Energías Renovables en Venezuela

Experiencias y lecciones para un futuro sostenible

López-González, PhD

MMXXI

La Cueva del Elefante

Energías Renovables en Venezuela

Experiencias y lecciones para un futuro sostenible

Segunda Edición, 2021

Fotografías Alejandro López-González

Copyright © 2020 Alejandro López-González

Todos los derechos reservados.

ISBN: 9798670221443

Al Dios Creador, a Venezuela y a mi familia

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS IV
INTRODUCCIÓN V
LA ELECTRIFICACIÓN RURAL SOSTENIBLE EN VENEZUELA 1
Antecedentes 2
Electrificación rural con Grupos Electrógenos 3
Electrificación rural con Microcentrales Hidroeléctricas 10
Electrificación rural con energías renovables en Venezuela 11
Transferencia tecnológica y fabricación nacional 14
Uso racional y eficiente de la energía 15
LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN FALCÓN 18
Sistema eléctrico del Estado Falcón 21
Electrificación rural sostenible en el Estado Falcón 22
Microrred rural híbrida de Punta Prudencio 25
Microrred rural híbrida y sistemas solares fotovoltaicos domésticos de Jacuque 26
Microrred, sistemas solares y eólicos domésticos de La Macolla 28
Microrred rural híbrida de Los Arroyos 31
Sistemas solares fotovoltaicos domésticos de Matica de Yabo 32
LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL ZULIA 34
Sistema eléctrico del Estado Zulia 37
Electrificación rural sostenible en el Estado Zulia 38
Microrred rural híbrida de Macuirrapa 44
Microrred rural híbrida de Iramacira 45
Microrred rural híbrida de Poolos 46
Microrred rural híbrida de Castillete 47
Microrred rural híbrida de Cúsia 48
Microrred rural híbrida de Taparo 50
Microrred rural híbrida y sistema de agua de Wososopo 51
Microrred rural híbrida de Machuaiya 51
Microrred rural híbrida de Punta Manglar 53
LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN BOLÍVAR 55
Sistema eléctrico del Estado Bolívar 57
Electrificación rural sostenible en el Estado Bolívar 59

SISTEMAS SFV DOMÉSTICOS EN LA COMUNIDAD DE ARAPÁN 64
SISTEMAS SFV DOMÉSTICOS EN LA COMUNIDAD DE JASPE 65
SISTEMAS SFV COMUNITARIOS EN SANTA CRUZ DE MAPAURÍ 66
SISTEMAS SFV COMUNITARIOS EN SAN RAFAEL DE KAMOIRÁN 68
LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉRIDA 70
SISTEMA ELÉCTRICO DEL ESTADO MÉRIDA 72
ELECTRIFICACIÓN RURAL EN EL ESTADO MÉRIDA 73
COMUNIDAD DE SAN ISIDRO 75
COMUNIDAD DE LAS GONZÁLEZ 76
MICRO CENTRALES HIDROELÉCTRICAS 78
MICRO-CENTRAL DE KAVANAYÉN 81
MICRO-CENTRAL DE KAMARATA 83
MICRO-CENTRAL DE WONKEN 85
MICRO-CENTRAL DE ARAUTAMERÚ 86
MICRO-CENTRAL DE LA CIUDADELA 88
MICRO-CENTRAL DE CANAIMA 89
DISCUSIÓN SOBRE LA SOSTENIBILIDAD DE LAS MICRO CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN VENEZUELA 90
LECCIONES APRENDIDAS EN LOS PROYECTOS CON MICRO CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN VENEZUELA 97
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS DOMÉSTICOS 99
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS DOMÉSTICOS COMUNITARIOS 100
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS DOMÉSTICOS INDIVIDUALES 101
SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN Y DESALINIZACIÓN DE AGUA 104
DESCRIPCIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LOS ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN VENEZUELA 106
LECCIONES APRENDIDAS EN EL PROGRAMA "SEMBRANDO LUZ" 110
SISTEMAS EÓLICOS DOMÉSTICOS 115
COMUNIDADES CON SISTEMAS EÓLICOS DOMÉSTICOS EN VENEZUELA 117
DISEÑO DE LOS SISTEMAS EÓLICOS DOMÉSTICOS DE VENEZUELA 118
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS EÓLICOS DOMÉSTICOS EN VENEZUELA 120
EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS EÓLICOS DOMÉSTICOS DE VENEZUELA 121
EVALUACIÓN DE LAS EXPERIENCIAS CON SISTEMAS EÓLICOS DOMÉSTICOS EN VENEZUELA 126
ACEPTACIÓN DE LOS SISTEMAS EÓLICOS DOMÉSTICOS ENTRE LOS USUARIOS VENEZOLANOS 132
LECCIONES APRENDIDAS EN LOS SISTEMAS EÓLICOS DOMÉSTICOS DE

VENEZUELA 134
MICRORREDES RURALES HÍBRIDAS 139
DIMENSIONAMIENTO Y ESTANDARIZACIÓN DE DISEÑO DE MICRORREDES EN VENEZUELA 141
TECNOLOGÍAS EÓLICAS Y SOLARES DE LAS MICRORREDES EN VENEZUELA 143
TECNOLOGÍAS DE RESPALDO DIÉSEL Y ALMACENAMIENTO DE BATERÍA 144
ARQUITECTURA DE LAS MICRORREDES Y ESTRATEGIA DE CONTROL 146
MODELO DE GESTIÓN COMUNITARIA DE LAS MICRORREDES 147
DISCUSIÓN SOBRE LA SOSTENIBILIDAD DE LAS MICRORREDES RURALES HÍBRIDAS EN VENEZUELA 149
LECCIONES APRENDIDAS DE LAS MICRORREDES HÍBRIDAS EN VENEZUELA 157
COMENTARIO FINAL: UN FUTURO SOSTENIBLE PARA VENEZUELA 159
ACERCA DEL AUTOR 161
BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA 162

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que dentro de la Fundación para el Desarrollo del Sistema Eléctrico (FUNDELEC) han aportado su valioso conocimiento e información para el fortalecimiento de este libro. Al Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universidad Politécnica de Cataluña (CCD-UPC) por haber cubierto los enormes costos de movilización y logística en Venezuela por más de 4 años, lo que ha sido fundamental para la realización de toda la investigación en la que se basa este libro. A los ingenieros Angel López y Leonardo López por haberme acompañado en las innumerables visitas realizadas por toda la extensión geográfica de Venezuela, en la búsqueda de estas recónditas comunidades rurales electrificadas con energías renovables y que tan poco conocidas son por el resto del país. A mi madre Elizabeth y a mi hermana Mariela, como primeras entre todas y todos quienes han creído en este proyecto que va más allá de un libro y que procura la transformación de la matriz energética venezolana hacia un modelo energético nacional verdaderamente sostenible en el siglo XX. A la Profesora Laia Ferrer-Martí y al Profesor Bruno Domenech por sus valiosos aportes y observaciones en los artículos científicos publicados en el marco de la investigación sobre las energías renovables en Venezuela.

