



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Doctorado en Sostenibilidad

Tesis Doctoral

Metodología de evaluación de la sostenibilidad de proyectos de
electrificación rural

Doctorando

Alejandro Esteban López González

Directores:

Dra. Laia Ferrer Martí¹

Dr. Bruno Doménech Léga²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya

²Departamento de Organización de Empresas, Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, diciembre de 2018

ÍNDICE GENERAL

Resumen	3
Abstract	4
Agradecimientos	5
1 Introducción	6
2 Objetivos	10
3 Marco teórico general	13
3.1 Energía y sostenibilidad	13
3.2 La evaluación de la sostenibilidad en proyectos de electrificación rural	15
3.3 Las evaluaciones de proyectos o programas según su perspectiva	16
3.4 Las evaluaciones de proyectos o programas según su propósito	16
3.5 Las evaluaciones de proyectos o programas según su fase	18
3.6 Análisis del marco teórico	20
4 Artículo # 1 Lifetime, cost and fuel efficiency in diesel projects for rural electrification in Venezuela	21
4.1 Resumen del artículo	21
4.2 Referencia del artículo	21
5 Artículo # 2 Sustainability and design assessment of rural hybrid microgrids in Venezuela	32
5.1 Resumen del artículo	32
5.2 Referencia del artículo	32
6 Artículo # 3 Formative evaluation of sustainability in rural electrification programs from a management perspective: A case study from Venezuela	47
6.1 Resumen del artículo	47
6.2 Referencia del artículo	47
7 Conclusiones e investigaciones futuras	63
7.1 Conclusiones	63
7.2 Investigaciones futuras	64
Referencias	66

*¡Ay de los que juntan casa a casa, y
añaden heredad a heredad hasta ocuparlo todo!
¿Habitareis vosotros solos en medio de la tierra?
Libro de Isaías Capitulo 5 verso 8 (Año 800 A.C)*

*El hombre vuelve una vez más a vivir en
una caverna, pero la caverna ahora está contaminada, el obrero no
tiene más que el precario derecho a vivir en ella (...) y puede
desahuciársele en cualquier momento. El abandono universal,
antinatural, se convierte en elemento de vida para él.
Karl Marx, “Manuscritos económicos y filosóficos” (Año 1844 D.C)*

RESUMEN

En la actualidad, alrededor de 1.200 millones de personas permanecen sin acceso a la electricidad en zonas rurales de África, Asia y América Latina. Hasta la fecha, los programas de electrificación rural se han desarrollado mayoritariamente utilizando tecnologías convencionales basadas en combustibles fósiles y/o la ampliación de la cobertura de las redes eléctricas de transmisión y distribución. Además, en los últimos años se ha comenzado a considerar técnicamente factible la electrificación rural con energías renovables o fuentes alternativas de energía. Sin embargo, es necesario mejorar los métodos de evaluación de los programas y proyectos implementados, con la finalidad de conocer con certeza bajo qué condicionantes es más conveniente una u otra tecnología. Así, se espera favorecer la participación de gobiernos regionales y nacionales en programas de electrificación rural a largo plazo, para incrementar el acceso universal a la electricidad.

En este contexto, el objetivo principal de esta tesis doctoral es proponer una metodología de evaluación de programas de electrificación rural para promover su mejora continua, en términos de diseño e implementación. En este sentido, se busca un enfoque formativo, ya que los programas en curso requieren de elementos para la mejora continua. Además, se asume una perspectiva de gestión, ya que los resultados se presentan de forma adecuada para los líderes del programa de modo que se pueda mejorar la implementación aplicando las modificaciones adecuadas, cuando y donde sea necesario. La metodología propuesta considera una evaluación completa en 4 dimensiones de sostenibilidad: ambiental, técnica, socioeconómica e institucional; a su vez compuestas por 15 criterios que permiten analizar en detalle el diseño y la implementación del programa. Los criterios se evalúan mediante unos indicadores que consideran las características específicas de cada proyecto dentro del programa a estudiar. Los resultados de la aplicación de la metodología permiten ponderar, sobre una base objetiva, la efectividad de los programas de electrificación basados en tecnologías energéticas renovables (Renewable Energy Technologies, RET) en comparación con la extensión de la red eléctrica convencional y/o los grupos electrógenos.

Para el desarrollo de la metodología de evaluación propuesta en esta tesis doctoral, entre 2016 y 2018, se han realizado visitas a 24 comunidades rurales en Venezuela, electrificadas con energías renovables o grupos electrógenos, desde el extremo sureste (bosque tropical lluvioso), en la frontera con Brasil, hasta el extremo noroeste (desierto), en la frontera con Colombia, pasando por el Cordillera de los Andes (montaña congelada), en un recorrido de más de 2.200 kilómetros que ha permitido considerar diferentes contextos sociales y climáticos. Las visitas han servido para identificar con claridad las dimensiones que definen la sostenibilidad de los proyectos, así como los criterios e indicadores a considerar para su evaluación. Posteriormente, la metodología propuesta se ha aplicado a las comunidades electrificadas con energías renovables del programa venezolano “Sembrando Luz” que hasta la fecha ha llegado a 900 comunidades rurales, y se espera que beneficie a 2.020 comunidades más en un futuro cercano, utilizando energías renovables. En este sentido, la metodología de evaluación promueve una mejora continua en favor del acceso universal a la electricidad en las comunidades rurales de Venezuela, y las lecciones aprendidas pueden ser útiles para el desarrollo de iniciativas similares en otros países en vías de desarrollo.

ABSTRACT

Currently, around 1.2 billion people remain without access to electricity in rural areas of Africa, Asia and Latin America. To date, rural electrification programs have been carried out mainly using conventional technologies based on fossil fuels and/or expanding the coverage of transmission and distribution networks. In addition, in recent years, rural electrification with renewable energy or alternative energy sources has begun to be considered technically feasible. However, it is necessary to improve the evaluation methods of implemented programs and projects in order to know with certainty under which determining one or another technology becomes more convenient. Thus, the participation regional and national governments is expected to be promoted in long-term rural electrification programs, to increase universal access to electricity.

In this context, the main objective of this PhD thesis is to propose an evaluation methodology of rural electrification programs to promote their continuous improvement, in terms of design and implementation. In this sense, a formative approach is sought, since ongoing programs require elements for continuous improvement. In addition, a management perspective is assumed, as the results are presented in an appropriate manner for program leaders so as the implementation can be improved by applying the appropriate modifications, when and where needed. The proposed methodology considers a complete evaluation in 4 sustainability dimensions: environmental, technical, socioeconomic and institutional; in turn organised in 15 criteria that allow to analyse in detail the design and implementation of the program. The criteria are evaluated through some indicators that consider the specific characteristics of each project within the program to be studied. The results of the application of the methodology allow weighting, on an objective basis, the effectiveness of electrification programs based on renewable energy technologies (RET) in comparison with the conventional electricity grid extension and/or diesel generators.

In order to develop the evaluation methodology proposed in this PhD thesis, from 2016 to 2018, visits have been made to 24 rural communities in Venezuela, electrified with renewable energy or diesel generators, from the extreme southeast (rainforest), on the border with Brazil, up to the extreme northwest (desert), on the border with Colombia, going through the Andean Cordillera (frozen mountain), in a journey of more than 2,200 kilometres that has allowed to consider different social and climatic contexts. The visits have been useful to clearly identify the dimensions that define projects sustainability, as well as the criteria and indicators to be considered for their evaluation. Subsequently, the proposed methodology has been applied to the electrified communities with renewable energy of the Venezuelan program “Sembrando Luz” (*Sowing Light*) that has reached 900 rural communities to date, and is expected to benefit 2,020 more in the near future, using renewable energy. In this regard, the evaluation methodology promotes continuous improvement in favour of universal access to electricity in the rural communities of Venezuela, and the lessons learned can be useful for the development of similar initiatives in other developing countries.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis Laia Ferrer-Martí y Bruno Domenech Lega por su invaluable apoyo: personal, académico y técnico, así como su consideración, paciencia y atención durante el desarrollo de esta investigación y consecuente tesis doctoral. Sin el esfuerzo y atento seguimiento de ambos, este logro habría sido imposible de alcanzarse.

Agradezco al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España (proyecto ENE 2015-67253-R) por el financiamiento de todo este proyecto de investigación y consecuente tesis doctoral. Agradezco al Centro de Cooperación al Desarrollo (CCD) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) por el financiamiento y atento seguimiento a las visitas de campo realizadas en Venezuela durante los años 2016, 2017 y 2018. El apoyo institucional tanto del CCD como de la UPC han sido fundamentales.

A mis compañeros del Instituto de Organización y Control (IOC) de la Escuela de Ingeniería Industrial y a los compañeros de sala en el departamento de ingeniería mecánica de la escuela de ingeniería industrial de la UPC, por su solidaria comprensión en todo momento, durante la realización de mi trabajo y tesis doctoral. A todos los profesores por su amable acogida dentro de su entorno de trabajo y diario compartir. A mis excompañeros y siempre amigos de Petróleos de Venezuela, S.A, Ministerio de Energía Eléctrica de Venezuela, La Universidad del Zulia, La Universidad de Trabajadores “Jesús Rivero”, Universidad Pública de Navarra y Universidad Politécnica de Madrid, tanto a mis maestros como alumnos. De todos he aprendido algo y a todos debo alguna parte de esta tesis doctoral, nombrar a cada uno sería imposible. A los trabajadores y técnicos de Fundelec y Corpoelec que me han ayudado. Afectuosamente agradezco a mis amigos que luchan toda la vida, a ustedes los imprescindibles del poema de Brecht. Nada me halagaría más que, al final del viaje, tener en mi cuenta la medida de un instante relativo a vuestro tiempo de lucha y de vida de servicio.

