
Evaluación de alternativas de la electrificación rural, un análisis de competitividad tecnológica para Chiapas

Evaluation of alternatives for rural electrification; Analysis of technological competitiveness for Chiapas

Recibido el 5 de abril de 2017, aceptado el 9 de junio de 2017

No. de clasificación JEL: O22; Q42; R58

Dorian Francisco

Gómez Hernández

Universidad Politécnica
de Cataluña.

Departamento de

Ingeniería Mecánica

dorian.gomez@unach.mx

Bruno Doménech Lega

Universidad Politécnica
de Cataluña.

Departamento de

Ingeniería Mecánica

bruno.domenech@upc.edu

Laia Ferrer Martí

Universidad Politécnica
de Cataluña.

Departamento de

Ingeniería Mecánica

laia.ferrer@upc.edu

Resumen

En todo el mundo existen cerca de 1.200 millones de personas que no tienen el acceso a la electricidad, principalmente ubicadas en zonas remotas, dispersas y con baja demanda eléctrica. Para mejorar esta situación, se han desarrollado diferentes proyectos de electrificación rural, que tiene como objetivo satisfacer las necesidades de abastecimiento de energía eléctrica en las comunidades que no cuentan con este servicio. En este documento se presenta un análisis regional de competitividad tecnológica para 8 comunidades rurales del Proyecto "RECOMSOL" de Cintalapa, Chiapas, con la ayuda de la herramienta IntiGIS, un Sistema de Información Geográfica (SIG) que utiliza variables técnicas, económicas, geográficas y socio-demográficas, que determinan la mejor tecnología en función del Coste de Electrificación Equivalente (LEC). IntiGIS permite obtener una orientación en la elección de la mejor tecnología para su implementación en la región. Los resultados muestran que la primera opción tecnológica son los sistemas fotovoltaicos para todas las comunidades y como una posible segunda opción la tecnología diésel central. Ambas tecnologías mostraron los costes más bajos del LEC.

Palabras clave: Planificación de la electrificación rural, competitividad tecnológica, IntiGIS.

Abstract

There are about 1.2 billion people around the world who do not have access to electricity. They are mainly located in remote and dispersed areas with low electricity demand. In order to improve this situation, different rural electrification projects have been developed with the objective of meeting the electricity supply needs in communities that do not have this service. This article presents a regional analysis of technological competitiveness for eight rural communities of the Project "Red de Comunidades Solares (RECOMSOL)" of Cintalapa, Chiapas. It was made with the help of the tool IntiGIS, a Geographic Information System (GIS) that uses technical, economic, geographic, and socio-demographic variables that determine the best technology according to the Levelized Energy Cost (LEC). IntiGIS provides a guidance for choosing the best technology to be implemented in the region. The results show that the first technological option is photovoltaic systems for all communities and as a possible second option the central diesel technology. Both technologies showed the lowest costs in the LEC.

Keywords: *Rural electrification planning, technological competitiveness, IntiGIS*

1. Introducción

Actualmente, en todo el mundo, 1.200 millones de personas viven sin acceso a la energía eléctrica; el 85% de las cuales viven en zonas rurales. En consecuencia, en los últimos años se ha hecho necesario implementar planes de electrificación rural con el objetivo de hacer un uso eficiente de los recursos disponibles para abastecer la demanda de energía a mínimo coste, y sin comprometer los recursos que necesitarán las próximas generaciones ni el medio ambiente (Fisher-Vanden, Mansur, & Wang, 2015).

La estrategia más utilizada para el acceso a la electricidad en zonas rurales por parte de los gobiernos, es la extensión de la red eléctrica nacional. Sin embargo, resulta demasiado costosa para las que se encuentran dispersas e inaccesibles (Lee et al., 2016). Por esta situación, se han utilizado los sistemas aislados autónomos, en los que existen diferentes opciones de generación.

La generación de energía eléctrica puede llevarse a cabo mediante tecnologías convencionales, como los generadores diesel, debido a que es una tecnología comprobada, de gran difusión, sencilla y conocida por los usuarios (Mohammad Rozali, Wan Alwi, Ho, Manan, & Klemeš, 2016).

Sin embargo, presenta altas emisiones de CO₂ y dependencia del coste y transporte del combustible, además de los altos costes de operación y mantenimiento (O&M).

Por lo tanto, en los últimos años la generación mediante energías renovables se ha posicionado como una alternativa, principalmente porque aprovechan los recursos locales y disminuyen las dependencias externas, además de presentar fiabilidad a un coste accesible, con un diseño adecuado (Domenech et al. 2014). Las energías más utilizadas, son la solar y la eólica.

La energía solar, empleada mediante sistemas fotovoltaicos individuales, proporcionando alumbrado y electricidad a los centros sanitarios y las escuelas, además de finalidades productivas y domésticas (Xue 2017).

