



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Doctorado en Sostenibilidad

Plan de Investigación:

Metodología de Planificación de la Electrificación Rural mediante
Energías Renovables en Comunidades Aisladas

Doctorando:

Dorian Francisco Gómez Hernández

Directores:

Dra. Laia Ferrer Martí¹

Dr. Bruno Domenech Léga²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica

²Departamento de Organización de Empresas

Barcelona, Junio de 2015

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Introducción: acceso a la energía	2
1.2. Contexto: planificación de la electrificación rural	5
2. Motivación y objetivos	7
3. Estado del arte	8
3.1. Metodologías de electrificación a nivel regional	8
3.2. Metodologías de electrificación a nivel local	10
3.3. Modelo de gestión	12
3.4. Evaluaciones y recomendaciones	13
3.5. Conclusiones del estado del arte	16
4. Metodología de planificación de la electrificación	17
4.1. Definición de proyectos a escala regional	18
4.2. Diseño del proyecto detallado	19
4.3. Diseño del modelo de gestión	21
4.4. Caso de estudio: Chiapas	22
5. Metodología, Plan de trabajo y Resultados esperados	25
5.1. Metodología de trabajo	25
5.2. Plan de trabajo	26
5.3. Contribuciones esperadas del trabajo	27
5.4. Resultados académicos	27
5.5. Estancias Financiadas	28
6. Referencias	29

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Fig. 1 Relación entre el IDH y el consumo de electricidad per cápita [7].	3
Fig. 2 Formas de distribución de la electrificación rural.	3
Fig. 3 Proceso de planificación energética.	17
Fig. 4 Distribución IntiGIS.	19
Fig. 5 Metodología de diseño de sistema de electrificación autónomos para comunidades rurales [6].	20
Fig. 6 Radiación global media anual (izquierda), velocidad media del viento (derecha). Chiapas.	22
Fig. 7 Potencial de generación eoloelectrónico.	23
Tabla 1. Comparación de las tecnologías de electrificación (adaptado de [11]).	4

RESUMEN

El acceso a la energía, permite mejorar la calidad de vida de las personas, específicamente en la alimentación, educación y sobre todo en la mejora de la salud. La **planificación de la electrificación rural**, sirve de guía para satisfacer las necesidades de la población sin acceso a la electricidad, promoviendo el uso de energías renovables de bajo coste y, por tanto, disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles.

En muchos países, se han implementado diferentes proyectos de planificación a escala regional y local, pero no siempre han resultado exitosos, debido principalmente a la estandarización en el diseño de los sistemas. Por ello, distintos proyectos no han logrado satisfacer las necesidades energéticas de la población.

En este contexto, esta tesis doctoral tiene el objetivo de crear una metodología de planificación de la electrificación rural que supera las limitaciones comentadas, diseñando un sistema adecuado para cada región y comunidad en un marco metodológico de 3 etapas: una definición de proyectos a escala regional, un proyecto detallado a nivel local y un modelo de gestión para cada comunidad.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, casi el 87% de la energía consumida a nivel global se deriva de los combustibles fósiles [1], los cuales emiten Gases de Efecto Invernadero (GEI), incluyendo dióxido de carbono, que son los responsables del calentamiento global [2], [3]. La energía es uno de los aspectos clave en temas económicos, ambientales y de desarrollo que enfrenta el mundo hoy en día. En concreto, en los últimos años se han demostrado los vínculos entre la mejora de las condiciones de vida de las comunidades rurales, el desarrollo socioeconómico sostenible y el acceso a servicios de energía adecuados, electricidad particularmente.

1.1. Introducción: acceso a la energía

El Banco Mundial define como el principal desafío mundial en el sector de la energía, la necesidad de generar más energía a precios asequibles, para que todas las personas puedan disponer de ella y satisfacer sus necesidades básicas. En la misma línea, el Grupo Asesor del Secretario General sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (AGECC), define el acceso a la energía como el acceso de la población a unos servicios energéticos limpios, confiables y accesibles para la cocción de alimentos, la calefacción de las viviendas, el alumbrado particular y público, y los usos productivos; y argumenta que proporcionar estos servicios es una condición necesaria para alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) de reducción de la pobreza mundial [4]. Éste Grupo propone que en el año 2030 cada ser humano del planeta disponga de entre 50 y 100 kWh de energía eléctrica al año.

Sin embargo, actualmente en todo el mundo, 1.200 millones de personas -una población equivalente a la de toda la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) [5]- siguen viviendo sin acceso a la electricidad; el 85% de las cuales viven en zonas rurales y, en su mayoría, con un bajo Índice de Desarrollo Humano (IDH). La Fig. 1 muestra la relación existente entre el IDH y el consumo de electricidad per cápita de los distintos países. Se observa que en los países más desfavorecidos, pequeños incrementos en el consumo de electricidad per cápita, conllevan aumentos significativos en el IDH, lo que se traduce como una notable mejora en la calidad de vida [6].

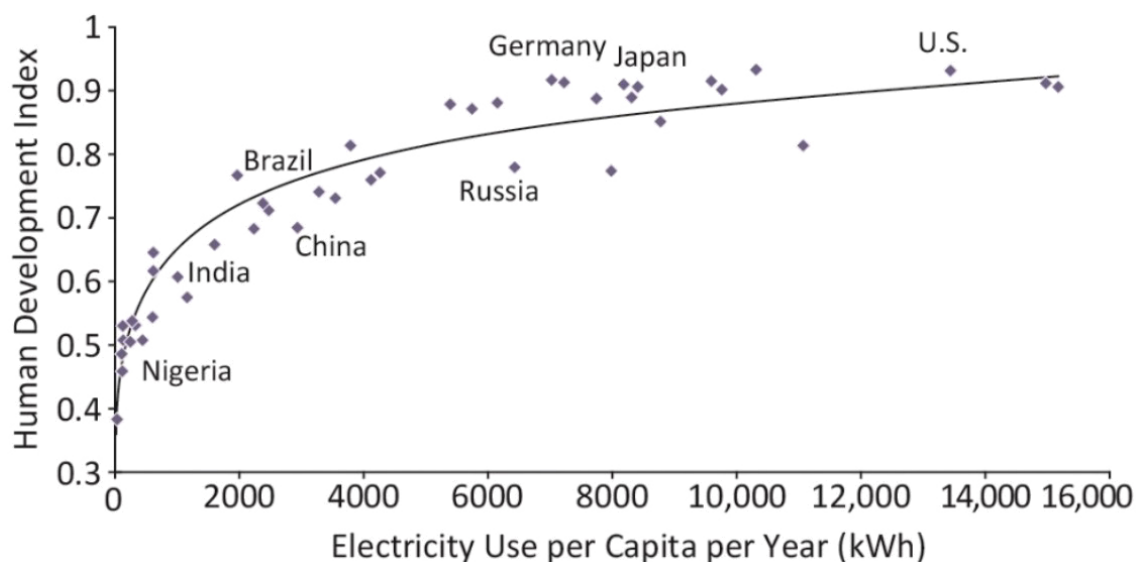


Fig. 1 Relación entre el IDH y el consumo de electricidad per cápita [7].

En este contexto, tal y como se esquematiza en la Fig. 2, existen diferentes opciones para la electrificación de comunidades rurales aisladas. La estrategia más habitual de la mayoría de gobiernos es la extensión de la red eléctrica nacional, pero esta opción suele ser demasiado costosa en regiones remotas, dispersas y difícilmente accesibles, para los habitualmente consumos limitados. Como alternativa, existen los sistemas autónomos, para los cuales se debe estudiar tanto la generación como la distribución de electricidad.

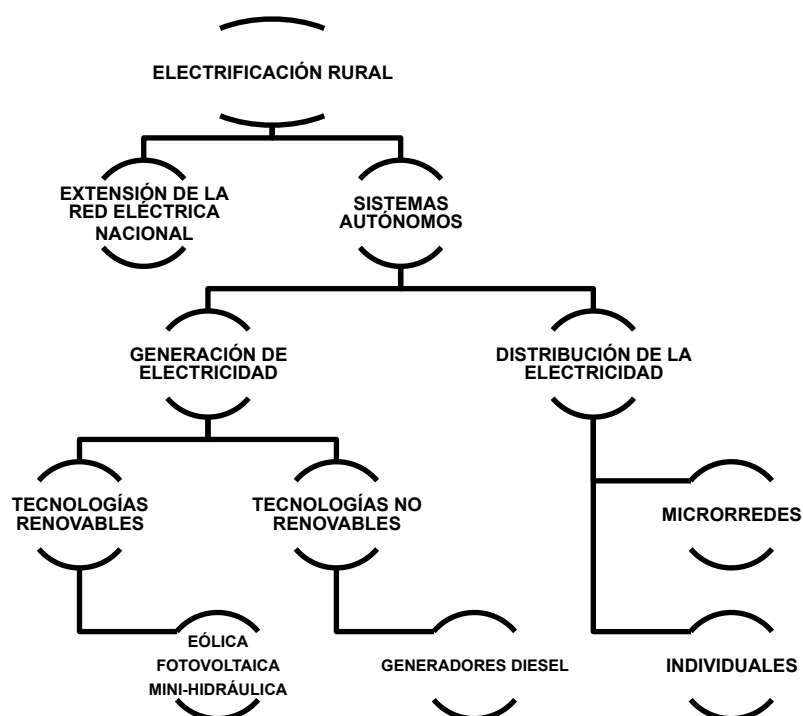


Fig. 2 Formas de distribución de la electrificación rural.

La generación puede realizarse con tecnologías no renovables, como los generadores diésel que han sido muy utilizados en las últimas décadas, y/o con renovables, como la eólica, la solar y la micro-hidráulica, que cada vez reciben mayor atención, dadas sus numerosas ventajas [8]. A diferencia de la primera opción, las energías renovables aprovechan recursos locales, disminuyen las dependencias externas y, con el adecuado diseño, están demostrando ser opciones fiables y con un coste asequible [9]. En cuanto a la distribución eléctrica, se puede realizar mediante sistemas individuales, que utilizan un sistema de generación y distribución para cada punto de consumo, o microrredes, que concentran la generación y la distribución [10].

Asimismo, existen varias opciones de electrificación y la elección del sistema más adecuado no resulta sencilla, debido a que requiere contemplar una gran cantidad de aspectos particulares del área de estudio. En la Tabla 1 se presenta una comparación de tecnologías de electrificación, convencionales y basadas en energías renovables [11]. Por lo tanto, se puede constatar que la planificación de la electrificación rural es compleja, más aún si se permite la generación híbrida y la distribución combinando varias microrredes y puntos individuales. En cualquier caso, es fundamental que el sistema elegido se adapte a la realidad de la zona geográfica en la que se implanta y los pobladores, para asegurar su perdurabilidad y sostenibilidad en el tiempo [11].