Mi agradecimiento más cálido y sentido a mis padres Ángel López Velásquez y Elizabeth González Briceño, por todo el amor y dedicación que han tenido para conmigo en casi cuatro décadas de vida. Su paciencia, comprensión, dedicación y cariño incondicional han sido determinantes en que haya podido mantenerme en el camino de una vida sencilla y feliz en todos estos años, por encima de mis debilidades. Si algún día llego a ser útil a algo o alguien, durante el brevísimo lapso en el que transcurriré, será exclusivamente gracias a ustedes. A mis hermanos, Mariela y Leonardo, por su incondicional solidaridad de verdaderos hermanos, de sangre y de vida.

A mi patria Venezuela y su generosa tierra, por haberme proporcionado los alimentos, educación, salud y trabajo que me han traído hasta este momento y lugar; por poner el barro que ha servido al buen alfarero. Ciertamente, *hasta aquí me ha ayudado Dios* (1 Samuel 7:12); y a mi Señor Jesucristo rindo agradecimiento eterno por haberme traído de *las tinieblas a su luz admirable* (1 Pedro 2:9).

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, alrededor de 1.200 millones de personas permanecen sin acceso a la electricidad en los países menos industrializados del mundo [1]. Solo en América Latina, 22 millones de personas carecen de este servicio, principalmente en países como Bolivia, Colombia, Guatemala, Haití, Nicaragua y Perú [1]. La falta de electricidad es una de las barreras más importantes para superar la pobreza [1]. Por lo tanto, el acceso a una electricidad confiable, sostenible y moderna [2], es indispensable para lograr los objetivos de desarrollo sostenible tales como la erradicación de la pobreza extrema [3], el aumento de la producción de alimentos, el acceso a servicios de agua potable y salud pública, el aumento de oportunidades económicas, la igualdad de género y una educación de calidad [4]. En este sentido, existe una clara relación entre el Índice de Desarrollo Humano (IDH) y el consumo eléctrico per cápita. En concreto, se ha observado que para países o regiones con bajo o nulo acceso a la electricidad, pequeños incrementos en el acceso a la electricidad (de hasta unos 5.000 kWh per cápita al año), conllevan una notable mejora en la calidad de vida de las personas. Sin embargo, para lograr un impulso al desarrollo, el acceso a la electricidad requiere suministrar la cantidad de energía necesaria y no únicamente un punto de conexión a la red o a una tecnología que podría suministrar niveles limitados o insuficientes de energía.

De acuerdo con los datos registrados por Agencia Internacional de la Energía (AIE) [5], en los últimos años la tasa global de electrificación ha aumentado menos del 1% interanual; lo que es lo mismo que la tasa de crecimiento de la población mundial y, por tanto, no se está logrando reducir la población sin acceso a la electricidad. Además, esta tasa global de electrificación se debe principalmente a la expansión de las redes urbanas y, en mucha menor medida, a nuevos puntos de acceso a la electricidad en comunidades rurales aisladas. La población sin acceso a la electricidad tiende a estar dispersa en territorios extensos y apenas accesibles, por lo que las posibilidades de expansión de las redes convencionales de transmisión y distribución eléctrica son muy limitadas [6], debido a la barrera económica y las dificultades técnicas de una electrificación centralizada. Alternativamente, los sistemas autónomos de electrificación rural son una opción técnicamente factible, cuya aplicación se ha venido incrementando a medida que los costes han ido disminuyendo gracias al avance en las tecnologías respectivas. En cuanto a fuentes de generación, dichos sistemas pueden estar basados en energías fósiles, como el diésel o la gasolina, o en energías renovables, como la eólica, la solar, la hidroeléctrica o el biogás, entre otras. Además, se han venido desarrollando arquitecturas híbridas que emplean dos o más tecnologías de generación eléctrica (convencionales y/o alternativas) para brindar electricidad a un conjunto de viviendas o infraestructuras comunitarias.

El uso de tecnologías convencionales de electrificación rural para sistemas aislados seguirá siendo importante durante las próximas décadas debido a su difusión y sus bajos costes relativos a la inversión del capital inicial, el financiamiento y los plazos de amortización. Hasta 2012, el 71% de la electrificación en el mundo se llevó a cabo mediante la extensión de la red y el uso de combustibles fósiles: 45% de carbón, 19% de gas natural y 7% de diésel y otros derivados del petróleo; y en 2017 se compraron alrededor de 380.000 unidades de generación diésel en países en desarrollo [7]. En regiones como África, se acrecienta la posibilidad de que la

electrificación rural se ejecute con medios convencionales debido a que, en los últimos cinco años, casi el 30% de los nuevos descubrimientos de petróleo y gas del mundo se hicieron allí. Un riesgo similar existe en zonas de Asia, América Latina y Medio Oriente [8]. A diferencia de los países industrializados, en muchos países en vías de desarrollo existen importantes yacimientos de recursos energéticos fósiles o mecanismos de cooperación mutua, por medio de los cuales el coste de los combustibles puede ser menor para ellos. Por ejemplo, países como Cuba, han basado su electrificación rural en sistemas de combustión interna que utilizan gasoil como fuente primaria de energía. Dicho país genera hasta un 40% del total nacional de su energía eléctrica con grupos electrógenos debido a que, desde el año 2005, reciben alrededor de 90.000 barriles diarios de derivados de petróleo por medio de convenios de cooperación con la República Bolivariana de Venezuela [9]. De hecho, se espera que el 40% de las nuevas conexiones en todo el mundo hasta el 2030 se realizará a través de tecnologías convencionales, incluido el diésel [10]. Este es un aspecto que se debe tener muy en cuenta al considerar que la electrificación rural tiene como prioridad el acceso a la energía y el desarrollo sostenible de las comunidades; y en eso es fundamental los niveles de energía que una determinada tecnología pueda brindar. Por tanto, en la medida que las tecnologías convencionales sean capaces de brindar más kWh/año por cada US\$ invertido, serán una opción técnica y económicamente factible para los países en vías de desarrollo. Así, es importante mejorar su eficiencia debido a que no se puede frenar su instalación. En otras palabras, reducir el consumo específico de combustible (l/kWh) es una tarea fundamental en favor de la mitigación del efecto de estas tecnologías en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Paralelamente, los sistemas autónomos de generación basados en energías renovables han demostrado ser adecuados, tanto técnica como económicamente, en ciertas regiones remotas donde resultan más baratos que la inversión requerida en redes de transmisión y distribución a gran escala para suplir una pequeña cantidad de viviendas rurales con poco consumo eléctrico [11]. En esta línea, la AIE estima que para alcanzar en el 2040 la meta de electrificar a un 70% de las comunidades sin acceso al servicio eléctrico, se deben emplear este tipo de sistemas [8]. Cabe destacar que el África subsahariana tiene abundancia en recursos energéticos renovables que permanecen sin ser aprovechados hasta el momento. En particular, hay una excelente disponibilidad solar en toda África, disponibilidad hidroeléctrica en muchos países, energía eólica principalmente en zonas costeras y energía geotérmica en el África Oriental [12]. Una abundancia similar de recursos renovables se puede encontrar en extensas regiones de América Latina y Asia. La utilización de recursos renovables en la electrificación de zonas rurales de los países en vías de desarrollo garantiza que las fuentes necesarias para la generación eléctrica sean accesibles en cualquier lugar del mundo. Además, no se incrementan en exceso las emisiones de CO₂ y dichas regiones no dependen de las redes centralizadas de comercialización de hidrocarburos y distribución de derivados del petróleo para sustentar su servicio eléctrico. De hecho, entre 2007 y 2016, la capacidad instalada en RET para las áreas rurales aisladas se ha quintuplicado [13], suministrando energía a casi 300 millones de personas [14]. De estos sistemas, el 86% se puede encontrar en países en desarrollo en África, Asia y América Latina. Entre las tecnologías utilizadas, la energía fotovoltaica (FV) aumentó del 17% de la capacidad instalada total en 2007 a casi el 50% en 2016 [13], mientras que la cantidad restante de proyectos basados en RETs, aumentó del 30% al 41% en el mismo período (eólicos e

hidroeléctricos, entre otros). Según las Naciones Unidas [15], esta tendencia debe mantenerse o incrementarse en los próximos años para lograr el acceso universal a una energía adecuada, moderna y libre de contaminación en 2030.

A pesar del desarrollo de energías renovables para electrificación rural fuera de la red, la mayoría de los inversionistas privados todavía consideran que tales proyectos no son viables ni rentables económicamente, lo que ha sido una limitación importante para los programas de electrificación rural a gran escala basados en RET [16]. En consecuencia, muchos proyectos en países en desarrollo han sido realizados por organizaciones no gubernamentales (ONG), con un impacto limitado en los indicadores nacionales y los índices de electrificación rural (REI). Por ejemplo, Perú, con el mayor número de viviendas no electrificadas en América Latina [17], es el país que más proyectos de electrificación rural ha recibido de las ONG. Sin embargo, solo la intervención directa del gobierno nacional, entre 2007 y 2013, llevó a un aumento del 60% en el REI interanual, por primera vez en la historia del país [18]. En casos como Brasil [19][20], Bolivia [21], Ecuador [22][23] y Venezuela [24], se puede observar una tendencia similar. En realidad, aunque la cooperación tecnológica internacional es beneficiosa, la participación activa de los gobiernos es esencial para el diseño y la implementación efectivos de los programas de electrificación rural basados en RET a escala regional y nacional [25]. De acuerdo con la evidencia en países sudamericanos, las tasas de electrificación rural necesarias para alcanzar un pleno acceso a la energía se alcanzarán a través de la participación mayoritaria de los gobiernos nacionales. En consecuencia, es necesario hacer mayor hincapié en la evaluación de programas nacionales de electrificación rural para identificar sus fortalezas y limitaciones, reduciendo el temor frente a estas iniciativas por parte de promotores e inversionistas. En concreto, es imperativo desarrollar metodologías de evaluación que aporten elementos para la mejora continua de los planes y programas nacionales cuyo objetivo sea la reducción de la pobreza energética y el incremento del acceso a la energía.