Se han presentado numerosos trabajos como el de Sindhu, Nehra, & Luthra, (2016) donde se evalúan algunos ejemplos de electrificación rural con sistemas fotovoltaicos en India. Sin embargo, presentan limitaciones en zonas con un bajo recurso solar.

Por esta razón, la energía eólica, ha sido utilizada con mayor atención en los últimos años, mediante el uso de mini-aerogeneradores (Hasan et al. 2016). Un ejemplo, es Ferrer-Martí et al., (2012), que analizan 3 proyectos eólicos de electrificación en comunidades aisladas de Perú. Sin embargo, la energía eólica depende directamente del recurso en la zona, lo que en algunos casos limita su aplicación.

Dada la complejidad del diseño, existen herramientas que permiten reducir el tiempo invertido en la elección de la tecnología más adecuada y mejoras en la calidad de la aproximación del diseño de sistemas de generación.

Por ejemplo, este es el caso de las herramientas SURE (Henaó et al. 2012), que incorpora criterios basados en el impacto que cada tecnología tiene sobre los recursos: natural, físico, humano, social y financiero; y HOMER (Hafez & Bhattacharya, 2012), que utiliza características muy concretas para cada comunidad. Aunque este tipo de herramientas son específicas para cada comunidad y no para realizar un estudio de varias regiones.

En consecuencia, en los últimos años se han utilizado los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que permiten obtener una representación visual de la información territorial mediante la generación de mapas para una mejor comprensión del territorio analizado.

Además de que son capaces de gestionar y analizar un gran volumen de datos de forma conjunta, también permiten la posibilidad de evaluar simultáneamente todos los recursos energéticos, determinar las mejores localizaciones para la ubicación de los sistemas energéticos, considerar el conjunto de condiciones geográficas que afectan al rendimiento de los sistemas energéticos, así como extrapolar datos de regiones geográficas contiguas (Calvert, Pearce, & Mabee, 2013).

En este sentido, se han realizado estudios utilizando los SIG en diferentes países, que han permitido evaluar el potencial de las energías renovables. Por ejemplo, Hernández-Escobedo, Rodríguez-García, Saldaña-Flores, Fernández-García, & Manzano-Agugliaro, (2015) evalúan el potencial solar para aplicaciones fotovoltaicas en la Península de Yucatán en México, con la ayuda de los SIG.

Por último, Byrne, Zhou, Shen, & Hughes, (2007) analizan la potencialidad de pequeñas instalaciones basadas en energías renovables en China, comparando y definiendo el sistema por medio los SIG y de una herramienta de simulación basada en el cálculo del Coste de Electrificación Equivalente (LEC), un método que permite la evaluación de la viabilidad económica de los proyectos de sistemas renovables (Lai & McCulloch, 2017).

El LEC es definido mediante la relación que existe entre el coste medio anual de los equipos (€) y la producción de energía anual media prevista (kWh).

Una herramienta más completa basada en SIG, para evaluar y comparar la mejor opción tecnológica en comunidades rurales a escala regional es la plataforma IntiGIS, desarrollada por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), mediante el análisis de alternativas tecnológicas para la electrificación rural, incorporando aspectos sociodemográficos, económicos, cartográficos y técnicos, a través de la realidad territorial de la región objeto de estudio (Pinedo, 2010).

IntiGIS está enfocada a usuarios que trabajen en la electrificación rural en las fases de evaluación previa, para su aplicación en países en desarrollo, especialmente en Latinoamérica.

Los resultados permiten ayudar a los planificadores de electrificación rural en la elección de la tecnología más adecuada, en un universo de localidades rurales, considerando el mejor LEC (Obi, Jensen, Ferris, & Bass, 2017).

Un ejemplo de su aplicación se encuentra en el estudio realizado por Corral, Domínguez, & Serrano, (2013) donde se presenta una propuesta de electrificación para las localidades rurales del Noroeste de México, concluyendo que para el 83% de las comunidades es más conveniente utilizar sistemas fotovoltaicos, el 13% de sistemas mini-eólicos y un 4% la extensión de la red eléctrica.

En este documento, se expone un análisis de competitividad de diferentes tecnologías de electrificación rural con el propósito de presentar una propuesta como evaluación previa de electrificación rural para comunidades rurales de Cintalapa, que se encuentra ubicado al suroeste de Chiapas. Chiapas tiene una población de 4.796.580 habitantes, de los cuales el 51% vive en localidades rurales, y tiene el menor Índice de Desarrollo Humano del país (0.667).

En Chiapas existen alrededor de 6,000 comunidades sin electricidad (INEGI 2010). Así, en los últimos años se han llevado a cabo proyectos de electrificación rural que permiten abastecer de energía eléctrica a las comunidades más desfavorecidas.