INTRODUCCIÓN

Este libro recoge la experiencia de más de 4 años de estudio de los sistemas de generación basados en energías renovables que se han instalado en Venezuela para la electrificación de comunidades rurales aisladas, indígenas y fronterizas del país. La mayor parte de estos sistemas permanecen operativos parcial o totalmente, aunque algunos han sido desinstalados debido a fallas y falta de partes de reemplazo o carencias de mantenimiento. El propósito del libro es rescatar las experiencias con energías renovables en Venezuela para poder tener un soporte técnico, institucional, socioeconómico y ambiental para el desarrollo futuro de una mayor cantidad de iniciativas basadas en energías renovables aprendiendo de las lecciones del pasado reciente. Venezuela, es un país con un enorme potencial para el desarrollo de las energías renovables, principalmente en su norte costero de los extremos oriental (Sucre y Nueva Esparta) y Occidental (Zulia y Falcón). Este potencial debe ser aprovechado para poder lograr el pleno acceso a la electricidad para el año 2030, según lo establecen los compromisos de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, que han sido suscritos por el gobierno de Venezuela. Sin el aprovechamiento de las energías eólica y solar será imposible llevar la electricidad a todos los rincones del país y cubrir las 500 mil personas que aún carecen de una conexión eléctrica en las zonas más apartadas del país. Venezuela es uno de los países con la más alta tasa de electrificación rural de América Latina, sin embargo, aun resta un trabajo enorme por realizarse si se quiere alcanzar al 100% de los venezolanos. Las lecciones aprendidas en Venezuela pueden ser de utilidad para el avance de la electrificación rural con energías renovables en otras partes del mundo, un mundo en el que aún hay muchas comunidades donde nunca ha habido ningún tipo de acceso a la energía eléctrica.

Actualmente, alrededor de 1.200 millones de personas permanecen sin acceso a la electricidad en los países menos industrializados del mundo. Solo en América Latina, 22 millones de personas carecen de este servicio, principalmente en países como Bolivia, Colombia, Guatemala, Haití, Nicaragua y Perú. La falta de electricidad es una de las barreras más importantes para superar la pobreza. Por lo tanto, el acceso a una electricidad confiable, sostenible y moderna es indispensable para lograr los objetivos de desarrollo sostenible tales como la erradicación de la pobreza extrema, 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. 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), 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, 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 costos 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 costos 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. 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. 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. 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. 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 especifico 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 (RET, por sus siglas en inglés) 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. 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 basados en energías renovables. 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. 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 CO_2 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, suministrando energía a casi 300 millones de personas. 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, 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, 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. 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 sus siglas en inglés). Por ejemplo, Perú, con el mayor número de viviendas no electrificadas en América Latina, 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. En casos como Brasil, Bolivia, Ecuador y Venezuela, se puede observar una tendencia similar. En realidad, aunque la cooperación tecnológica internacional es beneficiosa, la participación 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. 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 el conocimiento y divulgación de los resultados y lecciones aprendidas de los 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 hacer del conocimiento de los pueblos del mundo todos los elementos para la mejora continua de los planes y programas nacionales de electrificación con energías renovables cuyo objetivo sea la reducción de la pobreza energética y el incremento del acceso a la energía.

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, libros o artículos 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. 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. 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. 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. En este contexto, en este libro se muestran los proyectos de electrificación rural sostenible más importantes en Venezuela, así como proyectos basados tanto en tecnologías diésel como en RET, en distintos contextos, para identificar sus fortalezas y limitaciones. Se evidencian los puntos de mejora continua para fortalecer la sostenibilidad, en todas sus dimensiones, a través del análisis de criterios e indicadores de evaluación pertinentes. En particular, los proyectos eólicos y solares de Venezuela surgen del programa "Sembrando Luz", del que se extraen lecciones aprendidas de proyectos en curso para la mejora de futuros proyectos en Venezuela y cualquier otra parte del mundo.

LA ELECTRIFICACIÓN RURAL SOSTENIBLE EN VENEZUELA

En Venezuela, se ha pasado de un 96,77% de electrificación en el año 2001 al 98,89% en 2011 y más del 99% en el año 2013. Entre 2001 y 2013 se han electrificado 1,8 millones de viviendas a lo largo de todo el territorio nacional, particularmente en los Municipios y Parroquias de más baja densidad poblacional y alta dispersión de las viviendas. A las comunidades rurales sin acceso al servicio eléctrico se les denomina Centros Poblados no Servidos. En estos Centros Poblados no Servidos las malas condiciones en las vías de acceso y sistemas de comunicaciones hacen de su electrificación un desafío cada vez mayor para el Estado, que está obligado a garantizar a todos los ciudadanos el acceso universal a la electricidad en condiciones sostenibles, ambiental y económicamente, según lo establece la ley del servicio eléctrico del año 2010. El suministro de electricidad a estos centros poblados se ha venido realizado mediante tres mecanismos:

1. Expansión de la red eléctrica de distribución
2. Instalación de sistemas basados en grupos electrógenos
3. Instalación de microrredes y sistemas autónomos basados en energías renovables

En el caso particular de la electrificación rural con energías renovables, entre 2005 y 2013, se han instalado alrededor de 3500 sistemas que utilizan energía solar y/o eólica, beneficiando así a unos 250 mil ciudadanos, distribuidos en más de 1000 comunidades aisladas, indígenas y fronterizas. Estos sistemas se han utilizado para electrificar tanto a viviendas como a escuelas, ambulatorios, centros de telecomunicaciones e internet, casas comunales y otros objetivos sociales. La electrificación rural en Venezuela busca contribuir con la satisfacción de los requerimientos energéticos con el propósito final de integrar a estas comunidades en su entorno regional de desarrollo económico y social y evitar los índices migratorios desde estas zonas aisladas hacia los cinturones de miseria en la periferia urbana de las ciudades principales del país. El Ministerio de Energía Eléctrica de Venezuela y la Fundación para el Desarrollo Eléctrico (FUNDELEC) estiman que, en la actualidad, aún hay alrededor de 75 mil viviendas rurales sin suministro de electricidad, distribuidas en unas 2.512 comunidades donde, en conjunto, habitan unos 120 mil habitantes. Se considera que toda comunidad que esté a una distancia del punto de conexión a la red eléctrica que sea superior a 70 km, tenga una demanda estimada menor de 2 MW y que no se encuentre considerada dentro de los proyectos de expansión de las redes de distribución, en el corto y mediano plazo, debe ser evaluada de forma

prioritaria para ser electrificada mediante sistemas independientes con energías renovables.