Fuente de electricidad	Nivel de potencia	Coste inicial	Coste de mantenimiento	Comentarios	Impacto social y medioambiental
Extensión de la red eléctrica	Muy alta	Bajo-alto, en función de la distancia	Bajo	Puede suministrar todos los servicios, pero puede ser muy cara para poblaciones dispersas.	Requiere producción centralizada, a menudo con combustibles fósiles. Contaminación local y regional. Control externo.
Generador diésel	Media	Medio	Alto	Tecnología probada, accesible pero de mantenimiento caro. El suministro de combustible en áreas rurales puede ser irregular.	Contaminación atmosférica, auditiva y de suelos a nivel local.
Minihidráulica	Media	Bajo-alto	Bajo	Buena opción para suplir muchos servicios energéticos. Duración prolongada.	Depende de la disponibilidad de agua y de la orografía. Impacto ambiental bajo.
Microhidráulica	Media baja	Bajo	Bajo	Buena opción para servicios domésticos, sin incluir la cocina.	Depende de la disponibilidad del agua y de la orografía. Impacto ambiental muy bajo.
Plantas generadoras con biomasa	Media	Alto	Bajo	Puede suministrar electricidad para un rango muy amplio de aplicaciones.	Emisiones contaminantes en el ámbito local.
Sistemas fotovoltaicos autónomos	Media baja	Alto	Bajo	Opción cara. Bajos costes de O&M. Suministra electricidad para centros de salud, escuelas, aplicaciones productivas	No contaminante.
Sistema solar doméstico (SSD)	Media baja	Alto	Bajo	Opción cara. Bajos costes de O&M. Suministra electricidad para iluminación, radio y TV..	No contaminante
Linterna solar	Muy baja	Medio	Bajo	Portátil, sencilla. Más barata que los SSD. Puede alimentar una radio, pero no una TV.	No contaminante.
Generador eólico	Alta media	Medio	Bajo	Amplio margen de capacidad. Puede ser competitivo con la generación eléctrica convencional	Muy bajo impacto medioambiental.

Tabla 1. Comparación de las tecnologías de electrificación (adaptado de [11]).

1.2. Contexto: planificación de la electrificación rural

En la década de los 70, y como resultado de la crisis energética, surge el concepto de planificación energética, definida como: “estudiar metódicamente de dónde se van a sacar los recursos energéticos que se utilizarán en el futuro” [12]. El objetivo “debe ser el 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” [13]. En concreto, Amador [14] afirma que la ejecución de los planes de electrificación rural permite a dicha población acceder a la energía eléctrica en condiciones de igualdad con los usuarios urbanos.

Desde entonces, en distintas regiones del mundo se han impulsado proyectos de electrificación en zonas rurales de países en desarrollo, promoviendo el uso de las energías renovables de bajo coste. Las entidades que se encargan de llevar a cabo estos proyectos, suelen ser Organizaciones No Gubernamentales (ONG's), empresas y gobiernos regionales y locales. Sin embargo, no siempre se han obtenido los resultados esperados, debido principalmente a la falta de recursos y/o a los limitados conocimientos sobre el tema. Esto ha provocado que no se busque la mejor solución para cada región, sino que se opte por estandarizar los proyectos, de modo que no siempre se adaptan a las necesidades de cada zona [6].

Se han reportado diferentes experiencias de programas de electrificación rural a escala regional con resultados limitados en comparación con los objetivos planteados [15], [16]. A escala local, distintos proyectos han mostrado también tener limitaciones, principalmente por la infravaloración de las necesidades reales de la población o al sobredimensionado de los sistemas que conlleva un sobre coste respecto al mantenimiento [17]. En cualquier caso, los usuarios se sienten insatisfechos con los sistemas y los abandonan, retornando a suministros energéticos tradicionales (velas, queroseno, pilas, etc.). Diversos estudios confirman que, a largo plazo, a los usuarios de zonas rurales estos métodos les representan un coste más alto, debido a la baja calidad de los combustibles empleados. Por ejemplo, en comparación con la energía eléctrica convencional, la energía generada por una lámpara de queroseno cuesta 70 veces más, la luz de una vela 150 veces más y la utilización de una batería entre 10 y 30 veces más [7].

En consecuencia, es necesario implementar estrategias de electrificación, principalmente mediante instrumentos o metodologías de ayuda a la toma de decisiones, que sirvan para la planificación de la electrificación rural en comunidades aisladas.

Por tanto, el presente proyecto surge de la necesidad de implementar una metodología de planificación de la electrificación para zonas rurales, mejorando la sostenibilidad y logrando una mejor eficiencia y eficacia en los proyectos. Asimismo, se busca aumentar el acceso de la población de zonas rurales a los servicios de electricidad sostenibles y eficientes, así como reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el uso de energías renovables para el suministro de la electricidad.

El presente documento se estructura de la siguiente manera. En el capítulo 2 se detallan las motivaciones así como los objetivos generales y específicos de la tesis doctoral. En el capítulo 3 se presenta el estado del arte de las metodologías implementadas hasta la fecha. En el capítulo 4 se describe brevemente la propuesta metodológica que se pretende desarrollar en esta investigación. En el capítulo 5 se describe la metodología del trabajo, plan de trabajo y contribuciones esperadas. Finalmente en el capítulo 6 se presentan las referencias consultadas.

2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Muchos autores han demostrado que la electrificación rural permite mejorar la calidad de vida de las personas, al poder adquirir un mayor grado de sostenibilidad económica incrementando los ingresos a través de actividades productivas y al mejorar los servicios básicos como la educación y la sanidad. Sin embargo, hasta la fecha, los mecanismos para implementar proyectos de electrificación rural están lejos de ser perfectos y los problemas de difusión y sostenibilidad en las zonas rurales han disminuido limitadamente [18], [19].

Con el propósito de solucionar esta problemática, se propone diseñar una metodología de planificación de la electrificación rural para comunidades rurales, que incluya una combinación de factores de éxito, en diferentes proyectos de electrificación. La metodología deberá contener una definición de proyectos a escala regional, mediante el análisis de datos socioeconómicos y los recursos de energía, para la elección de la mejor tecnología, un proyecto detallado a nivel local, mediante un modelo basado en tecnología híbrida para el diseño de sistemas de electrificación autónomos o en microrredes y el diseño de proyecto técnico, que es el documento final que incluya un modelo de gestión que nos permitirá la sostenibilidad de los proyectos.

El objetivo general de esta tesis doctoral, es desarrollar una metodología de planificación de la electrificación rural mediante energías renovables para comunidades aisladas. En concreto, los objetivos específicos son:

- Definir los proyectos a escala regional, evaluando los recursos energéticos y comparando la mejor tecnología para cada localidad rural sin acceso a la electricidad, considerando diferentes tecnologías como las renovables, los generadores diésel o la extensión de la red eléctrica nacional. Se priorizarán también las localidades, en función del orden de intervención más adecuado.
- Diseñar el proyecto detallado del sistema de electrificación autónomo para cada localidad, combinando energías renovables para la generación, así como las microrredes y los sistemas individuales para la distribución eléctrica. Como objetivo, se buscará la minimización del coste, la satisfacción de la demanda energética, la simplicidad en la gestión del sistema y la maximización de la seguridad del suministro.
- Diseñar un modelo de gestión adecuado a las características socioeconómicas de la población, para así asegurar la sostenibilidad de los sistemas.

3. ESTADO DEL ARTE

A continuación se analizan las referencias encontradas hasta el momento sobre la temática de investigación. El estado del arte se ha organizado en tres partes, que coinciden con las diferentes etapas de la metodología propuesta: estudios de planes de electrificación rural a escala regional (apartado 3.1), estudios detallados de proyectos a escala local (apartado 3.2), estudios de modelos de gestión (apartado 3.3) y evaluaciones y recomendaciones extraídas a partir del análisis de planes y proyectos (apartado 3.4). Con esta información se pueden extraer las conclusiones para el desarrollo de la investigación (apartado 3.5).

3.1. Metodologías de electrificación a nivel regional

Se han desarrollado planes de electrificación rural por todo el mundo a nivel regional, con el fin de estudiar la mejor opción de electrificación para una determinada zona. Por ejemplo, Poudel et al. [20] revisan diferentes indicadores cuantitativos para la electrificación rural: coste actual neto, distancia de equilibrio para la extensión del interconectado, coste nivelado de la energía, coste de capital medio por vivienda y fiabilidad del suministro energético. Con esta información identifican las zonas candidatas para implementar sistemas autónomos en Nepal. Además, analizan un sistema eólico-solar en una comunidad piloto para demostrar su viabilidad y favorecer que el gobierno e instituciones privadas puedan hacer réplicas exitosas en otras zonas del país. Gutiérrez-Vera [21] examina 19 opciones comerciales de electrificación a nivel regional, de las cuales 7 son seleccionadas, analizando su rendimiento en la electrificación de 12 comunidades remotas de Santa María Magdalena (Hidalgo, México) para satisfacer 11 objetivos de diseño técnicos y 5 objetivos socioeconómicos. Del análisis se obtiene un sistema híbrido autónomo como la mejor opción (paneles solares, alternador diesel y opcionalmente, un aerogenerador), lo que se extrapola al resto de comunidades. Arraiz et al. [22] presentan y analizan sistemas solares en Perú, cuyo mantenimiento, reparación y sustitución se autofinancia con las tarifas de pago mensuales. En detalle, analizan los beneficios de la electrificación; principalmente más horas de luz para actividades productivas (estudio, manufacturas domésticas, etc.). Además de gastar menos dinero que con energías tradicionales (velas, baterías y linternas), los usuarios permanecen más tiempo despiertos: las mujeres pasan más tiempo en el hogar, los niños le dedican más tiempo a sus estudios, etc. Sin embargo, los autores notan que, a corto plazo, el impacto evidente sobre los ingresos no resulta evidente. Camblong et al. [23], promueven la electrificación de zonas rurales a nivel regional en Senegal mediante la instalación de micro-redes con energías renovables (eólica, solar y biomasa), ya que el país cuenta con un enorme potencial solar y un viento interesante en algunos lugares. Los resultados

permitieron el diseño de un kit de electrificación rural, que fue implementado en una comunidad de Senegal y extendido a 3 pueblos más [24]. Leary et al. [25] analizan 3 iniciativas en comunidades rurales remotas de China, Perú y Nicaragua, poniendo especial atención en la tecnología eólica. En China, concluyen que el éxito viene dado por la producción de sistemas eólicos a nivel local. En Perú, concluyen sobre la adecuación de las microrredes, que pueden reducir los costes iniciales de capital. Finalmente, en Nicaragua, analizan un proyecto distinto donde se instala una sola turbina de gran potencia en un punto estratégico, para que los usuarios recarguen sus baterías.