Desde el año 2013, dio inicio un proyecto de electrificación rural con energías renovables, impulsado por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), denominado “Red de Comunidades Solares” (RECOMSOL), donde se pretende electrificar a ocho comunidades rurales de Cintalapa, mediante energías renovables, cubriendo un total de 553 beneficiarios repartidos en 109 viviendas.

El objetivo de este documento, es obtener un escenario tecnológico óptimo que permita la elección de la tecnología más adecuada (solar, eólica, diésel, híbrida eólica-diesel y extensión de la red eléctrica nacional) para cada una de las localidades, con ayuda de la herramienta IntiGIS.

El desarrollo de este trabajo está estructurado como sigue. En el segundo capítulo, se describe la metodología de esta investigación, indicando la herramienta de planificación que se propone utilizar. En el tercer capítulo, se presenta el caso de estudio (Cintalapa), para el que se describen los principales datos socioeconómicos, energéticos y tecnológicos.

En el cuarto capítulo, se describe la aplicación de la herramienta de planificación al caso de estudio y, posteriormente, se presentan y analizan los resultados obtenidos. Para acabar, se presentan las conclusiones, los agradecimientos y las referencias consultadas para la realización de este artículo.

2. Metodología

Para el desarrollo del siguiente trabajo se ha utilizado la herramienta IntiGIS, un potente SIG que evalúa opciones de electrificación (convencional y renovable) en un territorio y considera la mejor opción en función de una serie de parámetros técnicos, económicos y geográficos.

La herramienta, tiene como objetivo comparar 6 tecnologías de electrificación, evaluando las tecnologías seleccionadas y comparando los resultados de la evaluación para seleccionar la tecnología más competitiva, con base en el LEC.

Entre los seis sistemas posibles, dos son renovables (fotovoltaica, eólica), uno híbrido (eólico-diésel) y tres convencionales (diésel individual, diésel central, y conexión a red).

IntiGIS crea un modelo para cada uno de los sistemas analizados, lo que permite evaluar su competitividad y crear un escenario de electrificación más adecuado, considerando el desempeño, los costos de las instalaciones, la

demanda de electricidad y las características sociodemográficas de las localidades rurales a quienes va dirigido el estudio. IntiGIS, procesa la información con datos cartográficos en formato ráster (GRID)¹, mediante coordenadas y datos numéricos desde una base de datos y las evalúa mediante el LEC (cts €/kWh), definido como la relación que existe entre el coste medio anual de los equipos (€) y la producción de energía anual media prevista (kWh).

El LEC permite la evaluación del coste del sistema energético a implementar, incluyendo todos los gastos a lo largo de su vida útil (inversión, O&M y combustible).

En general, el LEC es la cantidad de ingresos por unidad de energía eléctrica producida que se necesitan para amortizar el coste del sistema durante su tiempo de vida.

IntiGIS requiere de seis datos de entrada de tipo ráster georreferenciados: área de estudio, densidad de demanda, recurso solar, recurso eólico, distancias a la red de media tensión (MT) y la longitud media de las líneas de baja tensión (BT), que se explicarán más adelante.

Además, se ingresan parámetros generales y específicos de cada tecnología. Posteriormente, se realiza el dimensionado con base al cálculo del factor de capacidad² de cada tecnología.

El factor de capacidad es uno de los coeficientes fundamentales usados por IntiGIS para caracterizar cada una de las tecnologías. Por lo tanto, el factor de capacidad se calcula para cada sistema tecnológico teniendo en cuenta la estimación anual de consumo.

Para realizar la valoración económica, es necesario establecer un parámetro, que refleje y sintetice los costes asociados a lo largo de la vida de las distintas tecnologías, en función de la cual se pueda realizar una comparación, ya que resulta difícil comparar de forma imparcial los sistemas renovables con sistemas que utilizan el diésel.

Éstos últimos con un bajo coste inicial, requieren de la compra constante de combustible y de un alto coste de mantenimiento, mientras que los sistemas fotovoltaicos son significativamente más caros, mientras que no utilizan combustibles y se caracterizan por bajos costes de mantenimiento (Kolhe, Kolhe, & Joshi, 2002).

¹ Un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

² El factor de capacidad es un indicador numérico adimensional que define la relación entre la energía producida en un periodo de tiempo determinado y la energía que se hubiese producido en ese mismo periodo si se hubiese trabajado a pleno rendimiento (Nieves, 2011).

Por lo tanto, para realizar la comparación entre las tecnologías analizadas, se calculan con el LEC y la evaluación se efectúa tomando en cuenta tres componentes dependientes de la información geográfica: los costes asociados a la tecnología (instalación y O&M), el recurso energético disponible (eólico, solar, tarifa eléctrica específica para la conexión a red y precio del combustible específico para los generadores diésel) y la demanda (Pinedo, 2010).