Antecedentes

En los últimos años se han impulsado un conjunto de iniciativas orientadas a la diversificación de la matriz energética venezolana mediante el desarrollo de estudios y proyectos para el suministro de electricidad mediante fuentes renovables de energía en comunidades históricamente desasistidas. A continuación, se presentan las principales iniciativas que se han desarrollado en Venezuela en las que se ha contemplado el uso de energías renovables, para la electrificación rural, particularmente en centros poblados no servidos:

1. La electrificación rural a gran escala comienza en Venezuela con los cambios impulsados por inicio de la democracia en el año 1958. Desde inicios de la década del 1960, la recién creada empresa estatal Electrificación del Caroní C.A. (EDELCA) inició el Programa de Microcentrales Hidroeléctricas (MCH) en la cuenca del alto río Caroní. En el marco de este programa de microcentrales, se han instalado hasta el momento más 1,3 MW en comunidades indígenas de las regiones de Guayana (Estado Bolívar) y selva amazónica venezolana (Estado Amazonas).

2. En el período comprendido entre 1969 y 1978 la empresa estatal Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico (CADAFE) emprendió un programa de electrificación rural masivo, en el cual se cubrió el 50% de todo el territorio venezolano, donde se electrificaron más de 1400 comunidades con una población menor a los 2500 habitantes. Luego, entre 1979 y 1985, se concentran los esfuerzos de electrificación rural hacia lograr la plena electrificación de todos pueblos con más de 1000 habitantes, lográndose este objetivo. Adicionalmente, se alcanza un 50% de electrificación en comunidades de menos de 500 habitantes, de mucho más difícil acceso y complicada extensión de la red.

3. En el año 1990 el Ministerio de Energía y Minas de Venezuela (MEM), coordinó un Programa de Implementación de Fuentes Alternas Renovables de Energía (FARE) en el Estado Amazonas, como parte del reforzamiento del sistema eléctrico del sur del país, tarea que fue encargada a la empresa pública CADAFE. En el marco de este plan se desarrollaron 20 proyectos con las distintas tecnologías de Fuentes Alternas Renovables de Energía (FARE).

4. En el año 1997 el gobierno venezolano, a través del Ministerio de

Energía y Minas de Venezuela (MEM) inició el programa denominado "Energía y Frontera", el cual estaba orientado a la implementación masiva de las energías renovables en las comunidades fronterizas del país.

5. En 1999, el Ministerio de Energía y Minas y la Corporación Andina de Fomento (CAF) elaboraron el "Plan Operativo de Energías Renovables (PODER)", con la finalidad de suministrar electricidad a comunidades rurales aisladas y fronterizas, a través de energías renovables. En el marco de este plan se hizo un primer levantamiento en el cual se priorizaron 31 comunidades rurales, con un total estimado de 7500 habitantes. Estas comunidades estaban distribuidas en 14 municipios de 8 estados de Venezuela. Este levantamiento sirvió de referencia para los programas actuales.

6. En el año 2002, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) elaboró el primer "Programa de Energías Renovables (PER)" con el propósito de planificar, organizar y gestionar el aprovechamiento de las energías renovables a través de la promoción de diversas actividades donde se contemplaban proyectos específicos de electrificación rural.

7. En el año 2005, se elabora el "Plan de Desarrollo del Servicio Eléctrico Nacional 2005-2024 (PDSEN)". El plan en referencia posee un apartado denominado "Electrificación de Zonas Aisladas y Económicamente Deprimidas", el cual tiene como objetivo satisfacer las necesidades básicas de servicio eléctrico de poblaciones que se encuentran desasistidas y aisladas de las redes eléctricas, mediante el uso de energías renovables.

Electrificación rural con Grupos Electrógenos

A partir de junio de 2008 el gobierno venezolano comienza la ejecución del programa de instalación de sistemas de Generación Distribuida basados en Grupos Electrógenos (generación eléctrica a partir de un moto-generador diésel). El propósito del programa ha sido, originalmente, disminuir al mínimo las interrupciones en el servicio eléctrico en zonas rurales, elevar la calidad y confiabilidad del servicio eléctrico en esas zonas y extender la red de distribución eléctrica rural sin aumentar las pérdidas técnicas, contando además con una capacidad móvil en un tipo de generación desconcentrada, dispersa en todo el territorio nacional. El programa instaló entre 2008 y 2012 alrededor de 1012 MW de capacidad en Grupos Electrógenos, para un total nacional de 1191 MW distribuidos en 1038 moto-generadores con conexión a red, en 82 emplazamientos con una capacidad de 1145,04 MW y, en

sistemas aislados, 34 moto-generados, en 8 emplazamientos con 45,5 MW de capacidad que sirven a centros poblados rurales. En la tabla 1 se muestra la cantidad de emplazamientos de generación distribuida con grupos electrógenos tanto aislados como con conexión a la red eléctrica, por estados federales. Para el año en que se alcanza la máxima capacidad de los sistemas de generación distribuida con grupos electrógenos, estos generaron un 1,8% del total de la energía consumida en el país, en zonas rurales muy apartadas de los grandes centros urbanos de Venezuela, esto se puede observar en la figura 1.