Los estudios presentados anteriormente, presentan buenos resultados para los casos particulares de cada región en los que son empleados, pero no se realizan con una metodología clara y sistematizada. Otras herramientas facilitan la toma de decisiones, reduciendo el tiempo invertido y mejorando la calidad de la aproximación del diseño de sistemas de generación autónomos así como en la elección del tipo de tecnología a utilizar. Por ejemplo, el programa SURE es una herramienta informática orientada a apoyar la toma de decisiones para definir y elegir la opción tecnológica de generación (solar, micro-hidráulica, biogás, diesel e híbrida) más adecuada en proyectos de electrificación rural. En concreto, permite evaluar y asignar un valor a cada opción mediante la aplicación de 5 criterios, basados en el impacto que cada alternativa tendría sobre los recursos: natural, físico, humano, social y financiero [26]. Kanase-Patil et al. [27] desarrollan un modelo de optimización para diseñar y comparar 4 alternativas tecnológicas a utilizar en una región rural de unas 1500 personas, repartidas en 7 comunidades. El modelo incluye las energías eólica, solar, hidráulica y biomasa para cubrir las necesidades eléctricas y de cocción, y considera como objetivos la ratio de energía, la demanda no cubierta así como los costes energéticos y de interrupción del sistema. El modelo se resuelve con LINGO y se comparan los resultados con los de HOMER (que se describirá en detalle en el apartado 3.2.), comprobando la validez del modelo.

Otra herramienta frecuentemente utilizada a escala regional, son los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Van Hoesen et al. [28] utilizan una herramienta SIG, basada en ArcView, para identificar las áreas con mayor potencial energético para la electrificación de zonas rurales a escala regional. En concreto, se analizan las áreas (o los puntos) que permiten implementar infraestructuras físicas, cultivos para la biomasa, aerogeneradores y paneles fotovoltaicos. Kaijuka [29], realiza un análisis aplicado a Uganda utilizando un SIG en el proceso de planificación de la electrificación rural, pero su objetivo no es la definición de tecnologías óptimas, sino de áreas prioritarias de inversión. Para ello analiza la red de distribución eléctrica, la localización de las comunidades y de los centros de demanda prioritarios (centros de formación, centros de salud, etc.). Con esta información, desarrolla una metodología para

ponderar cada distrito y cada provincia, en función del tipo de demanda, lo que permite establecer una clasificación en función del orden de prioridad en la electrificación. Otra herramienta SIG utilizada en los últimos años es IntiGIS, desarrollada sobre ARCGIS [11]. Su objetivo es comparar diferentes sistemas de electrificación (renovables y convencionales) sobre la base de su coste. Como resultado se obtienen tanto los valores numéricos como cartográficos de cada una de las tecnologías (solar, mini-eólica, diesel e híbridas) de generación eléctrica estudiadas, así como el mejor resultado en cada punto de demanda. También permite realizar un análisis de sensibilidad espacial que sirve para evaluar el peso de cada variable en el caso de estudio, analizar la estabilidad del resultado y realizar diferentes escenarios en función de la variabilidad de los parámetros [30]. Corral et al. [31] presentan una propuesta de electrificación para las localidades rurales del municipio de Ensenada, al Noroeste de México. Para ello, aportan elementos para la toma de decisiones con la ayuda de la herramienta IntiGIS, encontrando la tecnología más adecuada para cada localidad, entre fotovoltaica, eólica, generadores diésel, eólico-diésel, diésel individual y conexión a red). Los autores concluyen que la única alternativa para la extensión de la red son las comunidades que se encuentran a menos de 900 m, lo que equivale a un 4% de las comunidades rurales del municipio de Ensenada. En cambio, para el 83% de las comunidades, es más conveniente utilizar sistemas fotovoltaicos y para el 13% restante la eólica individual.

3.2. Metodologías de electrificación a nivel local

Los trabajos antes referenciados, llevan a cabo estudios a nivel regional, pero no entran en el detalle local; es decir que no realizan un análisis específico para cada comunidad a electrificar en función de sus características y condicionantes. En cambio, se han presentado investigaciones y proyectos a escala local, con buenos resultados para la sostenibilidad de las localidades. Domenech et al. [9] describen el diseño técnico del sistema de electrificación en la comunidad de Alto Perú (en la región de Cajamarca). Para ello se realiza una evaluación en detalle de los recursos energéticos (viento, sol y agua) así como de las necesidades energéticas de la población a partir de sus características socioeconómicas. Específicamente se implementan cuatro tecnologías: microrredes eólicas, una micro-central hidroeléctrica, una microrred fotovoltaica y aerogeneradores individuales; electrificando así a 58 casas, un centro de sanidad, una escuela, una iglesia, dos restaurantes y dos tiendas. Alzola et al. [24] proponen una metodología para el diseño de un kit de electrificación y la aplican a un pueblo típico en Senegal, extendiendo luego los resultados a 3 pueblos más. Como consideraciones se incluyen las cuestiones económicas para establecer la relación entre los costes de electrificación y la capacidad de pago de las comunidades. Además, la gestión del sistema se lleva a cabo por organizaciones locales, y el mantenimiento adecuado de los

equipos se garantiza mediante la formación de técnicos locales y el suministro de piezas de repuesto. Camargo et al. [32], desarrollan una herramienta para simular y diseñar sistemas híbridos (solar, eólica y baterías). El modelo es útil para electrificar zonas rurales y remotas con las energías eólica y solar, a coste mínimo y con alta fiabilidad. Como resultado, presentan un diseño completo del sistema y una evaluación de los costes a largo plazo.

Asimismo, se han desarrollado herramientas que permiten diseñar sistemas de generación y/o distribución autónoma a escala local en distintos contextos y regiones. Posiblemente, la herramienta más utilizada es HOMER [33], que permite considerar en detalle la generación y acumulación, incluyendo numerosas opciones tecnológicas: sistemas híbridos, aerogeneradores, generadores hidráulicos, generadores diésel, soporte de baterías e inversores, entre otros. El programa permite determinar el sistema de menor coste a lo largo de la vida útil para una demanda dada, mediante simulaciones de funcionamiento horario a lo largo de un año. También realiza un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de un cambio en cualquiera de los parámetros de entrada. Por ejemplo, basándose en esta herramienta, Hafez et al. [33] comparan sistemas no renovables, renovables (eólica, solar e hidráulica) y mixtos, demostrando los renovables son mejores ambientalmente y los mixtos son mejores en términos económicos. Concluyen sobre la importancia de implementar un buen sistema de tarifas para la adecuada sostenibilidad económica de los sistemas. Existen otras herramientas similares a HOMER, como iHOGA, que además de minimizar el coste, permite minimizar las emisiones de CO₂ y la energía no servida¹ [34]. Fadaeenejad et al. [35], revisan diferentes experiencias de electrificación en el mundo que utilizan sistemas eólico-solares con soporte de baterías y generadores diésel. Además, utilizan el iHOGA para simular distintas opciones de electrificación para una comunidad en Malasia, concluyendo que el sistema eólico-solar con soporte de baterías es la mejor opción.

Sin embargo, cabe destacar que HOMER realiza un diseño desde un punto de vista técnico y económico, pero sin incluir aspectos sociales, los cuales han demostrado ser de gran importancia, especialmente a escala local [17]. En este sentido, Ferrer-Martí et al. [36] presentan un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (PLEM) para optimizar el diseño de sistemas de electrificación rural con energías eólica y fotovoltaica. Domenech et al. [37] amplían dicho modelo incluyendo aspectos sociales relacionados con la gestión del sistema y la seguridad del suministro, a partir del análisis de 5 proyectos reales. El modelo resultante permite obtener el tamaño, tipo y localización de todos los equipos a instalar, minimizando el coste, teniendo en cuenta el detalle de la

¹ La energía no servida es la energía demandada y que las compañías suministradoras de electricidad no pueden cubrir, ya sea por indisponibilidad programada (mantenimiento) o no programada (paradas de emergencia) de las unidades de generación [60].

demanda y los recursos energéticos, y combinando microrredes y sistemas individuales. Dichos modelos se utilizan para el diseño de sistemas de electrificación en la sierra andina peruana. Finalmente, Domenech et al. [6] desarrollan una metodología integral que permite un diseño completo y detallado de los sistemas, en tres niveles de decisión, de acuerdo a la importancia de las decisiones tomadas. Para ello, en cada nivel, primero generan distintas opciones de electrificación con el modelo PLEM descrito previamente, y luego seleccionan la más adecuada utilizando un proceso de decisión multicriterio. La metodología obtenida puede ayudar a las instituciones que promueven proyectos de electrificación (gobiernos, empresas, organizaciones no gubernamentales) a diseñar proyectos eficientes y sostenibles en el tiempo. Finalmente, Howells et al. [15], utilizan la herramienta MARKAL/TIMES de planificación, tanto a nivel regional como a nivel local. En concreto, proponen un modelo que permite conocer las necesidades mínimas energéticas de una localidad rural no electrificada en Sudáfrica, definiendo los límites y restricciones de los usuarios. Con esto, hallan que el consumo de electricidad es bajo, y se podrían reducir los costes disminuyendo la capacidad de zonas con bajos ingresos.

3.3. Modelo de gestión

Diseñar el modelo de gestión apropiado es tanto o más importante que la elección de la tecnología apropiada, para garantizar la sostenibilidad de los sistemas [38], [39]. Existen numerosos modelos de gestión de los sistemas de electrificación autónomos, entre los cuales los más comunes son los de gestión privada, cooperativa, o de municipios o comunidades estatales o locales. Estos modelos tienen diferentes características en cuanto a la propiedad de los sistemas, el nivel de participación de los usuarios, la responsabilidad de la operación y mantenimiento de los sistemas, participación de los usuarios en la construcción de infraestructuras e instalación de equipos, gestión de pagos arancelarios, etc. [39], [40]. En la literatura, existen pocos casos registrados que hayan presentado el desarrollo de modelos de gestión aplicado a algún contexto o región Ferrer-Martí et al. [10], implementan un modelo de gestión en El Alumbra Perú, que se basa en tres puntos principales; crear una microempresa para gestionar los servicios, fortalecer las capacidades de los residentes y asegurar el compromiso y la participación de la población, incluyendo una microempresa, al comité de usuarios, al municipio y la ONG, concluyen que la microempresa, funcionó con éxito y la operación y mantenimiento de los equipos se fortaleció a través de manuales visuales [41] y la participación de las autoridades y la capacitación al técnico local. La mayoría de estudios de modelos de gestión se centran en las evaluaciones y recomendaciones sobre el funcionamiento de los modelos implementados. Yadoo et al. [42] que analizan el modelo de gestión utilizado en tres países (EE.UU., Bangladesh y Nepal), centrándose en la viabilidad técnica, económica

y ambiental. Al mismo tiempo cómo el modelo influye en la participación de la población, la promoción de la equidad y el empoderamiento de cada comunidad. Sánchez et al. [43] realizan una comparación entre los modelos de gestión gubernamentales, municipales, privados y comunitarios en Perú. El trabajo se centra en la sostenibilidad técnica y económica de los proyectos, concluyendo que los modelos más exitosos son los de microempresas implementados por la ONG Soluciones Prácticas (PA) [44]. Ferrer-Martí et al. [10], evalúan, entre otros aspectos, este modelo de gestión en tres proyectos y confirman sus buenos resultados. Aún así, más recientemente, Lillo et al. [39] analizan este mismo modelo en términos de equidad y diversidad, sostenibilidad, empoderamiento y productividad. El estudio identifica algunas barreras que aún limitan el impacto positivo de los proyectos proponen una serie de recomendaciones para superarlos.