El LEC se calcula sumando los LEC de cada uno de los elementos que componen cada una de las tecnologías, por ejemplo: para todas las tecnologías sumando los costes de generación, acumulación y acondicionamiento de potencia (inversor); además para el generador diésel individual, considerando la reconstrucción del motor diésel en cada cinco años y se estima con un 25% del valor de la inversión del generador, además del coste de combustible; el generador diésel central, tomando en cuenta un rectificador a la salida de cada generador eléctrico, el cual convierte la corriente alterna generada, en corriente continua para cargar las baterías, por lo tanto la inversión del rectificador se toma como el 50% del valor del coste del inversor central, también se toma en cuenta la reconstrucción del motor diésel cada 10 años y se estima con un 25% del valor de la inversión del generador diésel central y además añade los costes de la instalación de la red de BT y los costes de acometida; el sistema eólico-diésel, sumando los costes de generación, resultado de la suma del coste del grupo diésel (que incluye los costes de reconstrucción) y de la turbina eólica (que incluye los costes del sistema de control); y la conexión a red, considerando el coste de la línea de MT, el coste del centro de transformación, el coste de la línea de BT, el coste de acometida y la tarifa eléctrica.

Cabe señalar que cada uno de los elementos de las tecnologías tiene en cuenta el factor de actualización. El factor de actualización es el parámetro empleado para definir el valor actual de los costes, ya que permite definir económicamente diferentes escenarios, facilitando la comparación de proyectos que requieren grandes inversiones iniciales con proyectos de elevado coste de producción (Amador, 2000).

Los resultados del cálculo de IntiGIS proyectan una posible comunidad tipo que representa los valores medios de todos los parámetros y valores georrefrenciados 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.

Una vez, descrito el principal cálculo que realiza la herramienta, a continuación, se presenta el caso de estudio, para después detallar todo el proceso del análisis realizado.

3. Caso de estudio: Cintalapa de Figueroa, Chiapas

El Estado de Chiapas cuenta con más de 40.000 viviendas sin electrificar, repartidas en más de 6.000 localidades en 115 de los 122 municipios que lo conforman, en su mayoría localidades rurales, según el INEGI (2015). Uno de los Municipios en los que se han llevado a cabo proyectos de electrificación rural en los últimos años, es el municipio de Cintalapa, ubicado al suroeste de Chiapas, que cuenta con 573 viviendas sin electrificar, repartidas en 89 localidades (INEGI).

En el 2013 da inicio el plan RECOMSOL, impulsado por la UNICACH, con el objetivo de electrificar ocho localidades rurales de Cintalapa, mediante el aprovechamiento de los recursos energéticos locales, incluyendo la electrificación de viviendas, el bombeo de agua y el alumbrado público.

El plan surge de las diversas peticiones de los habitantes de la comunidad para extender la red eléctrica en la región, pero debido a los altos costes del interconectado para las localidades más alejadas de la línea de MT, el Gobierno regional ha pedido la intervención de la UNICACH para el desarrollo de proyectos autónomos.

El plan cubre un total de 553 beneficiarios repartidos en 109 viviendas, con una demanda media por vivienda de 750 Wh/día, como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1: Descripción de comunidades

Comunidades	Viviendas	Habitantes	Bodegas	Escuelas	Centros	Iglesias	Demanda (Wh/día)
El Progreso	18	82	1	1	1	1	15.750
El Tuzal	13	49	1	1	1	1	9.750
La Magdalena	5	17	1	0	0	0	3.750
La Mora	2	10	0	0	0	0	1.500
Mariano Pérez	16	162	0	2	1	2	12.000
Nueva Esperanza	14	82	0	2	1	1	10.500
Nuevo Amanecer Tenejapa	21	81	1	3	1	0	13.500
Villa del Río	20	70	1	1	1	2	15.000

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2015)

Una vez descrita la distribución de las comunidades, a continuación, se muestran los datos de entrada de la herramienta IntiGIS, que permitirán realizar el análisis.

