, “Estrategias Energéticas para São Tomé e Príncipe, Sugestões e prioridades para incorporar Fontes Renováveis e Eficiência Energética, Relatório Final”, Governo de São Tomé e Príncipe, EUEI Partnership Dialogue Facility, abril 2011.

IEA_11 International Energy Agency, “World Energy Outlook 2011”, 2011.

OFIC11 Oficina Económica y Comercial de España en Malabo, “Sao Tomé y Príncipe (Guía País)”, junio 2011.