3.4. Evaluaciones y recomendaciones

En los últimos años, se ha venido discutiendo en la literatura si los programas de electrificación rural han sido exitosos; a través de la evaluación y análisis de distintos proyectos. Mientras que algunos han presentado buenos resultados, en otros casos los beneficios han sido muy relativos. En este contexto, Van Campen et al. [42] aportan algunas problemáticas características de los programas de electrificación rural: gran dispersión de los consumidores potenciales y con poca demanda; concentración del consumo en un breve periodo del día; gran pérdida de energía por caídas de tensión; robos; limitado poder de compra de los usuarios; y dificultad de facturación, mantenimiento y servicio. Por su parte, Uddin et al. [43] dan recomendaciones para promover el uso de las energías renovables en zonas rurales de Bangladesh; aunque las conclusiones son extrapolables a otros contextos. En concreto, recomiendan favorecer los mecanismos oportunos para electrificar estas zonas con las tecnologías adecuadas, utilizando metodologías de ayuda a la toma de decisiones. Entrando más en el detalle de estas tecnologías, Sánchez et al. [44] revisan proyectos de electrificación en la amazonia brasileña, concluyendo que la combinación de eólica y solar con un soporte diésel es una muy buena opción tecnológica y sostenible. Asimismo, afirman que de forma generalizada las renovables, además de facilitar el acceso a la electricidad con recursos locales, disminuyen la dependencia externa de las comunidades, siendo por tanto adecuadas en numerosos contextos. En cualquier caso, los proyectos no deben ser de tipo “technology-push”, es decir donde se fuerce la electrificación sin un análisis detallado de las necesidades [45]. Por el contrario, es necesario favorecer la participación de los usuarios en programas de capacitación de las tecnologías, involucrar a todos los actores, desarrollar mecanismos de financiación y romper las barreras políticas. Rojas et al. [46], analizan una variedad de modelos de optimización para el diseño de sistemas de electrificación en zonas remotas, distinguiendo según la técnica de

optimización utilizada, el o los objetivos (económico, técnico, social y ambiental), la tecnología de generación y acumulación, las aplicaciones, el horizonte de planificación, el tipo de análisis (cualitativo o cuantitativo), la población objetivo y el software utilizado. Concluyen que “un plan coherente y sólido puede conllevar numerosos beneficios como una mejor información, que puede ser utilizada por los tomadores de decisiones para elegir el sistema más adecuado en función de los recursos energéticos y las necesidades de la población local. Además, una correcta toma de decisiones, implica una mejor utilización de los recursos financieros, incluida la financiación tanto pública como privada, así como una mejor calidad de vida para los beneficiarios potenciales”.

En el ámbito de los aspectos sociales, Hirmer et al. [47] desarrollan un marco conceptual que permite identificar las cuestiones que más valoran los habitantes de distintas comunidades rurales electrificadas, para asegurar así la adecuación y la sostenibilidad de los proyectos. En concreto identifican los 5 valores clave para el éxito de los proyectos: funcional, importancia social, epistémico, emocional y cultural. Sin embargo, la investigación concluye que, pese a su importancia para responder a las necesidades reales de cada habitante, los aspectos socio-culturales están frecuentemente olvidados. Esta idea queda corroborada con el trabajo de Shyu [15], que analiza y evalúa el “Programa de Electrificación Township” en China. Los resultados muestran que el programa tiene una clara orientación técnica, pero que subestiman el enfoque financiero (tarifa eléctrica, capacidad de los hogares para pagar tarifas de electricidad y gestión financiera), el modelo de gestión (capacitación de los operadores, participación de los hogares) y el desarrollo de capacidades institucionales (buena gobernanza, marco regulador). Así, a pesar de la instalación de sistemas fotovoltaicos, muchos usuarios siguen utilizando sistemas de suministro energético tradicionales por la falta de fiabilidad de los equipos. Otras experiencias como la del programa PRODEEM en Brasil [48], demuestran como numerosos sistemas fotovoltaicos instalados quedaron inservibles al poco tiempo (46%) y otros bien instalados dejaron de funcionar a los pocos meses por falta de mantenimiento (36%). Por tanto, es necesario involucrar a la población en los proyectos de forma adecuada, mediante capacitaciones que faciliten la auto-sustentación de los proyectos y muestren la necesidad de un adecuado mantenimiento de los equipos. Precisamente, Javadi et al. [49] investigan numerosos planes de electrificación rural, tanto conectados a red como autónomos, y concluyen que los proyectos exitosos son los que promueven la creación de puestos de trabajo e ingresos para la gente local; es decir que se muestran útiles para la población.

En el plano político, en los últimos años se ha venido insistiendo que la electrificación rural debe ser promovida por los gobiernos, pero sin que éstos interfieran una vez iniciada, con el objetivo de satisfacer criterios

socioeconómicos y no políticos [50]. En este sentido, Lee et al. [51] revisan los planes de electrificación rural de los 15 países miembros de la red ECOWAS (África), estudiando: el tipo de documentación de que disponen; los actores involucrados; los objetivos perseguidos; el modo en que se planifica la demanda, los modelos de planificación utilizados y las tecnologías. Concluyen que para muchos países existe todavía una importante brecha política, que limita la réplica de proyectos pese a ser exitosos. Por su parte, Eunnyeong et al. [52] evalúan, utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), los programas de electrificación rural en Corea, aunque el método utilizado es extrapolable a otros contextos. Así, concluyen que: (1) la viabilidad económica es el factor más importante; (2) debe haber un mercado accesible con las tecnologías implementadas; y (3) existe una brecha significativa entre los investigadores y los responsables políticos.

Desde una perspectiva más técnica, Mundo-Hernández et al. [53] comparan y contrastan las políticas y el potencial energético fotovoltaico de Alemania y México, ambos países en condiciones bastante favorables. Con esta información, hacen una serie de recomendaciones para México, que pueden ser extrapoladas a otros contextos. Por ejemplo, es importante implementar estrategias para diversificar las fuentes de energía y asegurar la generación de energía limpia garantizando la preservación del medio natural. También se debe crear una conciencia respecto a los beneficios sociales, económicos y ambientales de dichos sistemas; y distribuir los conocimientos al respecto a los sistemas fotovoltaicos para favorecer su disseminación, a través de foros públicos u otras opciones. En paralelo es recomendable invertir en la tecnología, con el objetivo de ser capaces de producir los equipos por sí mismos, lo que ayuda a reducir los costes de la energía; así como implementar políticas y programas gubernamentales que ofrezcan beneficios claros para los consumidores. Por último, es importante aprender de iniciativas y resultados de otros países para mejorar el desarrollo de los programas gubernamentales.

Finalmente, desde una perspectiva financiera, Biswas et al. [16] proponen un modelo para favorecer el desarrollo de localidades rurales de Bangladesh, mejorando el empoderamiento de las poblaciones. El modelo plantea un sistema de créditos para autofinanciar los sistemas de generación de energía con tecnologías renovables, devolviendo el dinero con los ingresos generados por dichos sistemas. Este tipo de mecanismos puede favorecer notablemente la sostenibilidad de los proyectos, aunque no aseguran su éxito. Por ejemplo, Mawhood et al. [16] revisan el programa de electrificación rural senegalés PASER, identificando los aspectos clave en su fracaso. Demuestran que, aunque se favorezca la financiación de la electrificación a través del sector privado, siguen existiendo numerosas limitaciones para el desarrollo de proyectos de electrificación rural.

3.5. Conclusiones del estado del arte

Hasta aquí se ha presentado el estado del arte en la temática. Se puede constatar como las publicaciones referentes a planes de electrificación rural a escala regional no consideran el detalle de cada proyecto, sino que se limitan a un análisis aproximado. Por el contrario, los proyectos de electrificación rural a escala local, tienen en cuenta un mayor detalle en el diseño, pero no quedan integrados en planes de mayor envergadura; de modo que si el proyecto se quiere replicar es necesario analizar la nueva comunidad desde cero. Además, las consideraciones sociales, ambientales, políticas, etc. siguen siendo una limitación en numerosos casos; tal y como lo demuestran distintas evaluaciones llevadas a cabo en contextos muy diferentes.

En conclusión, no se ha encontrado una metodología que defina un plan de electrificación rural de manera integral; es decir, desde que se identifica una región con limitado acceso a la electricidad, hasta que se define el proyecto detallado en cada comunidad. Además, se deduce que existen tres etapas importantes a tomar en cuenta para garantizar la sostenibilidad de los proyectos y a integrar en la metodología. En primer lugar, una definición de proyectos a escala regional, que consiste en la toma de decisiones de la tecnología a utilizar en las comunidades, mediante la obtención de datos socioeconómicos de la región y los recursos energéticos. Esta etapa debe incluir una priorización de implementación de los proyectos. En segundo lugar, el diseño del proyecto detallado, es donde se realiza un análisis detallado, es decir, conociendo las necesidades por cada vivienda y comunidad, e incluyendo el detalle del sistema de distribución. Finalmente, en tercer lugar, se debe elaborar un modelo de gestión que asegure que el proyecto sea sostenible en el tiempo.

4. METODOLOGÍA DE PLANIFICACIÓN DE LA ELECTRIFICACIÓN

En este capítulo, se presenta brevemente una primera aproximación al esquema general de la metodología para la planificación de la electrificación rural, que se propone desarrollar a lo largo de esta tesis doctoral. La metodología parte de una región por electrificar y guía en todo el proceso de decisiones hasta obtener un diseño detallado del sistema de electrificación a implementar en todas las comunidades de la zona. En la Fig. 3 se muestra el esquema general de planificación de la electrificación rural. En términos generales, en este proceso se incluyen distintos puntos que pueden ser módulos que se detallan a continuación.