Datos de entrada de la herramienta IntiGIS

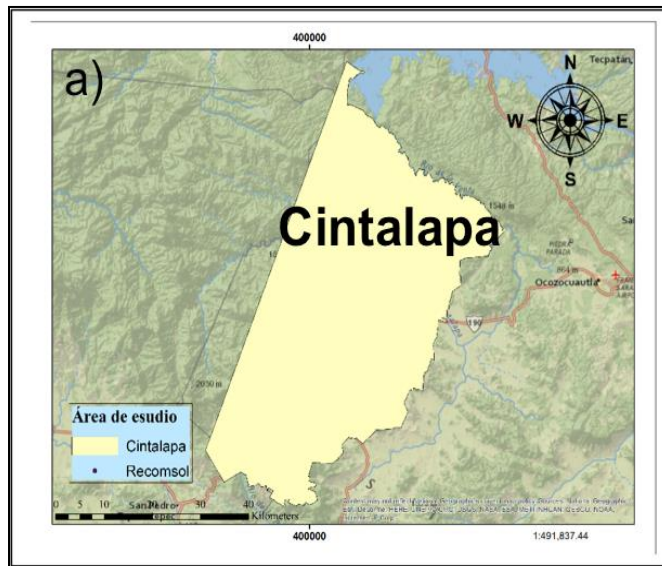
IntiGIS, requiere de seis datos de entrada en formato ráster (GRID) (mediante el *software* ARCGIS), que contienen la información estadística georeferenciada de las ocho localidades rurales del proyecto RECOMSOL.

El primer dato, es el área de estudio (Cintalapa), que define los límites de la zona geográfica del análisis (Ilustración 1).

A continuación, ingresan los datos de la densidad de demanda, con el que se logra identificar a cada localidad mediante un punto georeferenciado, definido por un píxel de 250 m² y el número de viviendas por píxel.

Los siguientes datos son los del recurso solar, los cuales permiten evaluar los sistemas fotovoltaicos, con el que se obtienen los valores anuales entre 1412,6 y 1857,9 (kWh/m²·año) según el proyecto SWERA³.

Ilustración 1: Mapa del área de estudio



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI

Los siguientes datos a ingresar son los del recurso eólico; con los que se detallan los valores de la velocidad del viento para todo el municipio con la ayuda de la herramienta WASP, que calcula el potencial eólico en el peor mes del año, situándola entre 4,7 a 6,7 m/s (Ilustración 2).

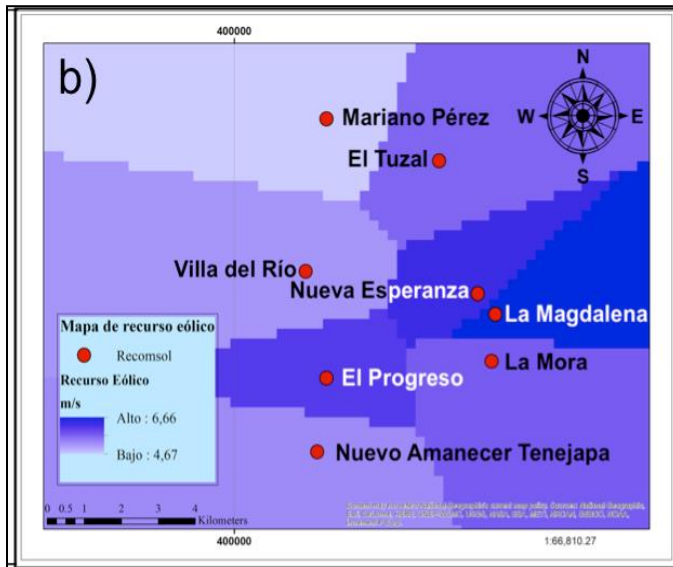
Los siguientes datos a ingresar son los que representan a la distancia a la red de MT, con el que se evalúa la conexión a red.

³ Solar and Wind Energy Resource Assessment. <http://swera.unep.net/>

Cada píxel tiene como atributo la distancia existente hasta el píxel más cercano perteneciente a la línea de MT (m). Por último, son los datos que representan la longitud de líneas de BT, con el que se evalúan los sistemas centrales de electrificación.

Cada píxel tiene como atributo la longitud media de líneas de BT (m) necesaria para conectar todas las viviendas existentes a un centro de transformación que teóricamente se ubicaría en el centro del píxel (Pinedo, 2010).

Ilustración 2: Mapa del recurso eólico



Fuente: Elaboración propia con datos de SWERA

Descritos los datos de entrada, a continuación, se describen los parámetros generales que IntiGIS requiere para realizar el cálculo LEC de todas las tecnologías analizadas.

Otros parámetros de entrada

Los parámetros de entrada permiten comenzar con los cálculos de IntiGIS y se dividen en generales, económicos y tecnológicos. Los parámetros generales tienen en cuenta el escenario de demanda, la cual es calculada a partir de la media de la potencia de los equipos, el número de equipos y los patrones de consumo en las comunidades analizadas con un valor correspondiente a 750 Wh/día.

Otro parámetro requerido es el factor de forma de la curva de carga diaria, que representa la simultaneidad de las cargas de los inversores en una vivienda. IntiGIS toma un valor experimental de 0,4.

El factor de simultaneidad, representa la potencia máxima de un grupo de equipos, y dado que no todos los aparatos tienen que funcionar a la vez, el valor utilizado es de 0,8.

La distancia máxima de la línea de BT, es un valor definido por las normas de distribución de la CFE⁴ como de 100 m.