Respecto a la evaluación de programas de electrificación rural o grupos de proyectos de este tipo, Pereira et al. [26] estudiaron iniciativas en Brasil, China e India, concluyendo que la evaluación debe ser un mecanismo incluido en el proceso de planificación para mejorar la toma de decisiones mediante la generación de información para decidir sobre la realineación de los objetivos iniciales del programa. Por otra parte, Slough et al. [20] realizaron una evaluación del programa “*Luz para todos*” en Brasil. El trabajo discute la relación entre la electrificación rural y el IDH. Terrapon-Pfaff et al. [3] evaluaron 23 proyectos de electrificación rural con energías renovables en países en desarrollo como Camerún, India, México y Perú, entre otros. La metodología propuesta por estos autores se centra en analizar las necesidades del usuario final, los modelos de gestión y finanzas, y los problemas geográficos, para determinar las condiciones que influyen en el éxito o el fracaso de los proyectos. Mainali et al. [27] introdujeron un método para evaluar el estado de la sostenibilidad en los programas de electrificación rural en los países en desarrollo, utilizando un nuevo indicador compuesto: el índice de sostenibilidad energética. Los resultados se aplicaron a Bangladesh, China, Ghana, India, Sudáfrica y Sri Lanka entre 1990 y 2010. Finalmente, Urmee et al. [28] propusieron un conjunto de criterios para la evaluación de programas basados en sistemas solares domésticos, considerando un enfoque inverso para la

electrificación rural: el alivio de la pobreza y la mejora de la calidad de vida se presentan antes del desarrollo socioeconómico. Sin embargo, es difícil extraer de estos programas las lecciones aprendidas necesarias para la mejora continua de los programas de electrificación rural, que son necesarias para los tomadores de decisión dentro de las instituciones gubernamentales vinculadas a la electrificación rural.

Con objeto de superar las barreras existentes en programas de electrificación rural basados en RET, se deben recopilar datos reales verificables, medir los impactos en la sostenibilidad y presentar los resultados de forma clara y concisa a los responsables de la toma de decisiones en el mismo sitio de implementación de los proyectos. Sin embargo, se han publicado pocos estudios sobre evaluaciones empíricas del impacto del acceso a la electricidad en las diferentes dimensiones de la sostenibilidad. En este sentido, las metodologías de evaluación deben distinguirse claramente de las que se han venido utilizando para los programas de electrificación urbana, comercial y/o industrial [29]. La principal diferencia es que la electrificación rural debe centrarse en el alivio de la pobreza y la mejora de la calidad de vida diaria del usuario final [28]. Según Zomers [30], los objetivos de los programas de electrificación rural se pueden agrupar en cuatro categorías: económica, social, política y ambiental. En la práctica, algunos objetivos se logran simultáneamente y están interrelacionados, reduciéndose así los grupos a: socioeconómicos, institucionales o políticos y ambientales. De hecho, estos objetivos surgen del examen de la sostenibilidad en diferentes dimensiones, que se realizaron en las primeras aproximaciones a este concepto [27]. Por ejemplo, metodologías de evaluación de la sostenibilidad como la de Ilskog [31] consideran cinco dimensiones: técnica, económica, ético-social, ambiental e institucional. Otros autores como Yadoo & Cruickshank [32] y Lillo et al. [33] han basado sus propuestas en enfoques similares.

Considerando la gran cantidad de países en desarrollo que requieren implementar planes nacionales de electrificación rural efectivos y asumiendo el interés social, económico y ambiental que estos planes tienen para toda la comunidad mundial, la evaluación de planes de electrificación rural no puede estar enfocada a resultados absolutos ni ser aislada. Al contrario, ha de estar inmersa dentro del proceso de planificación de políticas y planes gubernamentales, generando permanentemente información que permita tomar decisiones oportunas para la mejora continua de los planes en ejecución. Las evaluaciones de programas de electrificación rural deben proporcionar resultados objetivos y sintetizar las lecciones aprendidas para promover el desarrollo continuo de las iniciativas en curso, proporcionando una perspectiva útil para los tomadores de decisiones que les permitan mejorar los programas implementando a tiempo las medidas apropiadas [25].

Así, para realizar una evaluación de un plan y/o programa de electrificación rural se ha de definir una perspectiva y un propósito para dicha evaluación. Con respecto al propósito, se pueden distinguir dos tipos diferentes de evaluaciones [26]: sumativa y formativa. Las evaluaciones sumativas básicamente tienen como objetivo determinar si un programa debe continuar o debe detenerse, dependiendo de si el efecto esperado en un determinado indicador está ocurriendo o no [34]. Por su parte, las evaluaciones formativas no se centran en cuestionar la idoneidad de los programas, sino en promover mecanismos de mejora continua. Este enfoque se

ha utilizado para evaluar los servicios públicos de distribución de electricidad [35], los programas de trabajo social en condiciones de pobreza crónica (en Malawi, por ejemplo) [36] y otros programas gubernamentales del ámbito de los servicios sociales [37] en diferentes áreas de desarrollo [38]. En cuanto a la perspectiva, las evaluaciones pueden tener un enfoque de contabilidad o de gestión [39]. La perspectiva de la contabilidad es útil para aquellos que aprueban la financiación pública para los programas. En cambio, la perspectiva de gestión permite que la información se proporcione con la suficiente rapidez para que los líderes del programa puedan llevar a cabo las modificaciones apropiadas cuando sea necesario.

En este contexto, el objetivo principal de esta tesis doctoral es desarrollar una metodología de evaluación de programas de electrificación rural basados en RET con propósito formativo y con una perspectiva de gestión, que evalúe la sostenibilidad desde las dimensiones ambiental, técnica, socioeconómica e institucional. Para alcanzar este objetivo, primero se propone un procedimiento de evaluación de proyectos basados tanto en tecnologías diésel como en RET en distintos contextos, para identificar sus fortalezas y limitaciones. Posteriormente, se desarrolla la metodología de evaluación de programas, determinando los puntos de mejora continua para fortalecer la sostenibilidad, en todas sus dimensiones, a través del análisis de criterios e indicadores de evaluación pertinentes. Como aplicación práctica e ilustración, la metodología se utiliza en el programa venezolano “Sembrando Luz”, extrayendo las lecciones aprendidas de proyectos en curso para la mejora de futuros proyectos.

Los siguientes apartados se han organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2 se definen los objetivos tanto general como específicos de esta tesis doctoral, incluyendo una descripción de los pasos que se han seguido para su consecución y los artículos que han sido publicados. En el capítulo 3 se presenta un Marco Teórico General donde se describen los elementos comunes al desarrollo de los artículos y que son transversales a todo el trabajo de investigación desarrollado. En los capítulos 4, 5 y 6 se incluye el resumen y una copia de los 3 artículos publicados en el marco de esta tesis. Finalmente, el capítulo 7 corresponde a las conclusiones generales de esta investigación doctoral; y en el capítulo 8 se describen algunas de las investigaciones en proceso y otras cuyo desarrollo futuro es ya previsible.

2 OBJETIVOS

Actualmente, el 18% de la población mundial está en regiones aún por ser electrificadas y, por tanto, el enfoque que se dé a la electrificación rural a escala local es fundamental para el logro de un desarrollo sostenible a nivel mundial. En particular, se debe mejorar la eficiencia en el uso de grupos electrógenos diésel para reducir las emisiones de CO₂ y su correspondiente impacto en el calentamiento global y el cambio climático. A la vez, el problema fundamental para la difusión de las energías renovables dentro de los programas de electrificación rural, es la falta de confianza en éstas tecnologías por parte de los tomadores de decisión en las instituciones públicas y gobiernos de los países en desarrollo. Se requiere por tanto resultados objetivos basados en estudios de casos reales, obtenidos a partir de metodologías de evaluación de la sostenibilidad en programas de

electrificación rural, que tengan en cuenta todas las dimensiones, criterios e indicadores relevantes para analizar las particularidades de dichas aplicaciones.

En este contexto, el objetivo general de esta tesis doctoral es proponer una metodología de evaluación de los programas de electrificación rural basados en RET con propósito formativo y con una perspectiva de gestión, que evalúe la sostenibilidad desde la dimensión ambiental, técnica, socioeconómica e institucional.

Dentro de este objetivo general, se concretan los siguientes objetivos específicos:

- Establecer un marco conceptual donde queden claros los elementos fundamentales que determinan la sostenibilidad de los sistemas de electrificación rural.
- Definir criterios e indicadores para la evaluación de la sostenibilidad y elaborar un instrumento que permita tomar datos necesarios de las comunidades electrificadas para la evaluación de estos indicadores.
- Desarrollar una metodología de evaluación de la sostenibilidad para programas y/o grupos de proyectos de electrificación rural, con base en el marco conceptual construido, los datos recolectados de las comunidades y las experiencias y lecciones aprendidas de las visitas realizadas.
- Visitar comunidades electrificadas y aplicar la metodología desarrollada para casos en que se requiere evaluar la sostenibilidad de sistemas de electrificación rural con energías renovables y de sistemas basados en grupos electrógenos.

Como caso de estudio, se escoge Venezuela para extraer experiencias y aplicar la metodología, considerando que este país presenta una amplia variedad de proyectos de electrificación rural con todo el conjunto de tecnologías consideradas en esta investigación. Además, Venezuela es un país ubicado dentro de la zona intertropical, donde se ubica el 87% de las personas sin acceso a la electricidad a nivel mundial. Además, en este país se encuentra toda la variedad de climas de la zona intertropical representados de forma constante durante todo el año. Esto es de gran utilidad científica ya que, los tipos de clima en toda esta franja geográfica alrededor del mundo son similares y dependen fundamentalmente de la altitud de la localidad que sea estudiada y no de las estaciones del año, como en el resto de las latitudes.