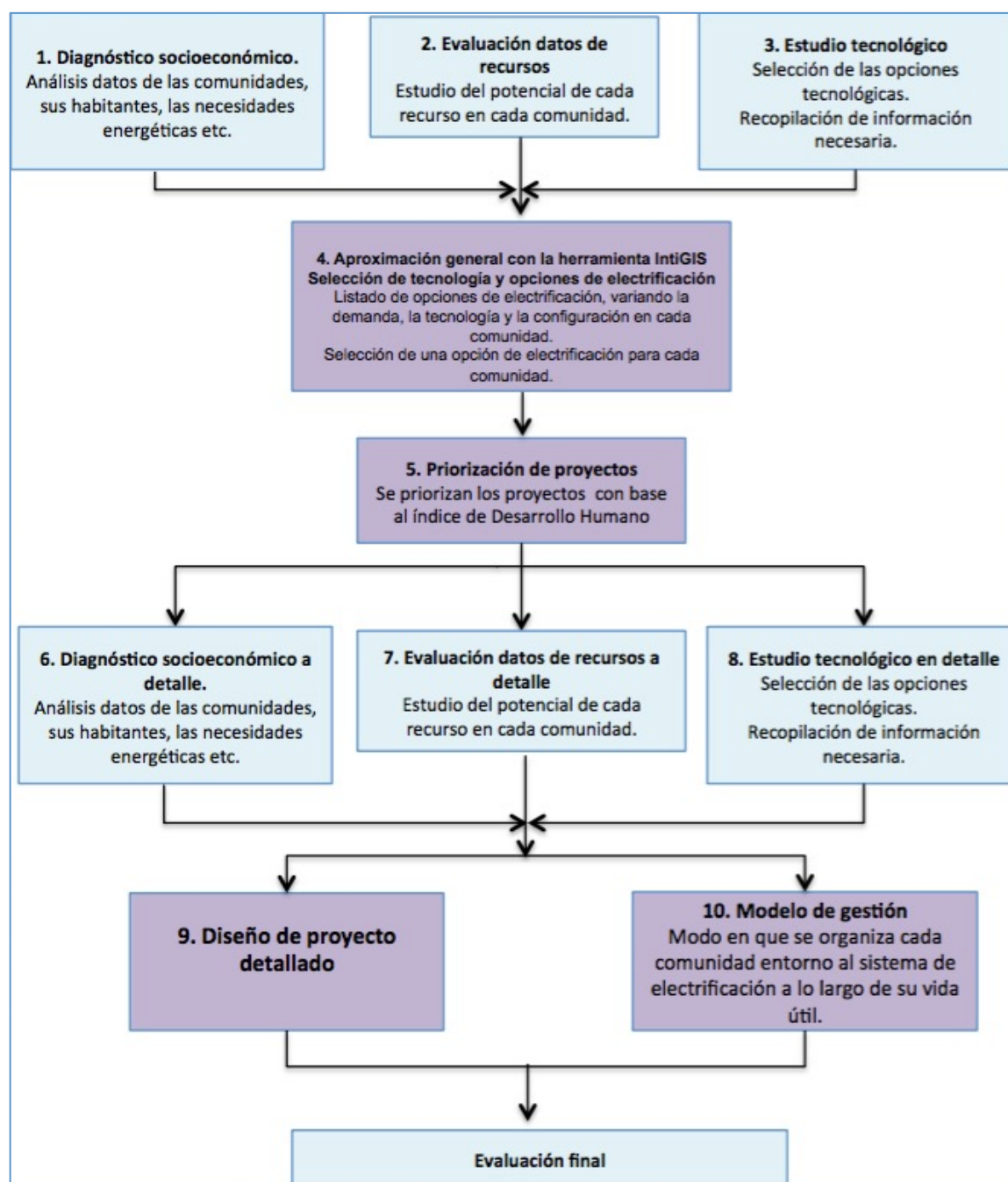


Fig. 3 Proceso de planificación energética.

Al analizar una región sin electrificar, en primer lugar se extraen los datos y se analizan las características socioeconómicas más destacables de cada comunidad (punto 1), los recursos energéticos disponibles (punto 2) y las posibles tecnologías a utilizar según la disponibilidad de los equipos en el mercado (punto 3). Con esta información, se pueden concretar, para cada comunidad, las distintas opciones tecnológicas factibles, mediante una definición general de cada proyecto (punto 4). Con esto, se pueden priorizar los proyectos entre sí (punto 5), mediante un proceso de decisión multicriterio. A partir de aquí, siguiendo el orden de prioridad, se pasa de la escala regional a un análisis detallado de cada comunidad (puntos 6, 7 y 8). Siguiendo con el proceso, es necesario desarrollar el diseño técnico en detalle para cada comunidad (punto 9) y en paralelo el modelo de gestión (punto 10), que asegure la sostenibilidad del proyecto y en paralelo. De esta manera se obtiene la evaluación final para cada localidad.

Dentro de este esquema general, en esta tesis se pretende abordar los 4 puntos de mayor complejidad, que se detallan a continuación: la definición del proyecto a escala regional junto con la priorización de proyectos (apartado 4.1), el diseño del proyecto detallado (apartado 4.2), y el modelo de gestión (apartado 4.3).

4.1. Definición de proyectos a escala regional

En este punto se trata de, a partir de la información socioeconómica, energética y técnica, definir el conjunto de soluciones tecnológicas factibles para cada comunidad sin acceso a la electricidad de una región determinada. Entre las opciones posibles están el interconectado eléctrico nacional o las energías renovables (principalmente eólica, solar y micro-hidráulica). Para realizar este análisis se utiliza la herramienta IntiGIS, un Sistema de Información Geográfica desarrollada por el grupo de Tecnologías de Información Geográfica y Energías Renovables (gTIGER) del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). IntiGIS permite evaluar simultáneamente los datos de radiación solar, viento, demanda y población que caracterizan la zona en estudio y que sirve de apoyo a la toma de decisiones para desarrollar políticas energéticas sostenibles.

El funcionamiento de la herramienta IntiGIS se puede observar en la Fig. 4. Con los datos de entrada, se procesa la información para la elección de la tecnología: el recurso solar; el recurso eólico, calculado con la velocidad media del viento; y los puntos de distribución de la red eléctrica nacional. También se requiere de otros datos socioeconómicos, como el número total de viviendas sin electrificar. Con esta información, la herramienta realiza el análisis propiamente dicho; es decir los cálculos del Coste de Electrificación Equivalente (LEC, por sus siglas en inglés), para cada opción tecnológica. Esta evaluación se realiza contemplando los costes asociados a la tecnología, el recurso energético disponible (eólico, solar, tarifa eléctrica, precio del combustible) y la demanda. Estos tres componentes del problema son altamente dependientes de la información geográfica requerida en el análisis [11].

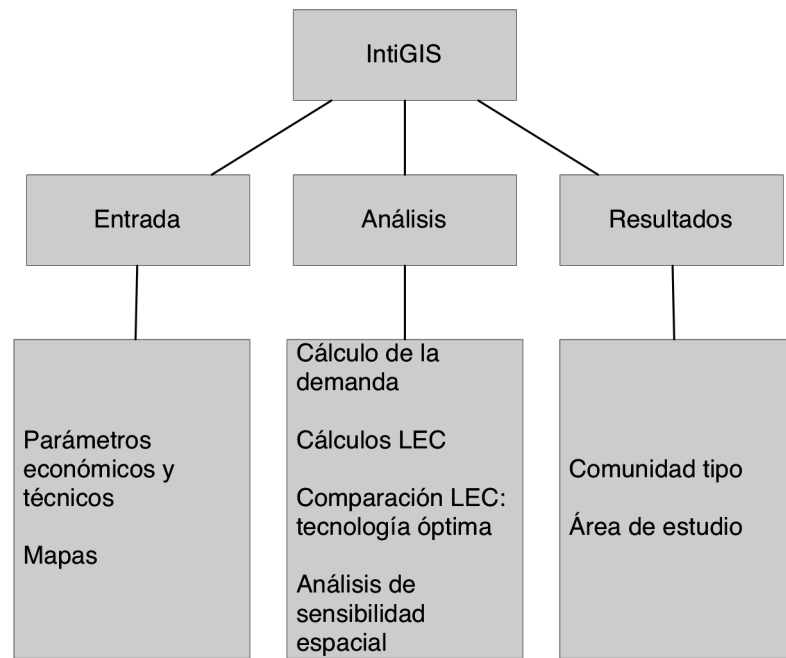


Fig. 4 Distribución IntiGIS.

Los resultados obtenidos permiten comparar las diferentes tecnologías (solar, eólica, generador diesel o extensión a la red eléctrica) y concluir así sobre cuál es la opción más adecuada en cada caso [28].

Finalmente se procede a realizar un análisis de priorización de las comunidades entre sí. Para eso se utilizan herramientas multicriterio de apoyo a la toma de decisiones, en las que interviene toda la información recopilada hasta el momento, que permite integrar diferentes criterios y encontrar la decisión más adecuada para los sistemas.

4.2. Diseño del proyecto detallado

Una vez se dispone de la lista ordenada de proyectos a implementar, se procede, por orden, con el diseño detallado de cada uno. El objetivo es definir el sistema de electrificación más adecuado, permitiendo la generación híbrida y combinando varias microrredes con puntos individuales, de acuerdo con el detalle de los recursos energéticos de cada comunidad y la demanda eléctrica de la población. Este proceso se apoya en la metodología de diseño desarrollada por Domenech [6], y cuyo esquema se muestra en la Fig. 5.