La potencia contratada por vivienda, es la potencia máxima que se puede consumir simultáneamente en una vivienda para la conexión a red, se ha seleccionado un valor de 0,8 kW.

Por último, el número de personas por vivienda, es el valor que se utiliza para calcular el número de usuarios potenciales para cada una de las tecnologías, con un valor promedio de 5.

Los parámetros económicos están compuestos por: la tasa de descuento, que permite actualizar los valores de los bienes que varían con el transcurso del tiempo y con motivo de los cambios de precios.

En México tiene un valor del 7,15%⁵. El precio del diésel, que para México en 2017 es de 0,81 €/litro⁶.

Debido a que IntiGIS no simula el aumento en el coste de gastos de desplazamiento o almacenamiento, se ha aumentado un 10% de su precio (CIEMAT).

Por lo tanto, el valor utilizado para el análisis es de 0,89 €/litro. Por último, la tarifa eléctrica es el precio de la electricidad para el usuario final.

En México existen diferentes tarifas, dependiendo del tipo de usuario y del consumo, por lo que se ha tomado una tarifa doméstica 1A, utilizada para las zonas rurales con un coste de 0,04 €/kWh según la CFE.

Una vez definidos los parámetros generales, en la Tabla 2, se describen los parámetros de las tecnologías utilizadas, los datos fueron obtenidos de las fichas técnicas de los equipos cotizados de empresas en Chiapas.

Cabe señalar que los parámetros del sistema de acumulación y conversión, son los que se utilizarán para todos los sistemas tecnológicos analizados, con excepción de la conexión a red.

⁴ Comisión Federal de Electricidad 2015. Normas de distribución – construcción – instalaciones aéreas en media y baja tensión.

⁵ CFE.- Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica (2015-2016).

⁶ Precios máximos vigentes de los combustibles. Comisión Reguladora de Energía. http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/176963/Formato_Acuerdo_publicacion_de_precios_maximos_Final_161226.pdf

Tabla 2: Parámetros de las tecnologías

Variables	Valor	Unidades	Variables	Valor	Unidades	Variables	Valor	Unidades
Baterías			Inversores			Generador diésel individual		
Autonomía Sist. Individuales	3	Días	Eficiencia	0,9		Potencia nominal	5	kW
Autonomía Sist. Centrales	1,5	Días	Inversión	193	€/kW	Consumo de combustible	0,42	l/kWh
Rendimiento	0,9		O&M	1	€/kW	Inversión	201	€/kW
Profundidad de descarga	0,8		Tiempo de vida	10	Años	O&M	30	€/kW año
Inversión	220	€/kWh	Fotovoltaica			Tiempo de vida	10	años
O&M	8,8	€/kWh	Eficiencia	0,75		Conexión a red		
Tiempo de vida	5	Años	Inversión	1390	€/kWp	Tiempo de vida	20	Años
Generador diésel central			O&M	28	€/kWh	Costes de acometida	25	€/kW
Coeficiente de diseño	0,6		Tiempo de vida	25	Años	Línea de MT		
Consumo de combustible	0,3	l/kWh	Mini eólica			Inversión	7000	€/km
Inversión	201	€/kW	Eficiencia	0,60		O&M	175	€/km año
Tiempo de vida	10	Años	Altura del rotor	9,2	m	Centro de transformación		
Línea de BT			Inversión sistema individual	6698	€/kW			
Inversión	5000	€/km	Inversión del sistema eólico-diésel	3293	€/kW	Inversión	1992	€
O&M	100	€/km año	O&M	167,5	€/kW	O&M	40	kW
Tiempo de vida	20	Años	Tiempo de vida	20	Años			

Fuente: Elaboración propia con datos de (CFE y SHyCP).

Aplicación de intigis

Una vez definidos todos los parámetros de entrada, a continuación, se integran los datos en IntiGIS para, posteriormente, empezar con los primeros cálculos para definir las características del área de estudio, mediante la comunidad tipo, obteniendo los siguientes resultados:

1. El número de casas por comunidad: es el resultado del promedio de todas las viviendas por comunidad, resultando un total de 14 viviendas.
2. El valor medio de radiación global (kWh/m² año): permite calcular el dimensionado del sistema fotovoltaico individual con base en el promedio de la radiación global media anual 1793,07 kWh/m² año.
3. El valor medio de velocidad de viento (m/s): es calculado mediante el mapa de viento y permite dimensionar el sistema eólico individual y eólico-diésel con base en la demanda y el recurso eólico. El resultado promedio es de 5,47 m/s.
4. La distancia media a la red de MT (m): calcula el valor medio de la capa de la distancia a la red de MT, resulta del promedio de la distancia entre los píxeles al punto de electrificación más cercano. El resultado promedio es de 3087,89 m.
5. Por último, la longitud media de la línea de BT (m): para el caso de las tecnologías centrales, se asume que las viviendas están conectadas a un centro de transformación situado en el centro del píxel y representa la longitud media del centro del píxel hasta el punto de la comunidad más cercana. El resultado es de 84,25 m.