Como antecedente de esta tesis doctoral, se realizó una evaluación general de los resultados de proyectos de electrificación rural en diversos países latinoamericanos: Bolivia, Ecuador, Perú y Venezuela. En cada país se estudiaron proyectos de electrificación rural y se obtuvo una primera aproximación de las necesidades para la sostenibilidad en cada caso. Como resultado de esta fase, se publicó el primer artículo (Nro. 0, ver figura 1). A partir de este antecedente, la investigación y tesis doctoral se ha llevado a cabo en 3 fases, que se describen a continuación:

- Evaluación particular *in situ* de proyectos de electrificación con grupos electrógenos. Generalmente, se emplean tres tipos de sistemas diésel: 1) Fuera de la red: grupo electrógeno diésel aislado para la electrificación rural de comunidades sin conexión a la red [40]; 2) Apoyo a la extensión de la red eléctrica nacional: grupos electrógenos diésel instalados al final de los circuitos de distribución rural para la mejora de los perfiles de voltaje, que proporcionan la energía necesaria para la extensión de la red a comunidades rurales y hogares dispersos sin acceso a la electricidad; y 3) Apoyo a la generación distribuida: grupos electrógenos diésel instalados en pequeñas plantas de generación distribuida en áreas de baja densidad poblacional, para la mejora de la calidad de la energía y, en consecuencia, la extensión de la red, que funcionan como plantas de energía pico. En este caso, se desarrolló una metodología propia para la evaluación y se visitaron 7 comunidades electrificadas con grupos electrógenos en Venezuela, determinando los aspectos fundamentales para la sostenibilidad de éstos. Como resultado de esta fase, se publicó el segundo artículo (Nro. 1, ver figura 1).
- Evaluación particular *in situ* de proyectos de electrificación con energías renovables. En este caso, se visitaron 24 comunidades electrificadas con energías renovables en Venezuela y se determinaron los aspectos fundamentales para la sostenibilidad de éstos; evaluando sus dimensiones: ambiental, técnica, socioeconómica e institucional de la sostenibilidad, mediante visitas técnicas, entrevistas semiestructuradas y 106 encuestas a operadores técnicos y beneficiarios. Se incluyeron proyectos con sistemas aislados eólicos y solares, así como microrredes rurales híbridas y micro centrales hidroeléctricas. Aquí se utilizó una metodología similar a la previamente implementada en los grupos electrógenos, pero con una aproximación más cercana a lo que luego sería el resultado final de la tesis doctoral. Los resultados muestran que las microrredes pueden satisfacer las necesidades energéticas de la población, al tiempo que promueven el cambio tecnológico hacia el uso de tecnologías más sostenibles, y se deducen un conjunto de aspectos clave para fortalecer la sostenibilidad de los proyectos. Como resultado de esta fase, se publicó el tercer artículo (Nro. 2, ver figura 1).
- Elaboración de una metodología de evaluación de la sostenibilidad en electrificación rural. En esta fase se produce una investigación cuyo artículo publicado es el producto final de esta tesis doctoral; es decir, una metodología general de evaluación de la sostenibilidad. Ésta fue desarrollada considerando todas las lecciones aprendidas de las visitas y evaluaciones de los proyectos en las fases anteriores con un propósito formativo y una perspectiva de gestión, que es el producto más importante de esta tesis doctoral. La evaluación se realiza mediante un conjunto de criterios suficientemente sólidos para ser replicados, de manera práctica y eficiente en otros contextos culturales, institucionales y socioeconómicos [41]. Los criterios de evaluación se han definido teniendo en cuenta el enfoque formativo y la perspectiva de gestión, a fin de garantizar que los resultados proporcionen elementos válidos para identificar claramente los mecanismos de mejora en el diseño y/o la implementación del programa, así como para superar posibles barreras institucionales [38]. La metodología de evaluación se ilustra y valida a través de su aplicación al programa venezolano “Sembrando Luz” [42]. Este

programa se lanzó en 2005 y, desde entonces, 900 comunidades rurales se han beneficiado y se alcanzarán 2.020 más en los próximos años. La evaluación de cada criterio a partir de cada dimensión de la sostenibilidad se realiza por medio de indicadores definidos de acuerdo con los contextos socioeconómicos propios del programa. Como resultado de esta fase, se publicó el cuarto artículo (Nro. 3, ver figura 1).



Figura 1. Esquema de implementación de las fases de la investigación para diseñar la propuesta metodológica de evaluación de la sostenibilidad en programas de electrificación rural

3 MARCO TEÓRICO GENERAL

Para desarrollar una metodología de evaluación de la sostenibilidad de programas de desarrollo es necesario, antes que cualquier otra cosa, definir el contexto y el marco teórico. Así, en este capítulo, se muestran de forma resumida los conceptos que definen las relaciones fundamentales entre energía y sostenibilidad o desarrollo sostenible, para luego pasar al ámbito específico de la electrificación rural (apartado 3.1). La sostenibilidad se ha definido en función de sus dimensiones, que se describen a continuación, a partir de criterios e indicadores de evaluación (apartado 3.2). En cuanto a la forma de realizar las evaluaciones, se describen los diferentes tipos según su propósito (apartado 3.3) y su perspectiva (apartado 3.4), así como se distinguen las fases a evaluar en todo programa (apartado 3.5). Finalmente, en el apartado 3.6, se resumen las características específicas de la metodología que se desarrolla en esta tesis.

3.1 Energía y sostenibilidad

Desde el lanzamiento de la definición de desarrollo sostenible por parte de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, en 1987 [43], la sostenibilidad ha recibido mayor atención y ahora es tomada en cuenta en la mayoría de investigaciones que involucran temas de desarrollo en general, y evaluaciones de sistemas y proyectos en particular. La Comisión utiliza frecuentemente una definición de sostenibilidad que textualmente

dice que es *"el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades"* [43]. Este concepto guarda estrecha relación con lo que se refiere a la distribución de recursos entre dos o más generaciones, o la llamada equidad intergeneracional. Teniendo en cuenta las implicaciones de esto para el sector energético, Munasinghe ha concluido que *"el desarrollo energético sostenible requiere que los servicios de electricidad sean confiables, estén siempre disponibles y asequibles para todos, de manera sostenible, en todo el mundo"* [8]. Además, la energía es un recurso que presenta una interacción crítica con las dimensiones económica, social y ambiental del desarrollo sostenible. En este sentido, la energía es la mayor fuerza motriz del progreso económico y, al mismo tiempo, el progreso económico repercute en el incremento de su demanda [8]. Por otro lado, la generación y la demanda energéticas están estrechamente ligadas con el medio ambiente, pero el crecimiento de la demanda energética está asociado al calentamiento global y el cambio climático, que han puesto en riesgo a la humanidad y su supervivencia sobre la Tierra. Por tanto, cabe mencionar que el desarrollo sostenible no es, necesariamente, sinónimo de mantener el *statu quo* ecológico. Un sistema armónico en lo social, económico y ambiental puede desarrollarse manteniendo niveles de biodiversidad que garanticen la resiliencia de los ecosistemas.

La AIE estima que, aunque las naciones acuerden y apliquen novedosas políticas de ahorro energético, la demanda eléctrica mundial se incrementará en casi un 80% para el año 2040, con respecto a la demanda del 2012. Los países con economías emergentes y/o en vías de desarrollo representan el grueso del incremento de esta demanda, liderados por China (33%), India (15%), el sudeste asiático (9%) y Oriente Medio (6%). En el 2012, el 67,9% de la energía eléctrica a nivel mundial era generada a través de combustibles fósiles y otro 10,9% obtenido de centrales nucleares de fisión [5]. Por tanto, si se quiere evitar un aumento en las emisiones de CO₂, es necesario que la cuota de las energías renovables en todos los proyectos de electrificación (incluida la electrificación rural), se incremente del 21% en 2012 hasta el 33% en 2040, y que estas tecnologías limpias suministren, al menos, la mitad del crecimiento de la generación (demanda) mundial de electricidad [5].

De acuerdo con Nicholas Stern [44], debido al nexo entre alimentos, agua, energía y cambio climático, se necesita una inversión equivalente al 1% del Producto Interior Bruto (PIB) mundial en todos los aspectos antes mencionados para evitar que la severidad de los patrones climáticos se intensifique, provocando zonas húmedas cada vez más húmedas, y zonas secas y áridas cada vez más secas. Esta situación podría provocar problemas económicos, sociales y ambientales que deterioren la estabilidad institucional de los países más afectados, debido a la profunda relación que guardan entre sí las vertientes ambiental, social y económica del desarrollo. En resumen, dicho informe establece que, en caso de que la comunidad mundial no haga nada respecto a las necesidades de superación de la pobreza y el acceso a energía, agua y alimentos sostenibles, el mundo se podría exponer a una recesión que podría alcanzar el 20% del PIB global. Es decir, tanto la pobreza como la privación de acceso a la energía en las regiones más pobres forman parte fundamental de los elementos que han de incumbir a toda la comunidad de naciones del mundo.

3.2 La evaluación de la sostenibilidad en proyectos de electrificación rural

El marco de la sostenibilidad desarrollado por Brundtland en 1987 [43] se basa en tres dimensiones inseparables e integralmente interrelacionadas, que son la dimensión social, económica y ambiental del desarrollo. Cada una de estas dimensiones se relaciona con las demás y, para poder ser evaluadas, se requiere de una base de valoración científica interdisciplinaria. En el caso de la electrificación rural, se evidencian a pequeña escala los estrechos lazos de interrelación entre todas las dimensiones. Entre las muchas definiciones de sostenibilidad que han venido sucediéndose, una de las más ampliamente aceptada es la propuesta por Munasinghe [8], basada en el informe Brundtland [43], en el marco de la Conferencia Mundial de la Tierra organizada por Organización de Naciones Unidas (ONU) en Rio de Janeiro, Brasil. La definición se basa en el llamado triángulo del desarrollo sostenible, cuyos vértices son las dimensiones económica, ambiental y social de la sostenibilidad. Para evaluar la sostenibilidad se ha de tener presente que cada uno de estos tres sistemas o dimensiones tiene sus propios objetivos y fuerzas motrices. Los elementos económicos del desarrollo teóricamente empujan hacia el bienestar y el desarrollo humano, incrementando el consumo de bienes y servicios, entre los cuales la energía eléctrica es fundamental. Los elementos ambientales del desarrollo se enfocan en la integridad y la resiliencia de los ecosistemas involucrados en una determinada región, sub-región o proyecto local (infraestructura, electrificación, etc.). Finalmente, los elementos sociales del desarrollo pretenden favorecer el enriquecimiento de las relaciones humanas, procurando el alcance de las aspiraciones individuales y colectivas de las personas y fortaleciendo los valores institucionales, a través de la educación, la información y el acceso a redes de conocimiento, para lo cual es imprescindible la electrificación. A través de una base interdisciplinaria, se puede realizar una evaluación de las relaciones concretas entre las tres dimensiones del desarrollo sostenible. Debido a las complejas interacciones entre los diversos sistemas socioeconómicos, ecológicos y físicos, muchas son las disciplinas que pueden contribuir a la construcción de metodologías más precisas de evaluación de la sostenibilidad en proyectos energéticos locales, regionales o nacionales.