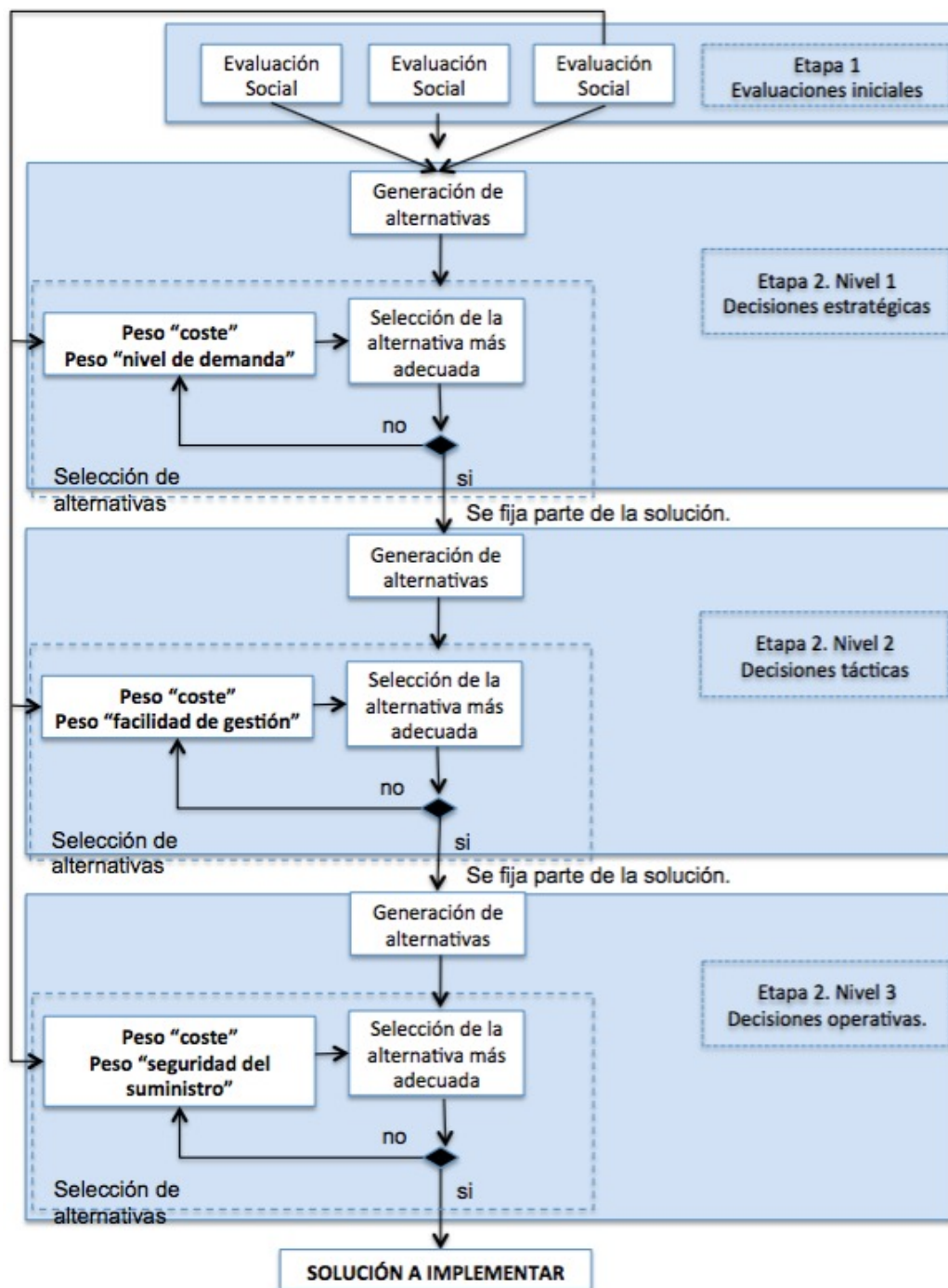


Fig. 5 Metodología de diseño de sistema de electrificación autónomos para comunidades rurales [6].

Como se puede observar, la metodología se estructura en 2 etapas. En la primera, se recoge la información detallada de las características sociales de la población, se estudian los recursos energéticos y se identifican los equipos y componentes disponibles en el mercado. En la segunda etapa, se realiza el diseño del sistema propiamente dicho; el cual se organiza en 3 niveles, de acuerdo a la importancia de las decisiones tomadas. De esta forma se estudia la influencia sobre el coste de modificaciones en los usos energéticos ofrecidos (nivel 1), la configuración del sistema (nivel 2) y la tipología de los equipos utilizados (nivel 3). En cada nivel, primero se genera un conjunto de opciones de

electrificación, utilizando un modelo PLEM, y luego se selecciona la más adecuada, mediante un proceso de decisión multicriterio. Además, entre un nivel de decisión y el siguiente, se fija parte de la solución para evitar que decisiones posteriores perjudiquen decisiones previamente tomadas. Todo este proceso se complementa con unos procesos iterativos que permiten ajustar las decisiones tomadas a medida que se avanza en el problema.

Con esto, se obtiene la solución de electrificación más adecuada para la comunidad de estudio, indicando el tipo y localización de los equipos a instalar, los puntos individuales, las microrredes y su estructura.

4.3. Diseño del modelo de gestión

En la literatura se ha otorgado una importancia limitada al modelo de gestión en proyectos de electrificación rural. Además, a pesar de haber encontrado algunas alternativas al respecto, resulta muy complejo establecer una pauta a seguir en cualquier contexto. Por este motivo, se analizarán las recomendaciones más habituales en cuanto a la organización de la población en torno a los proyectos de electrificación rural, con objeto de incorporarlas a la metodología propuesta para, así, garantizar la sostenibilidad de los proyectos.

En líneas generales, el modelo de gestión debe contemplar diferentes aspectos: los hábitos de consumo de la población, los costes de mantenimiento y sustitución de los equipos, etc. No tomar en cuenta estos aspectos, puede conllevar que el sistema no responda a las necesidades de los habitantes y, tras poco tiempo de la puesta en funcionamiento, se abandonen los equipos y no sea posible costear su mantenimiento y sustitución.

Para superar estas limitaciones, una estrategia adecuada es involucrar a los usuarios tanto en el diseño e implementación del sistema como durante los primeros meses de funcionamiento. Para ello, se realizan encuestas y entrevistas (por segmentos o individuales) para conocer las expectativas de cada habitante, así como formaciones para un mantenimiento básico de los equipos a nivel doméstico y un uso eficiente de la electricidad. Aunque aún hay algunos aspectos a mejorar, a escala comunitaria, el modelo de gestión micro-empresarial ha mostrado resultados exitosos: tras un proceso de selección, se forma a un equipo de pobladores encargados del mantenimiento técnico y la gestión administrativa del proyecto, a cambio de un sueldo. Los sueldos, así como la sustitución de los equipos, se financian con la tarifa de pago que deben pagar los usuarios mensualmente, de acuerdo con su consumo. En paralelo, se acuerda que los equipos sean propiedad de la administración regional competente para que, en caso de necesidad, asegure la reparación o sustitución de los equipos, así como ampliaciones o remodelaciones del sistema.

4.4. Caso de estudio: Chiapas

Para finalizar la investigación, si bien la metodología desarrollada tiene un alcance general para cualquier contexto o región, se propone aplicar el estudio al contexto del estado de Chiapas (México). Este estado, está localizado al sur del país, se divide en 118 municipios y cuenta con una población de 4.796.580 habitantes, el 51% de los cuales se distribuye en localidades rurales. Chiapas cuenta con el IDH más bajo del país [54]. Existen aproximadamente 10.000 comunidades dispersas, de las cuales un 60% aproximadamente carecen de energía eléctrica, lo que supone alrededor de 40.000 viviendas [55].

Sin embargo, el país cuenta con un buen potencial en recursos energéticos, tanto solar como eólico e hidráulico; siendo un lugar presumiblemente oportuno para el desarrollo de proyectos basados en energías renovables. Según SIGER², (Herramienta de simulación y procesamiento de datos y de Sistemas de Información Geográfica)[56] la radiación solar media diaria es de aproximadamente de 5,66 kWh/m², en algunas zonas como se muestra en la Fig. 6. Indicando a Cintalapa con un punto rojo, debido a su bajo IDH en el estado y al gran número de localidades sin electrificar. Hasta el momento, se han instalado en el Estado de Chiapas cerca de 42 kW de capacidad con paneles solares en proyectos aplicados a comunidades marginadas. Se estima que para el 2019 se podrá tener una capacidad instalada de 457,96 kW de energía en paneles solares.

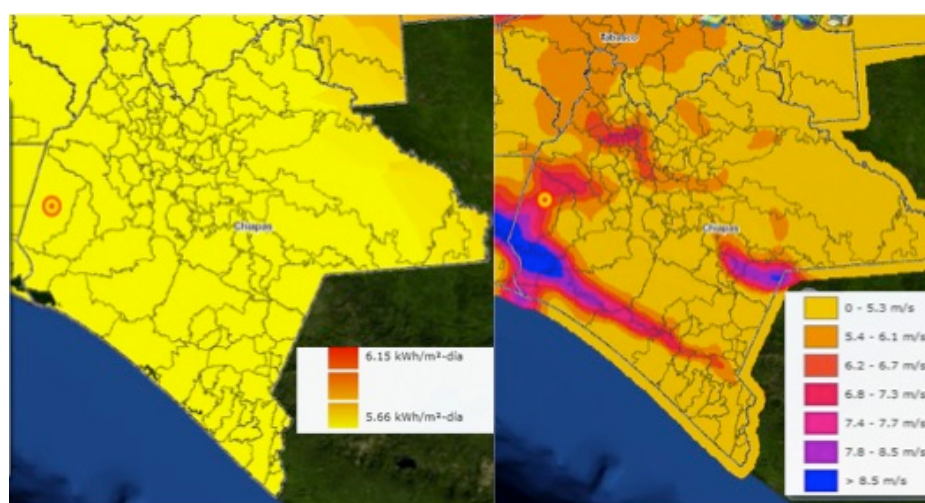


Fig. 6 Radiación global media anual (izquierda), velocidad media del viento (derecha). Chiapas.

En cuanto al recurso eólico, Chiapas cuenta, en algunas zonas, con el potencial adecuado como para desarrollar proyectos eólicos (Fig. 6 derecha). Los lugares con mayor potencial se encuentran en los municipios de Arriaga y Cintalapa (punto rojo en la Fig. 6), aprovechando el potencial remanente del Istmo de Tehuantepec. En ambos casos, se alcanzan velocidades del viento de hasta 8,5 m/s, a una altura de 50 m. En la Fig. 7 el SIGER, simula las zonas con el mayor potencial eólico de generación, señalando a Cintalapa como uno de los municipios con más alto potencial.

² Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables en México. Instituto de Investigaciones Eléctricas.

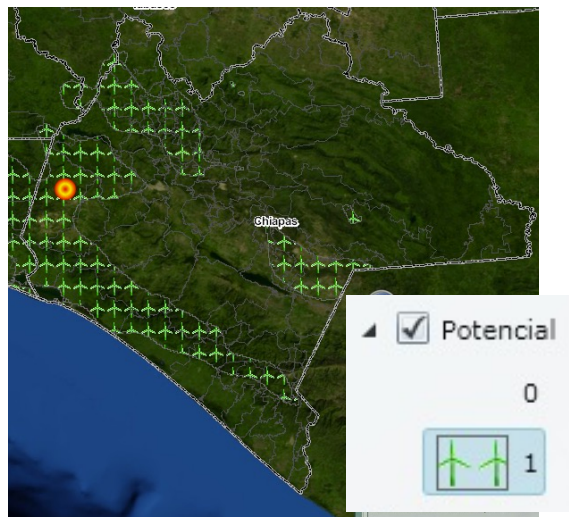


Fig. 7 Potencial de generación eoloeléctrico.