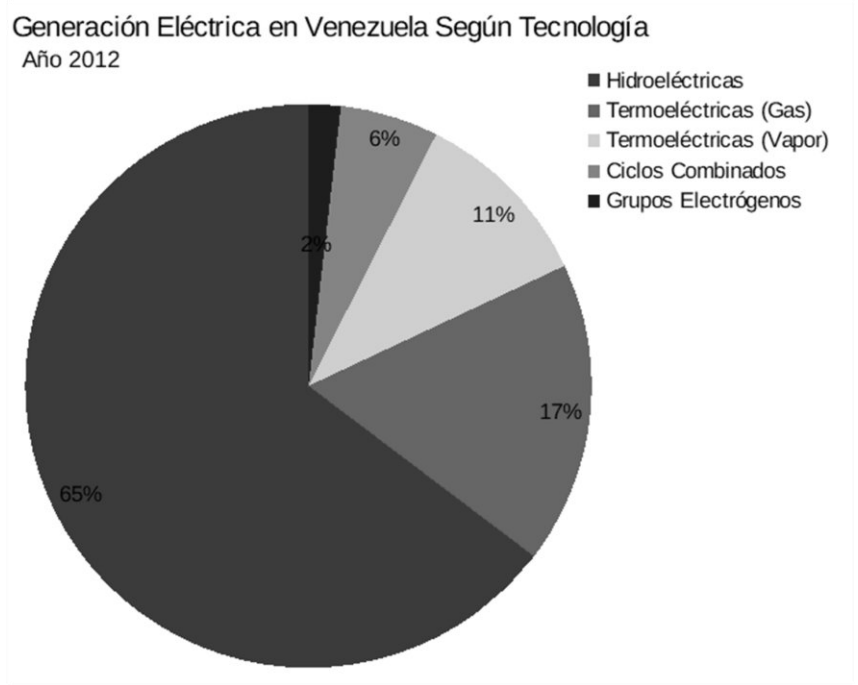


Figura 1 Generación eléctrica en Venezuela para el año de culminación del plan de instalación de grupos electrógenos (2012)

En el caso de los sistemas con conexión a red, su régimen de operación suele ser en horas pico de demanda mientras que los sistemas aislados operan las 24 horas del día. En este sentido, en la fase de diseño, los instaladores estimaron que los grupos electrógenos con conexión a red operarían hasta un máximo de 16 horas diarias, esto no ha sido estrictamente así durante la práctica. Un elemento muy importante en la electrificación rural con grupos electrógenos es el consumo de gasoil. En Venezuela entre 2008 y 2013 el consumo de gasoil por estos sistemas paso de 178,54 hasta 771,30 millones de litros anuales, respectivamente. Este consumo está asociado a un

incremento en la capacidad instalada en estos sistemas del 317%, en este mismo lapso. Estos datos se describen con detalles en la tabla 2. Por otro lado, en la figura 2 se muestra el registro anual de capacidad instalada y generación eléctrica de estos sistemas.

Tabla 1 Grupos electrógenos instalados entre 2008 y 2013 en Venezuela

Estado	Cantidad de Emplazamientos		Capacidad Instalada (MW)	
	Conexión a Red	Aislados	Conexión a Red	Aislados
Amazonas	1	4	9,6	5,4
Anzoátegui	8	-	74,5	-
Apure	6	-	77,2	-
Aragua	5	-	54	-
Barinas	6	1	94,74	5,4
Bolívar	3	1	39	15
Falcón	3	-	138,8	-
Guárico	1	-	15	-
Mérida	7	-	103	-
Miranda	1	-	15	-
Monagas	6	-	48	-
Nueva Esparta	16	1	245,8	15
Sucre	7	-	56	-
Táchira	6	-	103	-
Trujillo	2	-	44,5	-
Zulia	3	2	26,9	4,7
Total	**82**	**9**	**1145,04**	**45,5**

Tabla 2 Capacidad instalada, energía generada y combustible consumido por grupos electrógenos aislados entre 2008 y 2013

Desempeño Anual de Grupos Electrógenos	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Sin Conexión a Red						
Capacidad Instalada (MW)	11,05	29,88	38,89	46,41	45,5	45,5
Consumo de Combustible (MMLts)	4,49	6,19	16,81	15,43	12,75	11,65
Energía Generada (GWh)	13,48	17,97	52,02	47,33	40,51	35,478
Con Conexión a Red						
Capacidad Instalada (MW)	364	504	1012	1043	1146	1146

Consumo de Combustible (MMLts)	174,05	320,08	755,12	716,56	726,67	759,66
Energía Generada (GWh)	522,55	929,21	2336,78	2197,98	2308,83	2313,99

A pesar de la inmensa inversión en estos sistemas de generación y el incremento acelerado en la capacidad instalada de los mismos entre los años 2010 y 2013, la disponibilidad de los moto-generados declina en ese período y esto se refleja en una disminución en la energía generada. Es así como, a pesar de que entre 2010 y 2013 se incrementa la capacidad en más de 130 MW, la energía generada disminuye en este mismo período en más de un 12%. La tendencia al aumento en la energía generada con grupos electrógenos, proporcionalmente a la capacidad instalada, que se observa entre 2008 y 2010 decae notablemente hacia el año 2013. En el caso de los sistemas de generación con grupos electrógenos en sistemas aislados, debido a su régimen de operación continua, la disponibilidad de los equipos decae de forma aún más acentuada. Para el caso de los grupos electrógenos instalados en centros poblados rurales aislados de la red eléctrica, la demanda eléctrica mensual es similar a la demanda eléctrica nacional de Venezuela, particularmente en los meses de mayor demanda, es decir, entre los meses de julio y noviembre. Esto se muestra de forma gráfica en la figura 3.