Desde la década de los 90's [29], se ha planteado la necesidad de disponer de procedimientos especiales y diferenciados de evaluación de los programas de electrificación rural que difieran de las metodologías de evaluación de otros programas energéticos urbanos, comerciales y/o industriales, fundamentalmente porque la electrificación rural debe integrarse o coordinarse con otros programas de desarrollo rural. Una evaluación centrada únicamente en los aspectos relativos al acceso a la energía no arrojaría resultados útiles. El hecho de que la electrificación rural cueste más por hogar conectado que la electrificación urbana, afecta a la viabilidad financiera y económica de estos proyectos. Por tanto, los proyectos de electrificación rural suelen justificarse con base en múltiples objetivos que, adicionalmente, pueden variar de un país a otro y de sus respectivas políticas gubernamentales. Según Zomers [30], los objetivos de la electrificación rural pueden agruparse en cuatro categorías: objetivos económicos, objetivos sociales, objetivos políticos y objetivos ambientales. En la práctica, uno o más objetivos se producen simultáneamente y están interrelacionados, pudiéndose reducir a dos que son, por ejemplo: los sociales y los económicos.

3.3 Las evaluaciones de proyectos o programas según su perspectiva

Los gobiernos e instituciones internacionales, las empresas públicas y privadas, así como las agencias gubernamentales y no gubernamentales, suelen tener problemas al evaluar planes y programas con un importante componente social, como es el caso de la electrificación rural. Sin embargo, la efectividad en la gestión de un programa o plan es un elemento común fácilmente medible. En este sentido, las evaluaciones pueden tener diferentes perspectivas [39]: contabilidad y gestión.

Perspectiva de contabilidad

Tiene como propósito hacer el mejor uso posible de los recursos públicos y/o privados, haciendo responsables a los ejecutores de los planes y/o programas de su efectividad en el diseño e implementación. Los usuarios de este tipo de evaluación suelen ser quienes aprueban fondos públicos para el programa (congresistas, funcionarios de alto nivel y ministros, entre otros) o los miembros de una junta directiva de alguna empresa u ONG. Este tipo de evaluaciones implican la posibilidad de eliminar el programa de electrificación, modificar sus objetivos, estrategias y restringir o limitar los fondos asignados.

Perspectiva de gestión

El propósito de la evaluación es servir como herramienta de gestión que apoye la mejora de la eficiencia del programa de electrificación rural. El interés de la evaluación se centra en mejorar el diseño e implementación del plan, sin cuestionar si la electrificación rural es pertinente o no. Al considerar a la evaluación como parte de la gestión, el enfoque es similar a la evaluación de los programas de salud, educación y bienestar que continuarán operando independientemente de los resultados de cualquier evaluación. La perspectiva de gestión concibe a la evaluación del programa como un proceso iterativo mediante el cual los hallazgos se vuelven a introducir en la planificación del programa de electrificación y las evaluaciones que se van retroalimentando lo suficientemente rápido como para permitir la modificación y mejora de los programas, aun durante el período de vigencia. A través de la evaluación, el objetivo más importante es obtener información oportuna, significativa y prescriptiva sobre el funcionamiento del programa. Esta perspectiva no se plantea la discusión de las bases conceptuales del programa. Es difícil conectar la electrificación en una comunidad directamente con cualquiera de las dimensiones del desarrollo sostenible: social, económico y/o ambiental. Esto es debido a que cualquier cambio en los niveles educativos, los ingresos por familia, la igualdad de género y el entorno medioambiental es muy difícil de relacionar con el acceso a la energía a través de una evaluación con una perspectiva meramente de gestión.

3.4 Las evaluaciones de proyectos o programas según su propósito

Dependiendo del propósito de la evaluación, Pereira et al. [26] distinguen la evaluación de planes de electrificación rural entre evaluaciones de tipo sumativo y de tipo formativo. La evaluación sumativa tiene

como propósito fundamental determinar si un programa debe continuar o debe limitarse; mientras que la formativa busca mejorar el diseño e implementación del programa. En este sentido, como se observa a continuación, los propósitos de la evaluación serán más o menos afines a las perspectivas de ésta.

La evaluación sumativa

Tiene el propósito de concluir si un programa produce o no el efecto deseado, y proporciona información necesaria para poder hacer una valoración global sobre los resultados para tomar la determinación de continuar con él o suspenderlo. La evaluación sumativa se corresponde con la evaluación de resultados, de eficiencia y de impacto, sin considerar cómo fue conceptualizado, diseñado o implementado el programa [34]. En este sentido, las evaluaciones con una perspectiva de contabilidad se basan fundamentalmente en evaluaciones sumativas. Esta evaluación requiere que haya pasado un intervalo suficiente de tiempo, se hayan electrificado varias comunidades con diferentes condiciones climatológicas y demográficas, y que la organización de los actores involucrados en la ejecución del programa, así como las actividades completadas, hayan alcanzado una cierta estabilidad. De acuerdo a Wholey [37], las evaluaciones sumativas rara vez serán suficientemente oportunas, relevantes y concluyentes para afectar unívocamente a la toma de decisiones sobre la modificación del programa de electrificación.

La evaluación formativa

Aborda un programa que está en marcha, con propósito de mejorar su desarrollo. Una evaluación formativa permite a un tomador de decisiones conocer resultados totales o parciales de un programa de electrificación para mejorar la conceptualización, diseño y/o implementación del mismo durante cualquiera de sus etapas de desarrollo. La evaluación formativa suele ser más útil que la sumativa para fines de políticas gubernamentales y/o programas a escala nacional, regional o local [37]. La evaluación formativa ha de proporcionar información detallada sobre cómo se concibe (diseño), así como la calidad y la eficiencia con que se implementa el programa (implantación), evaluando la relación entre todos los actores involucrados y los beneficiarios del mismo, incluyendo la satisfacción con el servicio eléctrico suplido [38]. Un ejemplo de este tipo de evaluación aplicada a la electrificación rural lo ha dado la misma Organización de Naciones Unidas, al emplear a un evaluador independiente para realizar una evaluación formativa del programa de promoción del acceso a la energía “Sustainable Energy for All (SE4All)”. Esta evaluación se enmarcó en apoyar las mejoras del diseño e implementación del programa SE4ALL, ayudando a entender lo que ha funcionado y lo que no ha funcionado y por qué, partiendo de sus bases conceptuales [2]. Por lo antes expuesto, la evaluación formativa es la más pertinente para una evaluación con perspectiva de gestión. Este tipo de evaluación ayuda a un diagnóstico sistemático total o parcial de las fases del programa [36], siendo particularmente útil para el aprovechamiento de los resultados en la mejora de otros planes del mismo país o fuera de él, a través de las lecciones aprendidas.

La medición del desempeño y el análisis de casos de estudio de comunidades rurales beneficiadas por el programa a estudiar, son elementos propios de un enfoque de evaluación formativa. Estos casos de estudio deben explorar el contexto social, económico, ambiental e institucional para poder hacer recomendaciones sobre “lecciones aprendidas” desde la experiencia y medir su desempeño. Con el análisis de varias comunidades electrificadas y un análisis comparativo de las mismas, se pueden identificar las categorías de proyectos para los que se pueden generalizar las “lecciones aprendidas”. Partiendo de la relación entre las mejoras continuas de las fases de diseño e implementación de un proyecto, una evaluación formativa puede enfocarse en una de las dos fases o en ambas.

3.5 Las evaluaciones de proyectos o programas según su fase

Además de evaluar un programa con un propósito concreto y desde una determinada perspectiva, es necesario definir las fases a evaluar a lo largo del desarrollo del programa de electrificación rural. En general, los programas tienen dos fases claramente diferenciadas: diseño e implementación.

Evaluación del diseño del programa

En cuanto a la evaluación del diseño del programa, se pueden adaptar los procedimientos de evaluación formativa propuestos, entre otros, por Brown & Gerhardt [45], a las necesidades de evaluación de programas de electrificación rural. En la evaluación formativa de programas de electrificación rural, la evaluación del diseño incluirá la comparación de unos determinados niveles de desarrollo socioeconómico y geopolítico promovidos por la implementación del programa, con los objetivos cuantitativos y/o cualitativos definidos por el mismo. La evaluación del diseño del programa se hace a escala municipal, regional y/o nacional; e incluye algunos (muestreo) o todos los proyectos desarrollados. La evaluación del diseño incluye aspectos relativos a la cuantificación de las necesidades de electrificación, la conceptualización del plan, la alineación estratégica de los actores involucrados y la alineación de los múltiples objetivos con el desempeño deseado.