Finalmente, en relación con el recurso hidráulico, destacar que el 30% del agua superficial de México se encuentra en Chiapas. Los flujos de, al menos, unos 50 ríos tienen un alto potencial hídrico, debido a las pendientes y curvas, que permiten producir energía a través de los procesos de ósmosis, gravedad y presión mecánica [57]. Según datos de la SENER, el potencial mini-hidroeléctrico estimado es de aproximadamente 2.000 MW [58]. Actualmente, a través del Instituto de Energías Renovables, se está desarrollando en Chiapas el proyecto “Ejecución de estudios para la implementación de proyectos de energía eléctrica mediante fuentes renovables y convencionales en el Estado de Chiapas”, que tiene como objetivo desarrollar proyectos de generación hidroeléctrica por un valor total de 357 MW de potencia.

Como se ha visto, en materia de energías renovables, Chiapas posee una gran variedad de recursos naturales, que representan potenciales fuentes de energía para las comunidades rurales que no se encuentran electrificadas. De hecho, en los últimos años se han implementado proyectos enfocados en las comunidades aisladas. A continuación, se describen los dos proyectos más importantes en la zona:

- **Proyecto de electrificación rural fotovoltaica en municipios con muy alto y alto índice de rezago social en Chiapas (PERFMCH).**

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), encargada de la generación y distribución comercial de energía eléctrica en Chiapas, estructuró el Programa “Bandera Blanca”, que tiene por objeto la electrificación de 1.160 poblaciones rurales mayores de 100 habitantes, detectadas en el Censo de Población del 2010 [55]. La mayoría de estas localidades, por su dispersión y lo alejado de la red eléctrica, deben atenderse con sistemas autónomos. Por tanto, el Instituto de Energías Renovables de Chiapas, ha creado el programa “Electrificación rural fotovoltaica en municipios con muy alto y alto índice de rezago social en Chiapas”, con el objetivo de instalar 4.395 sistemas fotovoltaicos de 250 W, un sistema

de acumulación (dos baterías), un regulador y un inversor, en viviendas de 547 comunidades en 51 municipios de extrema pobreza, que no cuentan con el servicio de electricidad convencional y cuya viabilidad técnica ha sido demostrada a través de las evaluaciones de los recursos energéticos, así como los diagnósticos socioeconómicos de la comunidad.

- **Proyecto: Red de comunidades solares de Chiapas (RECOMSOL).**

La Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, está desarrollando el proyecto “Red de comunidades solares de Chiapas (Recomsol)”, que busca electrificar 8 comunidades (5 de las cuales indígenas) con la tecnología fotovoltaica, dando alcance a 800 habitantes y 200 viviendas, además de 9 escuelas. Todas las poblaciones tienen un alto grado de marginación [59]. Hasta el momento, se han electrificado dos comunidades:

- Comunidad El Tuzal: 3 centrales solares de 2,5 kW, 2 sistemas de bombeo de agua, 12 luminarias de exteriores, 1 refrigerador solar comunitario, 20 estufas ecológicas y 2 técnicos de la comunidad preparados para el mantenimiento.
- Comunidad Nuevo Amanecer Tenejapa: 3 centrales solares de 2,5 kW, 2 sistemas de bombeo de agua, 14 luminarias de exteriores, 1 refrigerador solar comunitario, 22 estufas ecológicas y 2 técnicos de la comunidad preparados para el mantenimiento.

Cabe destacar que la planificación de la electrificación utilizada en ambos proyectos, presenta una estandarización en el diseño de los sistemas y, entre otras limitaciones, no contempla la energía eólica, a pesar del buen recurso en la región [56]. Además, los proyectos consideran la distribución de la electricidad con sistemas individuales o con una única microrred para la distribución, sin combinar ambas alternativas, lo que ha demostrado tener ventajas significativas a pesar de la mayor dificultad de diseño [9]. Así, para adecuar el diseño a las características y condicionantes de cada región y contexto, la metodología propuesta pretende guiar a los planificadores de los programas de electrificación rural, logrando una mejora en la eficiencia y eficacia de los proyectos.

5. METODOLOGÍA, PLAN DE TRABAJO Y RESULTADOS ESPERADOS

En este capítulo se describirá la metodología de la tesis doctoral, que seguirá el orden del plan de trabajo y por último los resultados esperados, con las estancias académicas que se realicen durante la tesis .

5.1. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo que se empleará en la realización de la tesis doctoral se estructurará de la siguiente forma:

Análisis del estado del arte.

En esta fase, se ha llevado a cabo parte de la búsqueda y análisis de las referencias bibliográficas existentes, relacionadas con los temas de interés. La necesidad de implementar una metodología específica para el diseño de planes de electrificación en comunidades rurales se enfoca en la elección de las tecnologías apropiadas, en base a sus características a nivel regional. A partir de este análisis se amplía el estudio a bibliografías relacionadas con las metodologías de diseño de electrificación a nivel local, que se enfoca en conocer las necesidades de las viviendas y comunidades. Por último bibliografías de evaluaciones de programas que nos permitan extraer las recomendaciones para la implementación de un modelo de gestión.

Metodología a desarrollar.

Las conclusiones extraídas del estado del arte, nos permitirán definir los requisitos de la metodología a desarrollar que deberá cumplir con las siguientes características:

- Recopilación de datos socioeconómicos, energéticos, técnicos y geográficos.
- Facilitar la búsqueda de soluciones adecuadas al diseño de proyectos de electrificación y a la priorización de proyectos mediante la toma de decisiones a nivel regional.
- Facilitar la búsqueda de soluciones al diseño de proyecto detallado, en el ámbito local.
- Facilitar la búsqueda de soluciones al desarrollo de un modelo de gestión.
- Integración de la metodología global, mediante la recopilación de los datos obtenidos.

Validación de la metodología de diseño. Caso de estudio.

Finalmente, en esta fase se validará la metodología propuesta a un caso en Chiapas, México, donde se aplicará la metodología de electrificación rural propuesta.

Se plantearán las conclusiones de la tesis respecto a la metodología desarrollada y se propondrán aspectos para futuras investigaciones

Medios empleados

Para llevar a cabo la tesis doctoral se contará con la infraestructura y el soporte del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Organización de Empresas de la Universidad Politécnica de Cataluña. Ambas entidades son expertas y cuentan con una amplia experiencia en proyectos de diseño de electrificación rural, desde la concepción, el diseño, la simulación, la toma de decisiones, la priorización de los proyectos y la implementación en casos reales.

5.2. Plan de trabajo

A continuación se muestra la propuesta del plan de trabajo para la realización de la tesis doctoral.

- Investigación y recopilación bibliográfica (estado del arte), se contempla en gran parte del tiempo, principalmente para poder analizar y actualizar la bibliografía a lo largo de la tesis.
- Desarrollo de estructura de la metodología. El desarrollo de la metodología se divide en 4 partes principales:
 - Desarrollo de la definición de proyectos a escala regional, en los último seis meses del 2015 a partir de la presentación del plan de investigación.
 - Desarrollo del proyecto detallado, se realizará, con un tiempo aproximado de 6 meses para su realización.
 - Desarrollo del modelo de gestión, se realizará con un tiempo aproximado de 6 meses.
- Validación metodológica, el caso de estudio tiene un tiempo aproximado de 1 año .
- Publicación de artículos y presentaciones en congresos, se realizará en conjunto con los resultados finales de la tesis doctoral.
- Redacción de la tesis, se realizará en paralelo a medida que avance cada etapa de desarrollo, se espera realizar depósito y presentación, a finales del año 2017.

Diagrama de Gantt

ACTIVIDADES		FECHA												
		2014	2015				2016				2017			
		4to	1er	2do	3er	4to	1er	2do	3er	4to	1er	2do	3er	4to
1	Investigación y Recopilación bibliográfica													
2	Desarrollo de estructura de la metodología													
3	Desarrollo de la definición de proyectos a escala regional.													
5	Desarrollo del Proyecto detallado													
4	Desarrollo del modelo de gestión													
5	Validación de la metodología													
6	Redacción de la tesis													
7	Publicación de artículo y/o congresos.													
8	Preparación de la presentación y presentación de la tesis.													

Los programas y herramientas necesarias para la realización de la tesis son las siguientes:

- ArcGIS, para el proceso de información como los recursos y digitalización de los mapas . IntiGIS, para la comparación de tecnologías.
- Herramientas ofimáticas (Word, Excel, Power Point) y Látex para la elaboración de documentos, tablas y presentaciones.

5.3. Contribuciones esperadas del trabajo

El resultado final de esta tesis, es proporcionar a los planificadores, una metodología que permita obtener la solución a los problemas de diseño de electrificación en comunidades rurales de manera sostenible y adecuada, adaptada a su entorno socioeconómico, tecnológico y a los recursos disponibles.

La metodología permitirá el diseño del sistema de electrificación rural más adecuado a las necesidades de los usuarios, mediante los métodos de definición de proyectos a escala regional, diseño de proyecto detallado, y modelo de gestión. Esto aportará a los promotores de la electrificación rural un ahorro de tiempo en el diseño de proyectos.

Finalmente se documentará un caso de estudio en comunidades rurales sin electrificar del Estado de Chiapas, México, tomando en cuenta los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales, que se adapten a las necesidades y preferencias de los usuarios.

5.4. Resultados académicos

Hasta el momento, se están preparando un artículo para una revista indexada en el JCR y

3 ponencias a congresos internacionales (dos de ellos, ya aceptados).

- D. Gómez B. Domenech L. Ferrer-Martí, “Evaluación de la planificación regional de electrificación rural mediante energías renovables en comunidades aisladas.” *DYNA*, 2015.
- D. Gómez B. Domenech L. Ferrer-Martí, “Review and analysis of stand-alone electrification projects in Latin-American rural communities”, XI Congreso Latinoamericano de Electricidad, Generación y Transmisión, CLAGTEE 2015, 8-11 noviembre 2015, São José dos Campos – Brasil.
- D. Gómez B. Domenech L. Ferrer-Martí, 3er coloquio sobre energía. 2-5 septiembre 2015, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México, con el tema “Revisión y análisis de 3 proyectos de electrificación independientes en comunidades rurales de América”.
- D. Gómez B. Domenech L. Ferrer-Martí, Global Cleaner Production & Sustainable Consumption Conference, Barcelona, 1-4 de noviembre 2015, Evaluation of regional planning of rural electrification with renewable energy in isolated communities.

5.5. Estancias Financiadas

Se ha previsto una estancia en el Estado de Chiapas, México en los meses de julio y agosto, financiada por el Centro de Cooperación para el Desarrollo (CCD), de la UPC, bajo el proyecto CCD2015-O026, cuyos responsables son los directores de esta tesis doctoral.