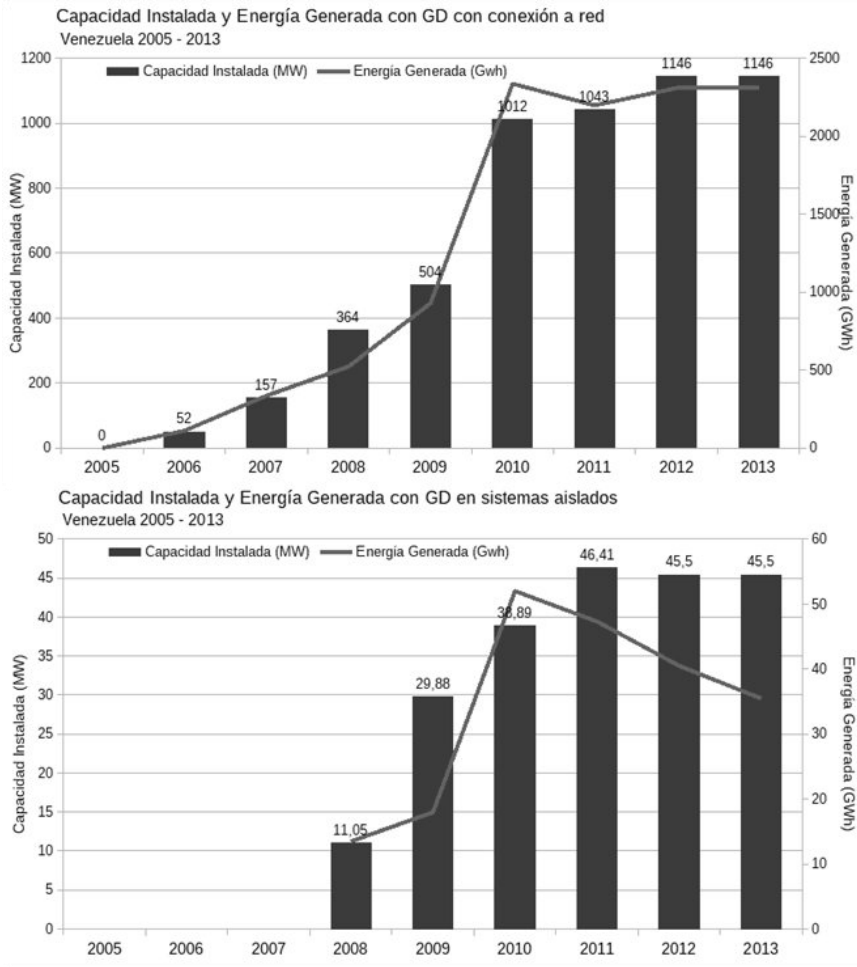


Figura 2 Capacidad instalada y generación de grupos electrógenos en comunidades rurales de Venezuela, con y sin conexión a red, entre los años 2005 y 2013

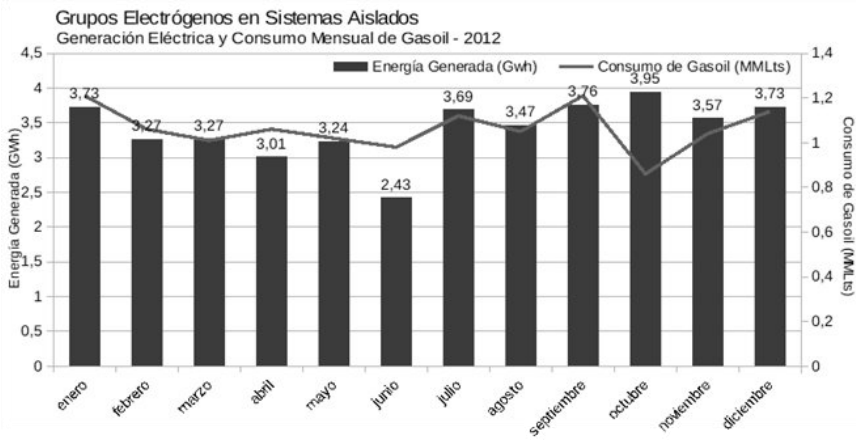


Figura 3 . Energía generada mensualmente en grupos electrógenos en comunidades aisladas de la red y su consumo de combustible en 2012

Entre los años 2008 y 2013 puede observarse que aunque los grupos electrógenos aportan la mayor parte de la energía que se genera en redes aisladas, la energía que generan con relación a la capacidad instalada ha tendido a disminuir en los últimos años debido a su desmejora en el factor de capacidad. Estas unidades presentan fallos recurrentes debido a sus frecuentes necesidades de mantenimiento y la dificultad para realizarlos oportunamente debido a la lejanía de los emplazamientos de los principales centros urbanos. Adicionalmente, el suministro de gasoil representa una gran dificultad que, en ocasiones, provoca la interrupción del servicio en las comunidades servidas por estos sistemas. Entre 2005 y 2013, la energía eléctrica generada con fuentes renovables en las comunidades aisladas, indígenas y fronterizas de Venezuela pasó de 2,8 GWh hasta 11,8 GWh, es decir, ha tenido un incremento superior al 400%. Por otro lado, los grupos electrógenos aun cuando desde el inicio del programa, en 2008, han pasado a ser la primera tecnología de generación rural en el país, han venido decayendo en su capacidad de generación entre 2010 y 2013, debido a las razones antes expuestas y siguiendo un comportamiento similar a los grupos electrógenos en comunidades rurales, con conexión a red.

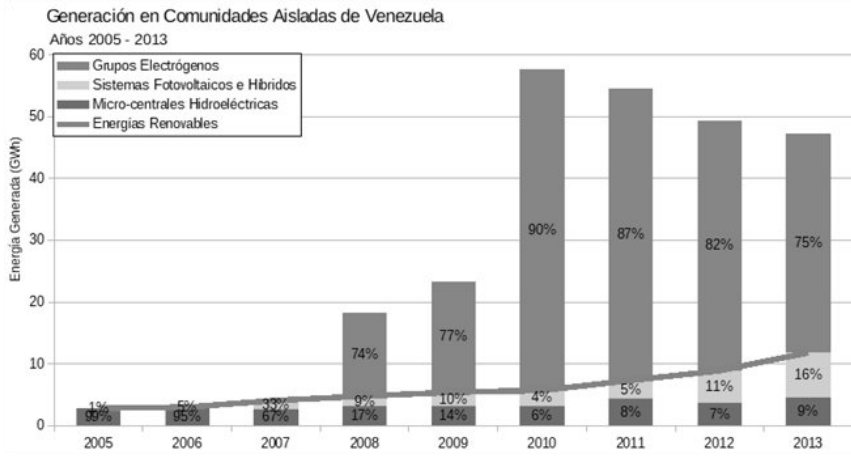


Figura 4 Generación eléctrica en comunidades rurales de Venezuela, aisladas de la red eléctrica, según el tipo de tecnología empleada, entre los años 2005 y 2013

Debido al declive en la disponibilidad de los grupos electrógenos, las energías renovables han pasado de cubrir un 10% de la energía generada en redes rurales aisladas a cubrir un 25% en el año 2013, mientras que los grupos electrógenos han bajado de un 90% hasta un 75% de participación en la energía generada en estas mismas comunidades. Esto se puede observar en la figura 5.