- *Alineación Institucional*, es una variable cualitativa y se refiere a la necesidad de que el concepto del programa esté alineado con las metas, estrategias, compromisos y objetivos de los actores vinculados al desarrollo del mismo, esto es: gobierno (local, regional, nacional), autoridad en electrificación rural, empresa eléctrica y comunidades beneficiadas. Se basa en la evaluación de la compatibilidad de las metas y objetivos del programa de electrificación con las estrategias y compromisos de los actores involucrados. En el caso de las comunidades beneficiadas, sólo por medio de entrevistas particulares y/o encuestas se puede conocer si la electrificación contribuye o no al cumplimiento de sus planes comunitarios de desarrollo (alineación del contexto).
- *Alineación del contexto*, es una variable cualitativa que ha de servir para estudiar si el cambio promovido por el programa de electrificación ha sido positivo y/o soportado en los contextos: social,

económico y medioambiental de los proyectos de electrificación ejecutados en el marco del programa. En caso de observarse limitaciones en el desarrollo de alguna de las dimensiones antes citadas, se ha de identificar cuáles son esas limitaciones y a qué se deben.

- *Alineación de objetivos y asignación de recursos*, se refiere a la forma en que la implementación del programa de electrificación es eficiente en el alcance de los objetivos, esto es, que alcance la mayor cantidad de usuarios con el menor uso de recursos financieros y logísticos, en el menor tiempo posible. En este sentido, se ha de contar con un diagnóstico inicial de las condiciones de acceso a la energía y/o de la tasa de electrificación rural en el país, región o zona.

Evaluación de la implementación del programa

La medición del desempeño con base en la adecuada selección de una muestra representativa de “casos de estudio” ha de conducir a la posibilidad de establecer “lecciones aprendidas”, ambos elementos estando interrelacionados dentro del proceso de evaluación formativa [37]. En la evaluación del desempeño, las variables socioeconómicas, medioambientales y técnicas de los programas son evaluadas *in situ*, a partir de una muestra representativa de proyectos. Además, se pueden consultar bases de datos de agencias gubernamentales, realizar encuestas, inspecciones técnicas a los sistemas de generación y distribución, valoraciones del impacto medioambiental del proyecto en el entorno de la comunidad, etc. Algunos autores afirman que las encuestas e inspecciones técnicas realizadas para la medición del desempeño socioeconómico, medioambiental y técnico en los casos de estudio, pueden conducir a los siguientes resultados [37]:

- *Resultados intermedios*, como la satisfacción de los usuarios del sistema de electrificación rural en la comunidad con la calidad del servicio eléctrico, los costes, la atención del gobierno o autoridad autónoma de electrificación, el mantenimiento y operación del sistema de generación, entre muchos otros.
- *Resultados finales*, tales como cambios en la calidad ambiental, en la salud, en la educación, en el nivel de ingresos, en la calidad de las viviendas, entre otros.
- *Resultados no deseados*, tales como ruidos (aerogeneradores), daños a electrodomésticos por perturbaciones en la red de distribución, conexiones no autorizadas, entre otros.

Por otro lado, las metodologías de evaluación se pueden clasificar según se empleen métodos econométricos, que evalúan los proyectos en unidades monetarias, o métodos basados en indicadores, que evalúan los diferentes aspectos de forma cualitativa y/o cuantitativa, pero sin transformarlos en una unidad única común.

La metodología más destacable entre la bibliografía consultada se presenta en Ilskog [46], y está basada en indicadores bien diferenciados y discretos que fueron seleccionados como medidas para cinco dimensiones de sostenibilidad: técnica, económica, ético-social, ambiental e institucional (definidas *a priori* por la autora). Complementariamente, Ilskog [46] afirma que en la selección de los indicadores deben priorizarse aquellos que faciliten la recolección de datos, reduciendo el riesgo de valoraciones subjetivas. Por ejemplo, en el ámbito local, la dimensión ambiental de la sostenibilidad se puede medir observando cómo las actividades del proyecto influyen en el medio ambiente y los recursos naturales del lugar [46]. En una perspectiva local y global, se han de considerar la producción de emisiones que provoca la tecnología de electrificación utilizada. La eficiencia energética puede ser cubierta a través de esta dimensión. Finalmente, es importante destacar que entre los usuarios de una metodología de evaluación de la sostenibilidad en programas de electrificación rural han de estar todas las partes interesadas. La mayor diferencia con otras metodologías es la diferenciación entre las dimensiones de la sostenibilidad y sus indicadores, además de la inclusión de la dimensión técnica como un elemento dentro de la ciencia de la sostenibilidad. Cabe destacar que las dimensiones están basadas en el esquema propuesto por Brundtland [43], que se ha mencionado en apartados anteriores. Basados en la propuesta Ilskog [46], se han desarrollado varias adaptaciones. Por ejemplo, Yadoo & Cruickshank [32] definieron 43 indicadores de sostenibilidad, teniendo en cuenta las cinco dimensiones de sostenibilidad propuestas por Ilskog [46], para evaluar proyectos de electrificación rural en Nepal, Perú y Kenia. Más recientemente Lillo et al. [33] hicieron una nueva propuesta para evaluar proyectos que dotaban de servicios energéticos y también sanitarios.

3.6 Análisis del marco teórico

Los programas de electrificación rural tienen una fase de diseño y una fase de implementación. En la primera fase, se definen las premisas del programa y se establecen los objetivos; mientras que, en la segunda fase, se procede con la ejecución física de los proyectos procurando el uso eficiente de los recursos económicos y materiales de los que se disponga y hayan sido asignados por los tomadores de decisión. La revisión de antecedentes en evaluaciones de programas gubernamentales y públicos, en general, ha permitido definir con claridad el propósito y la perspectiva que debe tener una metodología de evaluación de la sostenibilidad en proyectos de electrificación rural, de manera que se mejoren tanto el diseño como la implementación de forma continua. En este sentido, debe tener un propósito formativo y una perspectiva de gestión, debido a que es necesaria la mejora continua y en tiempo real de los diseños y mecanismos de implementación de los proyectos, y para ello es necesario que los resultados de las evaluaciones sean asimilables por los tomadores de decisión, desde su punto de vista como gestores. Para lograr esto, la evaluación debe abarcar la sostenibilidad de manera amplia, considerando las dimensiones institucional, socioeconómica, técnica y ambiental. Esto debe realizarse a través de unos criterios e indicadores de evaluación suficientemente robustos para poder ser replicados en diversos contextos y regiones.

4 ARTÍCULO # 1 LIFETIME, COST AND FUEL EFFICIENCY IN DIESEL PROJECTS FOR RURAL ELECTRIFICATION IN VENEZUELA

4.1 Resumen del artículo

Entre 2000 y 2016, 600 millones de personas en países en desarrollo accedieron a la electricidad a través de tecnologías basadas en combustibles fósiles, tanto en esquemas aislados como conectados a la red. Aunque se espera un aumento en el uso de fuentes de energía renovables, el 40% de las nuevas conexiones hasta el 2030 se realizará a través de tecnologías convencionales, incluido el diésel. Los grupos electrógenos diésel se pueden diseñar e implementar utilizando tres estrategias diferentes: (1) fuera de la red, (2) soporte para la extensión de la red nacional o (3) soporte para plantas de generación distribuida en zonas rurales. Las ventajas e inconvenientes de cada estrategia aún no se han establecido claramente. El objetivo es evaluar y comparar las 3 estrategias para mejorar los proyectos futuros. Por lo tanto, se han estudiado casos de Venezuela. Se analizan la generación histórica y los datos operativos, así como las visitas in situ, encuestas y entrevistas. Aunque Venezuela es un país productor de petróleo, contrasta con la matriz energética mundial, ya que su generación basada en combustibles fósiles es menos de la mitad del promedio mundial. Los resultados muestran que las ventajas de cada estrategia están condicionadas por factores geográficos, climáticos y logísticos, mientras que se destacan los beneficios de la estrategia de apoyo a la extensión de la red nacional. Estos resultados pueden ayudar a los promotores de electrificación rural a determinar de manera efectiva la estrategia más apropiada para proyectos diésel.

4.2 Referencia del artículo

López-González A, Domenech B, Ferrer-Martí L. Lifetime, cost and fuel efficiency in diesel projects for rural electrification in Venezuela. *Energy Policy* 2018;121:152–61.

Recibido el 9 de marzo de 2018; Recibido en forma revisada el 13 de junio de 2018; Aceptado el 16 de junio de 2018.. <https://doi:10.1016/j.enpol.2018.06.023>

ATENCIÓN;

Las páginas 22 a 31 de la tesis, que contienen el artículo citado,
han de consultarse en la página web del editor

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518304105>

5 ARTÍCULO # 2 SUSTAINABILITY AND DESIGN ASSESSMENT OF RURAL HYBRID MICROGRIDS IN VENEZUELA

5.1 Resumen del artículo

En la actualidad, 1.200 millones de personas carecen de acceso a la electricidad, principalmente en las zonas rurales de los países en desarrollo. En particular, 22 millones de personas no tienen electricidad en América Latina y muchos gobiernos están desarrollando programas de electrificación rural para hacer frente a esta situación. Las microrredes híbridas sin conexión a la red basadas en energía renovable son una opción eficiente para proporcionar a las poblaciones rurales dispersas acceso a la electricidad. Sin embargo, las microrredes siguen siendo una opción minoritaria, ya que los gobiernos de los países en desarrollo en general las consideran caras y no efectivas. En este contexto, se requiere la evaluación de proyectos basados en microrredes híbridas para mejorar el conocimiento sobre estas tecnologías. En este artículo, se presentan 13 proyectos con microrredes en el noroeste de Venezuela y se evalúan sus dimensiones ambiental, técnica, socioeconómica e institucional de la sostenibilidad. Para este propósito, se desarrolla una metodología de evaluación basada en criterios ad hoc, evaluados mediante visitas técnicas, entrevistas semiestructuradas y 106 encuestas a operadores técnicos y beneficiarios. Los resultados muestran que las microrredes pueden satisfacer las necesidades energéticas de la población, al tiempo que promueven el cambio tecnológico hacia el uso de tecnologías más sostenibles. Además, se destacan los aspectos clave para fortalecer la sostenibilidad de los proyectos.