Con todos los datos obtenidos, IntiGIS, realiza la comparación LEC para cada píxel y para cada una de las tecnologías seleccionadas. Los resultados del LEC se describen a continuación.

Resultados del cálculo LEC

Como resultado de la evaluación del LEC, se obtienen seis mapas ráster que representa el valor del LEC, en cada píxel donde exista demanda y por tecnología, expresado en valores de cts €/kWh.

En la Tabla 3, se muestran los resultados del LEC para cada una de las comunidades por tecnología, los resultados obtenidos permiten resumir la variabilidad espacial.

Tabla 3: Costes de Electrificación Equivalente (LEC)

Demanda Wh/día 750 (Viviendas)	COSTE DE ELECTRIFICACIÓN EQUIVALENTE (LEC) cts €/kWh anual					
	Solar	Eólica	Individual	Diésel Central	Eólico-diésel	Conexión a Red
La Mora	91,67	138,41	202,75	*E	*E	862,51
La Magdalena	91,67	122,87	202,75	*E	*E	449,14
Nueva Esperanza	91,67	127,40	202,75	104,35	125,35	194,79
El Tuzal	91,67	140,71	202,75	104,35	136,10	212,62
Mariano Pérez	91,67	173,92	202,75	104,35	166,92	236,70
Villa del Río	91,67	154,16	202,75	104,35	148,02	160,06
El Progreso	91,67	130,87	202,75	104,35	127,90	134,92
Nuevo Amanecer Tenejapa	91,67	150,68	202,75	103,45	144,24	112,560
LEC C.T.(cts €/kWh)	91,67	142,38	202,75	104,35	141,42	295,412

*E= valores fuera de rango, debido a la limitada cantidad de viviendas. C.T.= Comunidad Tipo.

Fuente: Elaboración propia con resultados de IntiGIS

Como se muestra en la Tabla 3, los resultados LEC para cada comunidad, indican que para los sistemas fotovoltaicos no existe una variabilidad, debido a la un recurso solar homogéneo; el sistema diésel individual se mantiene constante para todas las comunidades, debido a que ninguno de los parámetros incluidos se ve afectado por una variación espacial; el sistema diésel central y el eólico-diésel, presenta su mayor variabilidad en las comunidades entre dos y cinco viviendas, y para la conexión a red, están claramente influenciados por la distancia.

Por lo tanto, la comunidad tipo permite obtener resultados significativos que posibilitan resumir la variabilidad existente en un único valor.

Una vez obtenidos los LEC, se obtiene el sistema de electrificación idóneo para cada píxel, considerando la tecnología que ofrece el menor coste actualizado y anualizado del kWh.

De los valores LEC presentados, se observa que la tecnología óptima es la tecnología fotovoltaica. La ventaja de utilizar esta tecnología, respecto a las convencionales, radica en el hecho de no utilizar combustibles y tener los costes más bajos en la generación.

El mayor coste lo presenta el sistema de acumulación con el 78% del coste total del sistema. La segunda mejor opción es el sistema diésel central, resultando con los más altos costes en la acumulación del sistema con un 30% del valor de sistema. El sistema eólico-diésel, presenta el mayor coste en la turbina eólica con poco más del 30% del LEC del sistema.

La energía eólica, con la diferencia que el sistema de generación presenta costes más altos. El sistema diésel individual, es la opción tecnológica con los costes más altos en la generación, con un 60% del LEC total del sistema. Por último, la conexión a red, presenta los costes más altos de todos los sistemas, principalmente en los costes de la línea de MT, con poco más del 90% del coste total.

Conclusiones

Este documento ha proporcionado una revisión sobre el LEC para dos sistemas renovables, un sistema híbrido y tres convencionales, mediante IntiGIS, utilizando el análisis de parámetros económicos y tecnológicos.

La tecnología fotovoltaica domiciliaria es la opción más rentable para la electrificación en el Proyecto RECOMSOL, aunque un aumento significativo de la demanda eléctrica diaria en las viviendas podría alterar el resultado.

Gracias a los resultados obtenidos, se ha permitido obtener resultados para orientar a los promotores de planes de electrificación en la elección de la tecnología más adecuada para su aplicación. Cabe señalar que IntiGIS, es una herramienta que sirve en la primera etapa de pre-evaluación del proyecto, por lo tanto, se propone que para una mayor precisión del análisis una segunda fase, realizando un estudio a escala local conociendo las necesidades eléctricas de la población y utilizando una combinación de tecnologías mediante microrredes solares o solar-eólica, y por último la elaboración de un modelo de gestión para procurar la sostenibilidad de los sistemas.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por *University College Dublin* UCD Energy21, co-financiado por Marie Curie FP7-PEOPLE-2013-COFUND *program*, el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (proyecto ENE2015-67253) y el Centro de Cooperación para el Desarrollo de la Universidad Politécnica de Cataluña (CCD-UPC), por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México, por la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) y por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Chiapas (COCYTECH).