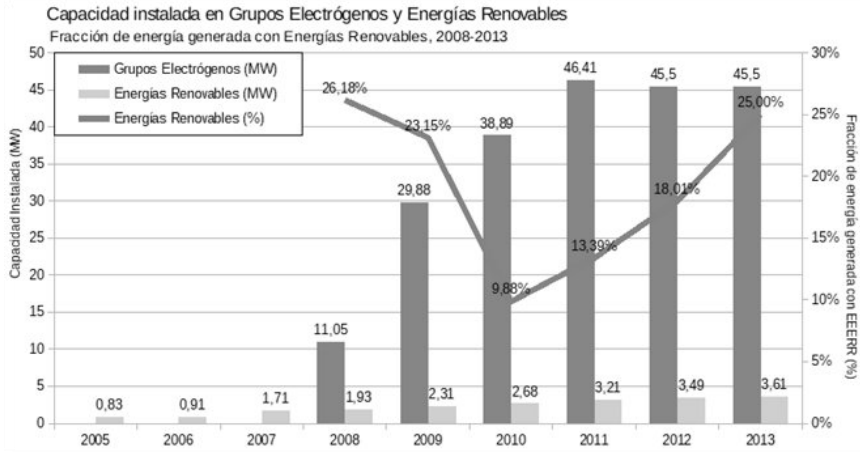


Figura 5 Capacidad instalada en comunidades rurales de Venezuela, aisladas de la red eléctrica, y fracción de energía generada con renovables, entre los años 2005 y 2013

Electrificación rural con Microcentrales Hidroeléctricas

Venezuela es pionera en el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico disponible en los ríos, en Suramérica. Particularmente, en el aprovechamiento a través de instalaciones que actualmente son tipificadas como micro-centrales hidroeléctricas (MHP, por sus siglas en inglés). Entre las microcentrales construidas en Venezuela está la de Wonken, instalada en 1983, ubicada en la misión que lleva su nombre en el Estado Bolívar, entre los ríos Caruay y Macarupuey en la cuenca del alto Caroní y posee una turbina del tipo Banki diseñada y construida por la exoperadora EDELCA (hoy Corpoelec), es capaz de generar 58 kW de potencia para 800 pobladores aproximadamente.

La micro-central de Kavanayén: es la más antigua (1957). Ubicada en la Misión de Kavanayén, cerca del Río Apacairao, posee una turbina Francis con 110 kW de potencia, para una población aproximada de 1100 habitantes. La micro-central hidroeléctrica de Kamarata, puesta en servicio en 1962, está ubicada en la Misión de Kamarata, en la Gran Sabana (Estado Bolívar), cerca de la quebrada Tapere. Posee una turbina Francis que tienen capacidad de generar hasta 60 kW para servir a una población de 800 habitantes aproximadamente, tanto la micro-central de Kamarata como la de Kavanayen fueron construidas por los misioneros Capuchinos de origen español, durante la evangelización católica de los indígenas del alto Caroní promovida por el gobierno nacional venezolano desde inicios del siglo 20. Posteriormente, fue construida la micro-central Arautamerú: en el año 1988 sobre el río Yuruaní, con una capacidad instalada de 150 kW. Esta micro-central utiliza 6 turbinas Banki de 25 kW, cada una. La micro-central Cúao, instalada en 1990, se encuentra en el río Cúao, en el Estado Amazonas, sirve a la población que allí habita y tiene una capacidad instalada de 30 kW, Y la micro-central de Canaima, instalada en 1994 como parte del aporte para el desarrollo Social y económico de la región, enclavada en el Parque Nacional Canaima en la comunidad indígena de Kanaimó, en las márgenes del río Carrao, genera hasta 800 kW. Todas las micro-centrales suministran energía en sistemas aislados sin conexión a la red eléctrica.

En la tabla 3 se muestran las características generales de las microcentrales. Todas las microcentrales sirven a comunidades indígenas. Todas las micro-centrales hidroeléctricas están colocadas en ríos afluentes al río Caroní. Por lo tanto, la estacionalidad de este río es un indicador del recurso disponible para ser turbinado en las micro-centrales. En los meses de mayor demanda es cuando menos aportes hay en los ríos. Con estos datos no es suficiente para extraer conclusiones determinantes.

Tabla 3 Micro-centrales Hidroeléctricas en Venezuela, en la actualidad (2016)[1]

Micro-central	Estado	Ubicación	Unidades	Capacidad Instalada (kW)	Energía Generada Anual (Mwh)	Energía Promedio Mensual (Mwh)	Beneficiarios
Cuao	Amazonas	Río Cuao	2	30	5	5	210
Arautamerú	Bolívar	Salto Arauta	6	150	806	50	1300
Canaima	Bolívar	Salto Hacha	1	400	2131	110	1700
Kamarata	Bolívar	Quebrada Tapere	1	60	120	15	930
Kavanayen	Bolívar	Río Apacairao	1	110	454	54,5	1053
Wonken	Bolívar	Río Macarupuey	1	58	166	13	600
Total			**12**	**808**	**3682**	**247,5**	**5793**

Electrificación rural con energías renovables en Venezuela

Desde el año 2005, la Fundación para el Desarrollo del Servicio Eléctrico (FUNDELEC), ente público adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica (MPPEE), ha venido desarrollando el Programa ***"Sembrando Luz"*** que ha sido una iniciativa con la cual se han ejecutado diversas soluciones de electrificación rural y suministro de agua potable, aprovechando la energía solar, eólica y, próximamente, hidroeléctrica. Este programa define como propósito principal el impulso, desarrollo y aprovechamiento del abundante potencial en energías renovables de Venezuela, en el marco de una política pública de diversificación de la matriz energética. El Programa "Sembrando Luz" busca dotar de servicios básicos como electricidad y agua potable, a comunidades ubicadas en zonas aisladas, indígenas y fronterizas, promoviendo la inserción de esquemas energéticos no contaminantes de energía de forma racional y con equilibrio ambiental. El programa nació enmarcado dentro del Convenio Integral de Cooperación

[1] Gracias a la colaboración de la persona encargada de la Biblioteca Especializada de la Corporación Venezolana de Guayana (CVG), se ha tenido acceso a mucha información más detallada e histórica de las micro-centrales del estado Bolívar. Se cuenta con los estudios pluviométricos desde 2001 hasta 2006 y los estudios de 2015, así como con todas las variables de viento y radiación solar de las estaciones climatológicas asociadas a cada micro-central, en ese mismo período.

entra las Repúblicas de Cuba y Venezuela y asume al suministro universal del servicio eléctrico como forma eficaz de promoción de la inclusión social.