5.2 Referencia del artículo

López-González A, Domenech B, Ferrer-Martí L. Sustainability and design assessment of rural hybrid microgrids in Venezuela. *Energy* 2018;159:229–42

Recibido el 23 de octubre de 2017 Recibido en forma revisada 23 de abril de 2018 Aceptado el 24 de junio de 2018 Disponible en línea el 26 de junio de 2018. <https://doi:10.1016/j.energy.2018.06.165>.

ATENCIÓN;;

Las páginas 33 a 46 de la tesis, que contienen el artículo citado,
han de consultarse en la página web del editor

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218312301>

6 ARTÍCULO # 3 FORMATIVE EVALUATION OF SUSTAINABILITY IN RURAL ELECTRIFICATION PROGRAMS FROM A MANAGEMENT PERSPECTIVE: A CASE STUDY FROM VENEZUELA

6.1 Resumen del artículo

Hoy en día, alrededor de 1.200 millones de personas siguen sin acceso a la electricidad en zonas rurales de África, Asia y América Latina. Para lograr el acceso universal, una amplia gama de instituciones debe participar en programas de electrificación rural a largo plazo dentro del ámbito regional y nacional. En este contexto, el objetivo principal de esta investigación es proponer una metodología de evaluación que tenga como objetivo promover la mejora continua de los programas en desarrollo, realizando las modificaciones apropiadas en términos de su diseño e implementación. En este sentido, se busca un enfoque formativo, ya que los programas en curso requieren de elementos para una mejora continua. Además, también se busca una perspectiva de gestión, ya que los resultados se centran en los líderes del programa para la implementación de modificaciones adecuadas, cuando y donde sea necesario. La metodología de evaluación propuesta considera 4 dimensiones de sostenibilidad: ambiental, técnica, socioeconómica e institucional; a su vez compuestas por 15 criterios que permiten analizar en detalle el diseño y la implementación del programa. Los criterios se evalúan mediante indicadores que estudian las condiciones específicas de cada programa. Como caso de estudio, se utiliza el programa venezolano “Sembrando Luz” como una aplicación empírica de la metodología propuesta. Lanzado en 2005, este programa se ha desarrollado en tres fases, llegando a 900 comunidades rurales hasta la fecha, y se espera que beneficie a 2.020 más en un futuro cercano. Por lo tanto, la metodología de evaluación propuesta tiene como objetivo proporcionar resultados útiles para comparar los programas de electrificación basados en RET con la extensión de red convencional. De manera similar, la metodología promueve la mejora continua en favor del acceso universal a la electricidad en las comunidades rurales de este país, así como lecciones aprendidas que pueden ser útiles para el desarrollo de iniciativas similares en otros países en desarrollo.

6.2 Referencia del artículo

López-González A, Domenech B, Ferrer-Martí L. Formative evaluation of sustainability in rural electrification programs from a management perspective. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;95:11.

Recibido el 6 de octubre de 2017; Recibido en forma revisada el 11 de julio de 2018; Aceptado el 13 de julio de 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.024>

ATENCIÓN!!

Las páginas 48 a 62 de la tesis, que contienen el artículo citado
han de consultarse en la página web del editor

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118305331>

7 CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

Este apartado se inicia describiendo las conclusiones del desarrollo de la propuesta de Metodología de evaluación de la sostenibilidad de proyectos de electrificación rural. Luego se proponen investigaciones futuras como continuación de la tesis desarrollada. Algunas de estas extensiones ya se han desarrollado y escrito en artículos que están actualmente enviados a revisión en revistas indexadas, otras son investigaciones en desarrollo y otras son propuestas de futuro.

7.1 Conclusiones

En esta tesis doctoral se propone una metodología de evaluación de la sostenibilidad de proyectos de electrificación rural con energías renovables para países en vías de desarrollo. La metodología se desarrolla con un propósito formativo, con el objetivo de realizar una mejora continua, y con una perspectiva de gestión, para que se pueda mejorar la implementación aplicando las modificaciones adecuadas, cuando y donde sea necesario.

Para elaborar la metodología, primero se han realizado unos procedimientos de evaluación de proyectos, tanto en comunidades electrificadas con grupos electrógenos como con microrredes rurales híbridas. Ambas evaluaciones, han sido indispensables para definir una propuesta metodológica de evaluación general de programas sobre una base real con la cual comparar. En ambos casos, se han aplicado encuestas y se han considerado dimensiones de sostenibilidad similares a las que finalmente se propone utilizar en la metodología de evaluación de programas. En el caso de los grupos electrógenos, se consideraron tres estrategias de electrificación con esta tecnología, a partir del análisis de 7 proyectos. Los resultados mostraron que cada estrategia tiene ventajas y desventajas condicionadas por factores geográficos, climáticos y logísticos. Además, en general, estos proyectos se justifican por sus dimensiones socioeconómica e institucional, pero son débiles en cuanto a sus dimensiones técnica e ambiental. Por otro lado, las evaluaciones realizadas a 13 comunidades electrificadas con microrredes rurales híbridas muestran resultados muy positivos en las 4 dimensiones socioeconómica, técnica, ambiental e institucional. Además, se evidenció que toda evaluación debe considerar las 4 dimensiones propuestas ya que, al excluir alguna de ellas, los resultados pueden quedar sesgados hacia una u otra tecnología de electrificación fuera del concepto global de la sostenibilidad.

Estas dos primeras evaluaciones, han sido determinantes en la elaboración de la metodología que se propone para la evaluación formativa de la sostenibilidad con perspectiva de gestión de programas de electrificación rural. En este sentido, la propuesta metodológica final considera las 4 dimensiones de sostenibilidad: institucional, técnica, socioeconómica y ambiental. Para evaluar estas dimensiones, se han propuesto 15 criterios definidos para ser robustos y replicables en diferentes contextos regionales, sociales y políticos. La metodología ha sido aplicada y validada en el programa “Sembrando Luz” en Venezuela. Los resultados permitieron diferenciar las debilidades del mencionado programa según los criterios y dimensiones de la sostenibilidad. Además, demostraron que el propósito formativo ha resultado útil para identificar las causas de

fallas o debilidades y si éstas corresponden a un diseño inadecuado o a una implementación deficiente. En concreto, en el programa “Sembrando Luz” se encontró la mayor debilidad en la dimensión institucional y en la fase de implementación del programa, no en la de diseño. Este resultado no se podría haber identificado con evaluaciones de propósito sumativo, que se limitan al análisis de resultados concretos, y que por tanto impedirían interrelacionar dimensiones o etapas del programa entre sí, que se ha visto imprescindible en la evaluación desarrollada. Las acciones correctivas oportunas solo son posibles al presentar estos resultados desde una perspectiva de gestión; es decir, la de los tomadores de decisión. En caso contrario, los resultados de la evaluación sólo tendrían validez como una valoración aislada de tipo social, ambiental, económica, técnica o institucional con posibilidades de mejora en plazos superiores a los de vigencia del proyecto considerado. A la vez, la aplicación de la metodología permitió diferenciar entre los resultados finales e intermedios, lo cual es fundamental para ser objetivos al momento de diferenciar entre resultados realmente buscados por el programa y resultados derivados o colaterales. Así, ha resultado evidente que el hecho de que un programa presente problemas en sus variables intermedias de implementación no quiere decir que no esté obteniendo resultados finales positivos.

En síntesis, simplificar demasiado las evaluaciones de los programas y/o proyectos de electrificación rural, sin considerar la diversidad de dimensiones de la sostenibilidad, ha conducido a conclusiones parciales o restringidas generalmente negativas, que se multiplican generando desconfianza en las RETs entre los tomadores de decisión a nivel institucional de los países en desarrollo. Para alcanzar en 2030 un pleno acceso a la energía eléctrica en el mundo, se requiere una alineación institucional eficaz, lo que implica confianza en las posibilidades de éxito de los programas de electrificación con energías renovables. Para lograr eso, es necesario identificar claramente las variables que juegan a favor y en contra en cada uno de los casos, y destacar y compartir las lecciones aprendidas. Como muestra esta tesis, las evaluaciones formativas y con perspectiva de gestión aplicadas efectivamente, pueden conducir a unas políticas públicas más inteligentes y autorreguladas y una decisión más firme hacia el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en cuanto a acceso a la energía. El estudio en profundidad del caso venezolano, tanto en las evaluaciones previas en proyectos con grupos electrógenos como con microrredes rurales híbridas, ha permitido validar la metodología propuesta y extraer elementos de diseño e implementación exitosos, así como lecciones aprendidas extrapolables a otros contextos de electrificación rural de países en vías de desarrollo.

7.2 Investigaciones futuras

A partir de los resultados de esta tesis, surgen necesidades de nuevas investigaciones en cuanto a los factores que determinan la sostenibilidad en función de aspectos geográficos y en diversos contextos políticos. La posibilidad de ampliar la base comparativa, permitirá mejorar y ampliar los indicadores y criterios de evaluación en cada una de las dimensiones de la sostenibilidad. En este sentido, por una parte, se está trabajando en la evaluación de otras tecnologías de electrificación rural para ampliar el abanico comparativo y, por otra parte, en la extensión de la metodología de evaluación a metodologías de planificación y diseño de proyectos de electrificación rural.

En cuanto a evaluación de tecnologías, ya se empezado con una evaluación micro centrales hidroeléctricas, para las que se ha realizado una investigación en el sur de Venezuela y se ha enviado un artículo que se encuentra en proceso de revisión. Además, se está trabajando la aplicación de la metodología desarrollada en esta tesis, para la evaluación de proyectos de electrificación rural basados en la tecnología eólica. Por su naturaleza variable, la energía eólica de pequeña potencia supone un reto particularmente complejo de evaluar. Sin embargo, el interés e implementación de esta tecnología, en los últimos años, son razón suficiente para profundizar en la evaluación de estos proyectos considerando las dimensiones y etapas propuestas en la metodología desarrollada.