Los autores agradecen el apoyo y el soporte al Dr. Joel Moreira Acosta y el Dr. Neín Farrera de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), encargados de la puesta en marcha y operación del proyecto RECOMSOL, y al Dr. Javier Domínguez Bravo del CIEMAT de Madrid España.

Referencias

- Amador J. 2000. Análisis de los parámetros técnicos en la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la integración regional de las energías renovables en la producción descentralizada de electricidad. Tesis Doctoral: Universidad Politécnica de Madrid.
- Byrne J, Zhou A, Shen B, Hughes K. 2007. Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A GIS-and lifecycle cost-based assessment of Western China's options. *Energy Policy*. 35(8):4391–4401.
- Calvert K, Pearce JM, Mabee WE. 2013. Toward renewable energy geo-information infrastructures: Applications of GIScience and remote sensing that build institutional capacity. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18:416–29.
- Corral B, Domínguez J, Serrano M. 2013. Análisis de Competitividad Tecnológica para la Electrificación Rural del Municipio de Ensenada, México. Informes Técnicos CIEMAT.
- Domenech B, Ferrer-Martí L, Lillo P, Pastor R, Chiroque J. 2014. A community electrification project: Combination of microgrids and household systems fed by wind, PV or micro-hydro energies according to micro-scale resource evaluation and social constraints. *Energy Sustain. Dev.* 23:275–85.
- Ferrer-Martí L, Garwood A, Chiroque J, Ramirez B, Marcelo O, et al. 2012. Evaluating and comparing three community small-scale wind electrification projects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16(7):5379–90.
- Fisher-Vanden K, Mansur ET, Wang Q (Juliana). 2015. Electricity shortages and firm productivity: Evidence from China's industrial firms. *J. Dev. Econ.* 114:172–88.
- Hafez O, Bhattacharya K. 2012. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids. *Renew. Energy.* 45:7–15.
- Hasan NS, Hassan MY, Abdullah H, Rahman HA, Omar WZW, Rosmin N. 2016. Improving power grid performance using parallel connected Compressed Air Energy Storage and wind turbine system. *Renew. Energy.* 96:498–508.

- Henaó F, Cherni JA, Jaramillo P, Dyner I. 2012. A multicriteria approach to sustainable energy supply for the rural poor. *Eur. J. Oper. Res.* 218(3):801–9.
- Hernández-Escobedo Q, Rodríguez-García E, Saldaña-Flores R, Fernández-García A, Manzano-Agugliaro F. 2015. Solar energy resource assessment in Mexican states along the Gulf of Mexico. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43:216–38.
- Kolhe M, Kolhe S, Joshi JC. 2002. Economic viability of stand-alone solar photovoltaic system in comparison with diesel-powered system for India. *Energy Econ.* 24(2):155–65.
- Lai CS, McCulloch MD. 2017. Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage. *Appl. Energy.* 190:191–203.
- Lee K, Brewer E, Christiano C, Meyo F, Miguel E, et al. 2016. Electrification for “ Under Grid ” households in Rural Kenya. *Dev. Eng.* 1:26–35.
- Mohammad Rozali NE, Wan Alwi SR, Ho WS, Manan ZA, Klemeš JJ. 2016. Integration of diesel plant into a hybrid power system using power pinch analysis. *Appl. Therm. Eng.* 105:792–98.
- Nieves AA. 2011. *Gestión Del Mantenimiento de Instalaciones de Energía Eólica.* Editorial Vértice.
- Obi M, Jensen SM, Ferris JB, Bass RB. 2017. Calculation of levelized costs of electricity for various electrical energy storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67:908–20.
- Pinedo I. 2010. *IntiGIS : Propuesta Metodológica para la Evaluación de Alternativas de Electrificación Rural Basada en SIG.* Tesis Doctoral: Universidad Complutense de Madrid.
- Sindhu S, Nehra V, Luthra S. 2016. Identification and analysis of barriers in implementation of solar energy in Indian rural sector using integrated ISM and fuzzy MICMAC approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62:70–88.
- Xue J. 2017. Photovoltaic agriculture - New opportunity for photovoltaic applications in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73:1–9.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía.- Encuesta Intercensal 2015. http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chis/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=07
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público.- Comunicado de prensa 095-2016. Oficial. <https://www.gob.mx/shcp/prensa/comunicado-de-prensa-095-2016>