Luego de una fase inicial de electrificación basada únicamente en sistemas solares fotovoltaicos si inicia un plan basado en el desarrollo de proyectos con microrredes rurales híbridas. El plan inició en el año 2009 con el Sistema Híbrido de Jacuque en Paraguaná, Estado Falcón. Esta tecnología está integrada por un aerogenerador de 2 y/o 3 palas, paneles fotovoltaicos y electrógenos a diésel de respaldo. Para el control y sincronización de cada uno de los componentes se emplean inversores basados en algoritmos y sistemas de conversión con electrónica de potencia. La potencia máxima para consumir por vivienda no debe exceder los 450 VA, con un consumo de energía diaria que no debe superar los 2 kWh / día (60 kWh / mes). FUNDELEC, ha considerado adecuada esta tecnología para zonas con un potencial eólico mínimo, como el que se presenta en algunas comunidades aisladas ubicadas al norte de los estados Zulia, Falcón, Anzoátegui y Sucre, así como en algunos valles de los páramos andinos del estado Mérida. Hasta el momento, se han instalado 14 sistemas híbridos en los estados Zulia, Falcón y Mérida. Estos sistemas han beneficiado a alrededor de 300 familias y 1500 personas. Se tiene prevista la instalación de 34 sistemas más.

Tabla 4 Microrredes rurales híbridas instaladas en Venezuela

Estado	Comunidad	Aerogeneradores (kWp)	Placas Fotovoltaicas (Wp)	Grupo Electrógeno (kW)	Baterías (A-h)	Viviendas Electrificadas
Falcón	Prudencio	1x6	36 x 150	14	48 x 800	12
	Jacuque	1x3	20 x 150	9	24 x 1080	8
	La Macolla	1x6	36 x 150	14	48 x 800	7
	Los Arroyos	1x6	36 x 160	14	48 x 800	12
Zulia	Poloos	1x6	36 x 150	14	48 x 800	24
	Taparo	1x6	36 x 150	14	48 x 800	15
	Iramacira	1x6	36 x 160	14	48 x 800	14
	Wososopo	1x6 + 1x3	56 x 150	19	48 x 800	26
	Machuaiya	1x6	36 x 150	14	48 x 800	17
	Castilletes	1x6	36 x 150	14	48 x 800	6
	Cúsia	2x6	72 x 150	23	96 X 800	36
	Macuirrapa	1x6 + 1x3	56 x 150	19	48 X 1200	26
	Punta Manglar	1x6 + 1x3	56 x 150	19	48 x 800	16
Mérida	Las González (1)	1x6	36 x 150	14	48 x 800	15
	Las González (2)	1x6 + 1x3	56 x 150	19	48 x 800	24

Tabla 5 Comunidades con electrificación basada en energías renovables en Venezuela

Tipo de comunidades Beneficiadas	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Total
Indígenas	2	20	169	55	52	30	21	91	5	445
Aisladas y Fronterizas	11	33	209	74	78	32	18	21	11	487
Total Anual	**13**	**53**	**378**	**129**	**130**	**62**	**39**	**112**	**16**	**932**

Estandarización y clasificación por tipos de sistemas: La estandarización y clasificación por tipo de sistema es una forma de reducir los tiempos de respuesta para la elaboración de cada uno de los proyectos de electrificación rural. Se realizó la estandarización de los sistemas para la electrificación de centros poblados rurales no servidos, considerando las características climatológicas del emplazamiento. Al agrupar emplazamientos con características climatológicas similares, se puede simplificar considerablemente el proceso de diseño de los sistemas de generación asociados, lo que reduce los tiempos de evaluación preliminar del proyecto. Luego, un diseño de sistema tipo puede ser aplicable como solución técnica a varios emplazamientos con características similares. La estandarización se ha considerado valiosa en la fase de diseño inicial ya que ha servido para orientar los proyectos en el ámbito de la factibilidad, sin embargo, para la fase final de implementación de los sistemas se requiere una evaluación en sitio, con la finalidad de detectar desviaciones que ocasionen ajustes en los sistemas planteados, según las características del emplazamiento y de las poblaciones. En el apartado dedicado a la descripción de la metodología aplicada se describe con más detalles el proceso de estandarización que se ha seguido en Venezuela.

Transferencia tecnológica y fabricación nacional

Los proyectos de electrificación rural, descritos en los apartados anteriores, han sido ejecutados en sus primeras fases con tecnología importada. Así es el caso de los sistemas híbridos instalados por Fundelec, que emplean aerogeneradores de tecnología española. En el año 2009, el estado venezolano firmó un contrato de 2 millones de euros con la empresa Bornay para la primera fase del proyecto de sistemas híbridos para la electrificación de comunidades aisladas, indígenas y fronterizas en Venezuela. En el marco de ese contrato se han instalado los aerogeneradores de los primeros quince (15) sistemas híbridos y se tienen previstos 34 más. De la misma manera, los primeros paneles solares de las fases 1 y 2 del programa de electrificación "Sembrando Luz" fueron comprados a la empresa española Isofoton. Considerando las necesidades de electrificación y la gran cantidad de equipos necesarios para alcanzar el acceso universal al servicio eléctrico, los gobiernos de Venezuela y Cuba han acordado la creación de una empresa estatal de fabricación de estos componentes. En este sentido, se adquirió la licencia para fabricación de aerogeneradores Bornay en Venezuela. En cuanto a los paneles solares, empresa cubana Copextel suministra las celdas solares para su ensamblaje, en módulos solares, en Venezuela. Estas actividades se concentran en una única empresa llamada Unidad de Energías Renovables de Venezuela (UNERVEN) que es filial de Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA) y lleva toda la fabricación nacional de mini aerogeneradores y el ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos.