En cuanto a diseño y planificación, a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta para la evaluación formativa con perspectiva de gestión en Venezuela, en esta tesis doctoral, se ha realizado una propuesta metodológica ya no para la evaluación, sino para la planificación de programas y proyectos de electrificación rural con energías renovables, que también se encuentra en proceso de revisión. Además, se está desarrollando es una propuesta metodológica para la planificación y diseño de proyectos comunitarios de electrificación rural, a partir de la cual diferenciar, dentro de una misma comunidad, entre viviendas que deben ser conectadas a una misma central de generación (híbrida o no) y viviendas que se deben abastecer de forma individual o autónoma. Este artículo surge como sistematización de las experiencias prácticas derivadas de la investigación de campo realizada en el marco del artículo sobre microrredes rurales híbridas y la conjugación de estos con las dimensiones consideradas para la evaluación de la sostenibilidad.

En resumen, ya se han enviado 2 artículos JCR en revisión y se están preparando 2 más:

- López-Gonzalez, A; Domenech, B; Ferrer-Martí, L. *“Sustainable rural electrification planning in developing countries: a proposal for electrification of isolated communities of Venezuela”* (Número de manuscrito JEPO-D-17-02334R1, enviado a Energy Policy el 26 de Abril de 2018).
- López-Gonzalez, A; Domenech, B; Ferrer-Martí, L. *Long-term sustainability assessment of micro-hydro projects: case studies from Venezuela* (Número de manuscrito JEPO-S-18-03316, enviado a Energy Policy el 5 de Octubre de 2018)
- *“Comparative evaluation of small wind turbines for rural electrification in tropics extreme conditions: Case studies from Venezuela”*
- *“Community-scale rural electrification projects methodology based on the Generation Cost Curves optimization”*.

Finalmente, con las metodologías de evaluación y planificación, así como la comparativa de una amplia variedad de opciones tecnológicas para la electrificación rural, se espera poder contribuir al diseño de proyectos en nuevos contextos y regiones; como por ejemplo la República de Cuba, que tiene similitudes con los casos prácticos de Venezuela estudiados, o también podría extenderse a algún país de la África subsahariana.

REFERENCIAS

- [1] REN21. Renewables 2016: Global Status Report. Paris: 2016.
- [2] SEforAll. SUSTAINABLE ENERGY FOR ALL STRATEGIC FRAMEWORK FOR RESULTS | 2016-21. Vienna: 2016.
- [3] Terrapon-Pfaff J, Dienst C, König J, Ortiz W. A cross-sectional review: Impacts and sustainability of small-scale renewable energy projects in developing countries. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;40:1–10. doi:10.1016/j.rser.2014.07.161.
- [4] UN. Energía Sostenible para Todos: un Programa Mundial de Acción. vol. A/67/175. New York: 2012.
- [5] International Energy Agency. Africa Energy Outlook. A focus on the energy prospects in sub-Saharan Africa. 2014. doi:https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/africa-energy-outlook.html.
- [6] Khandker SR, Barnes DF, Samad HA. Welfare Impacts of Rural Electrification: A Panel Data Analysis from Vietnam. *Source Econ Dev Cult Chang* 2013;61:659–92. doi:10.1086/669262.
- [7] Bloomberg. 3Q 2017 Frontier Power Market Outlook. NY: 2017.
- [8] Munasinghe M. Sustainable Development: Basic Concepts and Application to Energy. *Encycl Energy* 2004;5:789–808. doi:10.1016/B0-12-176480-X/00441-1.
- [9] Antonio J, Anibal P, Faxas R, Pérez O. Energy , environment and development in Cuba. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:2724–31. doi:10.1016/j.rser.2012.02.023.
- [10] IEA. Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity. Paris: 2017.
- [11] Venkataramanan G, Marnay C. A larger role for microgrids. *IEEE Power Energy Mag* 2008:78–82.
- [12] NASA. POWER Data Access Viewer. Predict Worldw Energy Resour 2018. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accessed November 7, 2018).
- [13] IRENA. Renewable capacity statistics 2016. Abu Dhabi: 2017.
- [14] IRENA. 2016 a Record Year for Renewables, Latest IRENA Data Reveals. *Renew Energy Capacit Stat* 2017. http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=A&mnu=cat&PriMenuID=16&CatID=84&News_ID=1486 (accessed April 26, 2017).
- [15] United Nations. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. 2015. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [16] Jimenez R. Barriers to electrification in Latin America: Income, location, and economic development. *Energy Strateg Rev* 2017;15:9–18. doi:10.1016/j.esr.2016.11.001.
- [17] International Energy Agency IEA. Table 4: Electricity access in 2010 - Latin America. *World Energy Outlook 2012* 2012. www.iea.org/media/.../WEO2012Electricitydatabase_WEB.xlsx (accessed January 16, 2017).
- [18] MINEM. Plan Nacional De Electrificación Rural (Pner) Periodo 2013 - 2022. Lima: 2012.
- [19] Pereira MG, Freitas MAV, da Silva NF. Rural electrification and energy poverty: Empirical evidences from Brazil. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:1229–40. doi:10.1016/j.rser.2009.12.013.
- [20] Slough T, Urpelainen J, Yang J. Light for all? Evaluating Brazil’s rural electrification progress, 2000-2010. *Energy Policy* 2015;86:315–27. doi:10.1016/j.enpol.2015.07.001.
- [21] Peredo Echazú R, Jiménez Rivera H, Gonzáles Flores JM. Plan de Universalización Bolivia con Energía 2010-2025 2010:1–28.
- [22] MEER. FERUM – Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. Fondo Electríf Rural Urbano y Marg 2017. <http://www.energia.gob.ec/ferum/> (accessed January 23, 2017).
- [23] Tech4CDM. La Electrificación Rural en ECUADOR. Quito: 2009.
- [24] López-González A, Domenech B, Gómez-Hernández D, Ferrer-Martí L. Renewable microgrid projects for autonomous small-scale electrification in Andean countries. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;79:1255–65. doi:10.1016/j.rser.2017.05.203.
- [25] Kyte R. Learning from the success stories. Sustainable energy for all is possible through sharing good examples. *World Energy Focus* 2017:3–4.
- [26] Pereira MG, Sena JA, Freitas MAV, Silva NF Da. Evaluation of the impact of access to electricity: A comparative analysis of South Africa, China, India and Brazil. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:1427–41. doi:10.1016/j.rser.2010.11.005.
- [27] Mainali B, Pachauri S, Rao ND, Silveira S. Assessing rural energy sustainability in developing countries. *Energy Sustain Dev* 2014;19:15–28. doi:10.1016/j.esd.2014.01.008.
- [28] Urmee T, Harries D, Holtorf H-G. Success and Sustainability Criteria and Issues for SHS Programmes. *Photovoltaics Rural Electrification. Dev. Ctries. A Road Map*, Cham: Springer International Publishing; 2016,

- p. 79–107. doi:10.1007/978-3-319-03789-9_4.
- [29] Mason M. Rural electrification: a review of World Bank and USAID financed projects. Washington, D.C.: 1990.
- [30] Zomers A. The challenge of rural electrification. *Energy Sustain Dev* 2003;7:69–76. doi:10.1016/S0973-0826(08)60349-X.
- [31] Ilskog E. Indicators for assessment of rural electrification—An approach for the comparison of apples and pears. *Energy Policy* 2008;36:2665–73. doi:10.1016/j.enpol.2008.03.023.
- [32] Yadoo A, Cruickshank H. The role for low carbon electrification technologies in poverty reduction and climate change strategies: A focus on renewable energy mini-grids with case studies in Nepal, Peru and Kenya. *Energy Policy* 2012;42:591–602. doi:10.1016/j.enpol.2011.12.029.
- [33] Lillo P, Ferrer-Martí L, Fernández-Baldor Á, Ramírez B. A new integral management model and evaluation method to enhance sustainability of renewable energy projects for energy and sanitation services. *Energy Sustain Dev* 2015;29:1–12. doi:10.1016/j.esd.2015.08.003.
- [34] Merino M. Fundamentos de evaluación de políticas públicas. Madrid: 2010. doi:10.1073/pnas.0703993104.
- [35] Santos SP, Amado CAF, Rosado JR. Formative evaluation of electricity distribution utilities using data envelopment analysis. *J Oper Res Soc* 2011;62:1298–319.
- [36] Khembo F, Chapman S. A formative evaluation of the recovery public works programme in Blantyre City, Malawi. *Eval Program Plann* 2017;61:8–21. doi:10.1016/j.evalprogplan.2016.10.012.
- [37] Wholey JS. Formative and Summative Evaluation: Related Issues in Performance Measurement. *Evaluation Pract* 1996;17:145–9. doi:10.1177/109821409601700206.
- [38] Henry GT, Smith AA, Kershaw DC, Zulli RA. Formative evaluation: Estimating preliminary outcomes and testing rival explanations. *Am J Eval* 2013;34:465–85. doi:10.1177/1098214013502577.
- [39] Eleanor C. Differing perspectives of evaluation. *New Dir Progr Eval* 1978;2:1–18.
- [40] Khodayar ME. Rural electricity expansion planning of off-grid microgrids. *Electr J* 2017;30:68–74. doi:10.1016/j.tej.2017.04.004.
- [41] Heuberger R. CDM Projects under the Kyoto Protocol of the UNFCCC: A Methodology for Sustainable Development Assessment and an Application in South Africa. Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 2003.
- [42] Massabié G. Venezuela: A Petro-State Using Renewable Energies: A Contribution to the Global Debate about New Renewable Energies for Electricity Generation. 1st Editio. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften; 2008.
- [43] Brundtland GH. Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. *Med Confl Surviv* 1987;4:300. doi:10.1080/07488008808408783.
- [44] Stern N. Stern Review Report 2006. https://web.archive.org/web/20061114045919/http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm (accessed November 8, 2018).
- [45] Brown KG, Brown KG, Gerhardt MW, Gerhardt MW. Formative Evaluation: an Integrative Practice Model and Case Study. *Pers Psychol* 2002;55:951–83.
- [46] Ilskog E. Rural electrification sustainability indicators:—Manual for field workers 2008.