En esta estancia se pretenden visitar los proyectos de electrificación rural de la Universidad Politécnica de Chiapas y de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas en las comunidades rurales del Estado con el proyecto “Red de Comunidades Solares”.

Se realizará una visita al Instituto de Energías Renovables del Estado de Chiapas que pondrá en marcha el “Proyecto de electrificación rural fotovoltaica en municipios con muy alto y alto índice de rezago social en Chiapas”.

6. REFERENCIAS

- [1] A. Midilli, I. Dincer, and M. Ay, "Green energy strategies for sustainable development," *Energy Policy*, vol. 34, no. 18, pp. 3623–3633, 2006.
- [2] Ipcc, "Climate Change 1995: A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," *Change*, p. 63, 1995.
- [3] N. Stern, "The Economics of Climate Change," *Stern Rev.*, p. 662, 2006.
- [4] AGECC, "Energy for a Sustainable Future. Grupo Asesor del Secretario General sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas," *PNUD*, no. April 2010, pp. 1–22, 2010.
- [5] A. Telesetsky, "10. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)," *Yearb. Int. Environ. Law*, vol. 24, no. 1, pp. 580–585, Jan. 2014.
- [6] B. Domenech, "Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales," Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [7] Iea, "World Energy Outlook. Executive Summary," 2013.
- [8] G. Bekele and G. Tadesse, "Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia," *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 5–15, 2012.
- [9] B. Domenech, L. Ferrer-Martí, P. Lillo, R. Pastor, and J. Chiroque, "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.*, vol. 23, pp. 275–285, 2014.
- [10] L. Ferrer-Martí, A. Garwood, J. Chiroque, B. Ramirez, O. Marcelo, M. Garfí, and E. Velo, "Evaluating and comparing three community small-scale wind electrification projects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 5379–5390, 2012.
- [11] I. Pinedo Pascua, *IntiGIS: Propuesta metodológica para la evaluación de alternativas de electrificación rural basada en SIG*. 2010.
- [12] P. Álvarez, J. José, and S. Inarejos, "Energy Planning and Sustainable Development.," pp. 1–18, 2005.
- [13] F. Carlos, "Planeamiento energético ¿Para qué sirve y cómo se hace?," *Com. Nac. Energía Atómica*, vol. 15, pp. 11–23.
- [14] J. Amador, "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," Universidad Politécnica de Madrid, 2000.

- [15] C.-W. Shyu, "Rural electrification program with renewable energy sources: An analysis of China's Township Electrification Program," *Energy Policy*, vol. 51, pp. 842–853, 2012.
- [16] R. Mawhood and R. Gross, "Institutional barriers to a 'perfect' policy: A case study of the Senegalese Rural Electrification Plan," *Energy Policy*, vol. 73, pp. 480–490, 2014.
- [17] R. Escobar and D. Vilar, "Promoting and Improving Renewable Energy Projects Through Local Capacity Development," *Renew. Energy*, 2012.
- [18] M. Giannini, M. A. Vasconcelos, and N. Fidelis, "Rural electrification and energy poverty: Empirical evidences from Brazil," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, pp. 1229–1240, 2010.
- [19] Z. Zhou, W. Wu, Q. Chen, and S. Chen, "Study on sustainable development of rural household energy in northern China," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 8, pp. 2227–2239, Oct. 2008.
- [20] R. C. Poudel, "Quantitative decision parameters of rural electrification planning: A review based on a pilot project in rural Nepal," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 291–300, 2013.
- [21] J. Gutierrez-Vera, "Options for rural electrification in Mexico," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 7, no. 3, pp. 426–433, 1992.
- [22] I. Arraiz; C. Calero, "From Candles to Light: From Candles to Light:," no. May, 2015.
- [23] H. Camblong, J. Sarr, a. T. Niang, O. Curea, J. a. Alzola, E. H. Sylla, and M. Santos, "Micro-grids project, Part 1: Analysis of rural electrification with high content of renewable energy sources in Senegal," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 2141–2150, 2009.
- [24] J. A. Alzola, I. Vechiu, H. Camblong, M. Santos, M. Sall, and G. Sow, "Microgrids project, Part 2: Design of an electrification kit with high content of renewable energy sources in Senegal," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 2151–2159, Oct. 2009.
- [25] J. Leary, A. While, and R. Howell, "Locally manufactured wind power technology for sustainable rural electrification," *Energy Policy*, vol. 43, pp. 173–183, Apr. 2012.
- [26] J. A. Cherni, I. Dyner, F. Henao, P. Jaramillo, R. Smith, and R. O. Font, "Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system," *Energy Policy*, vol. 35, no. 3, pp. 1493–1504, Mar. 2007.
- [27] A. B. Kanase-Patil, R. P. Saini, and M. P. Sharma, "Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 1342–1349, 2010.

- [28] J. Van Hoesen and S. Letendre, "Evaluating potential renewable energy resources in Poultney, Vermont: A GIS-based approach to supporting rural community energy planning," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 2114–2122, 2010.
- [29] E. Kaijuka, "GIS and rural electricity planning in Uganda," *J. Clean. Prod.*, vol. 15, no. 2, pp. 203–217, 2007.
- [30] J. Domínguez and I. Pinedo-Pascua, "GIS tool for rural electrification with renewable energies in Latin America," *Proc. Int. Conf. Adv. Geogr. Inf. Syst. Web Serv. GEOWS 2009*, pp. 171–176, 2009.
- [31] B. Corral, J. Domínguez, and M. Serrano, "Análisis de Competitividad Tecnológica para la Electrificación Rural del Municipio de Enseñana, México.," *Inf. Técnicos Ciemat*, 2013.
- [32] C. E. Camargo, M. L. Vidotto, R. K. Niedzialkoski, S. N. M. De Souza, L. I. Chaves, T. Edwiges, D. B. Dos Santos, and I. Werncke, "Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 151–157, 2014.
- [33] O. Hafez and K. Bhattacharya, "Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids," *Renew. Energy*, vol. 45, pp. 7–15, Sep. 2012.
- [34] R. Dufo-López and J. Bernal-Agustín, "iHOGA (Hybrid Optimization by Genetic Algorithms) software." 2011.
- [35] M. Fadaeenejad, M. a M. Radzi, M. Z. a Abkadir, and H. Hizam, "Assessment of hybrid renewable power sources for rural electrification in Malaysia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 299–305, 2014.
- [36] L. Ferrer-Martí, B. Domenech, a. García-Villoria, and R. Pastor, "A MILP model to design hybrid wind-photovoltaic isolated rural electrification projects in developing countries," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 226, pp. 293–300, 2013.
- [37] B. Domenech, L. Ferrer-Martí, and R. Pastor, "Including management and security of supply constraints for designing stand-alone electrification systems in developing countries," *Renew. Energy*, vol. 80, pp. 359–369, Aug. 2015.
- [38] A. Yadoo and H. Cruickshank, "The value of cooperatives in rural electrification," *Energy Policy*, vol. 38, no. 6, pp. 2941–2947, 2010.
- [39] C. W. Shyu, "End-users' experiences with electricity supply from stand-alone mini-grid solar PV power stations in rural areas of western China," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 17, no. 4, pp. 391–400, 2013.
- [40] T. Sánchez, A. Williams, and N. Smith, "The critical factors for success of stand alone energy schemes," 2006.
- [41] PA, "Practical Action," 2014.

- [42] B. Van-Campen, D. Guidi, and G. Best, "Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles," *Doc. Trab. sobre Medio Ambient. y Recur. Nat.*, vol. 3, no. 3, pp. 1–90, 2000.
- [43] S. N. Uddin and R. Taplin, "Trends in renewable energy strategy development and the role of CDM in Bangladesh," *Energy Policy*, vol. 37, no. 1, pp. 281–289, 2009.
- [44] S. Sánchez, E. Torres, and R. Kalid, "Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 278–290, 2015.
- [45] M. A. H. Mondal, L. M. Kamp, and N. I. Pachova, "Drivers, barriers, and strategies for implementation of renewable energy technologies in rural areas in Bangladesh-An innovation system analysis," *Energy Policy*, vol. 38, no. 8, pp. 4626–4634, 2010.
- [46] J. C. Rojas-Zerpa and J. M. Yusta, "Methodologies, technologies and applications for electric supply planning in rural remote areas," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 20, pp. 66–76, 2014.
- [47] S. Hirmer and H. Cruickshank, "The user-value of rural electrification: An analysis and adoption of existing models and theories," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 145–154, 2014.
- [48] B. J. Ruiz, V. Rodríguez, and C. Bermann, "Analysis and perspectives of the government programs to promote the renewable electricity generation in Brazil," *Energy Policy*, vol. 35, no. 5, pp. 2989–2994, 2007.
- [49] F. S. Javadi, B. Rismanchi, M. Sarraf, O. Afshar, R. Saidur, H. W. Ping, and N. a. Rahim, "Global policy of rural electrification," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 402–416, 2013.
- [50] H. Rudnick, J. Mutale, D. Chattopadhyay, and R. Saint, "Studies in empowerment: Approaches to rural electrification worldwide," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 12, no. 4, pp. 35–41, 2014.
- [51] N. C. Lee and V. M. S. Leal, "A review of energy planning practices of members of the Economic Community of West African States," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 202–220, 2014.
- [52] H. Eunnyeong, K. Jinsoo, and B. Kyung-Jin, "Analysis of the assessment factors for renewable energy dissemination program evaluation using fuzzy AHP," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 8, pp. 2214–2220, 2010.
- [53] J. Mundo-Hernández, B. De Celis Alonso, J. Hernández-Álvarez, and B. De Celis-Carrillo, "An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 639–649, 2014.
- [54] "Índice de Desarrollo Humano Municipal: nueva metodología," MÉXICO, 2014.
- [55] INEGI, "Censo de Población y Vivienda," 2010.

- [56] “Gerencia de Energías Renovables” Instituto de Investigaciones Eléctricas, “Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables en México,.” [Online]. Available: <http://sag01.iie.org.mx/siger>.
- [57] I. en E. R. del E. de Chiapas, “Programa especial para el desarrollo de las energías renovables del Estado de Chiapas,” *Gob. del Estado Chiapas*, p. 80, 2015.
- [58] SENER, “Estadísticas destacadas del sector energético Marzo 2013,” pp. 3–10, 2013.
- [59] U. de C. y A. de Chiapas, “Red de comunidades solares de Chiapas,” *UNICACH*, 2014. [Online]. Available: http://www.unicach.mx/_/masterpage.php?pag=3INFORM3.
- [60] H. Baldivieso, E. Detta, D. Martin, and G. Quintanilla, “¿Es el sector eléctrico una restricción activa al crecimiento económico de Nicaragua?,” p. 34, 2012.