Tabla 6 Aerogeneradores ensamblados en Venezuela por UNERVEN

Modelo	Capacidad Nominal (W)	RPM Nominal	Diámetro (mts)	Número de palas	Tensión de salida (DC)
ABP-1500	1500	700	2,86	2	24
ABP-3000	3000	500	4	2	24
ABP-6000	6000	600	4	3	48

UNERVEN cuenta con dos líneas de producción. En una línea se fabrican Aerogeneradores de Baja Potencia (ABP) con potencias nominales de 1500 W, 3000 W y 6000 W (Ver tabla 6). La fábrica tiene la capacidad de producir hasta 200 unidades anuales en 1 turno de trabajo. Estos aerogeneradores son modelos similares a los que previamente se compraban a Bornay. En la otra línea se ensamblan módulos solares fotovoltaicos (MSF), cuya capacidad instalada es de alrededor de 20 mil unidades al año en 1 turno de trabajo. El módulo ensamblado en el país es el MSF-195, con una capacidad de 195 Wp y una tensión de salida en 24 V. Las celdas solares son suministradas por Copextel y son de la marca NUMEN. UNERVEN forma parte de uno de los seis grupos industriales que tiene PDVSA, dedicados a la manufactura liviana. Se complementa con el resto de las industrias y fábricas de suministros para la prestación y mejora de los servicios públicos en comunidades aisladas, así como para la electrificación de viviendas de interés social actualmente en proceso de construcción, en el marco del plan nacional de construcción de viviendas. La sostenibilidad de los proyectos de electrificación en zonas aisladas, indígenas y fronterizas exige el establecimiento de mecanismos que permitan asegurar la perdurabilidad y buen funcionamiento de los sistemas en las diversas aplicaciones (fotovoltaicos, de potabilización e híbridos) que se vienen instalando a nivel de toda Venezuela. Al contar con una fábrica nacional y habiendo previamente estandarizado los sistemas a instalarse, se garantiza la capacidad de mantenimientos mayores y reemplazo oportuno de partes deterioradas.

Uso racional y eficiente de la energía

Venezuela es un país donde, históricamente, debido a los bajos costos y la abundancia de energía, se ha consumido mucha electricidad y de forma ineficiente. Esta cultura de derroche energético se expresa en un conjunto de hábitos, costumbres y prácticas que contribuyen al uso irracional de la electricidad por parte de los usuarios, aún a pesar de los esfuerzos realizados en los últimos años por el Estado, a través de programas de concientización, en pro del desarrollo de una cultura energética más racional y eficiente. Por esta razón, se han iniciado otros programas con metas más cuantificables en

cuanto al uso de la energía. Uno de los programas más importantes es el de "Sustitución de Bombillos Incandescentes por Fluorescentes Compactos", en el marco del cual se sustituyeron entre 2006 y 2012 más de 150 millones de bombillos, incorporando a este proceso a las organizaciones comunitarias de base como consejos comunales y asociaciones de vecinos. Con esta medida se ha logrado una disminución en la demanda de 1.800 MW en hora pico. Además, a través de modalidades de financiamiento parcial y total se han sustituido más de 100.000 equipos acondicionadores de aire y refrigeradores en alrededor de 12 estados del país, concentrados en el sector residencial tanto urbano como rural.

Tabla 7 Comparación entre bombillos de fabricación estatal y bombillos incandescentes

Característica	**VIETVEN E-27**	**Incandescente**
		Equivalente
Potencia (W)	18	90
Vida Útil (hrs)	6000	1000
Tipo de Luz	Blanca	Amarilla

Considerando los enormes costes de importación de bombillos fluorescentes compactos y el volumen requerido para reducir la demanda, el gobierno venezolano creó en el año 2010, a través de un convenio con la República de Vietnam, la empresa de fabricación de bombillos VIETVEN Iluminaciones, ubicada en la península de Paraguaná, en el estado Falcón. La empresa cuenta con 70% de capital venezolano y 30% vietnamita. Los bombillos que se producen en esta fábrica, modelo Vietven E-27, consumen un 80% menos de energía con respecto a uno incandescente de la misma capacidad lumínica y su precio de venta al público es de una sexta parte de estos (Ver tabla 7). La estatal produce diariamente 50 mil bombillos y al mes puede alcanzar una producción de 1 millón de unidades, unos 12 millones al año. En 2015 si inició la internacionalización de estos productos pues se exportó el primer lote de 130 mil bombillos fluorescentes compactos a Surinam. Estos bombillos son distribuidos para su comercialización en las redes públicas de ventas de alimentos y suministrados directamente, sin coste, a los beneficiarios de sistemas de electrificación rural basados en energías renovables y/o grupos electrógenos, en campañas periódicas de sustitución. En el caso de los usuarios de sistemas de electrificación rural basados en energías renovables, Fundelec realiza charlas de formación en cuanto al uso racional y eficiente de la energía. Los usuarios deben utilizar solo bombillos fluorescentes compactos y se les entrega una lista de los equipos que pueden y no pueden utilizar en los casos de Sistemas Fotovoltaicos de 600 Wp (SFV-600) y usuarios de sistemas híbridos, independientemente de la capacidad del sistema (Tabla 8).

Tabla 8 Instructivo entregado por Fundelec a usuarios de sistemas SFV-600 y Micorredes rurales híbridas

Electrodoméstico	**Cantidad Permitida**	**Uso Diario (Hrs)**	**Consumo Diario (Wh)**
Televisor	*1*	*5*	*400*
Bombillos E-27	*5*	*5*	*275*
DVD/Blue Ray	*1*	*5*	*125*
Nevera	*1*	*24*	*1200*
Plancha	0	-	-
Tostador	0	-	-
Soldadora	0	-	-
A/A	0	-	-
Lavadora	0	-	-
Secador	0	-	-
Horno Electrico	0	-	-
Ordenador	1	*	*
Impresora	1	*	*
Licuadora	1	*	*
Radio/Reloj	1	*	*
Otros (<100W)	1	*	*
El consumo máximo diario no debe exceder los 2000 Wh			

LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN FALCÓN

El Estado Falcón posee una superficie de 24.800 Km², lo que representa el 2,81% del territorio venezolano, limita al Norte con el Golfo de Venezuela y el Mar Caribe, por el Noroeste con el Mar Caribe y las islas de Aruba, Curaçao y Bonaire, al sur limita con los Estados Yaracuy y Lara, y al Oeste con el Estado Zulia y el Golfo de Venezuela. Su capital es Coro (Municipio Miranda) que tiene al norte a la península de Paraguaná (Municipios Carirubana, Los Taques y Falcón), unida al continente por el istmo de los Médanos, con 27 km de largo y 6 km de ancho. Actualmente, el estado Falcón está constituido por 25 municipios que, a su vez, se dividen en 83 parroquias de las cuales 50 están constituidas por pueblos, aldeas y caseríos íntegramente rurales (60% de las parroquias son rurales). En estas parroquias rurales, de baja densidad poblacional, se agrupa un 25,56% (230.754 personas) del total de la población de Falcón (902.847 personas). Falcón es el Estado más seco de Venezuela y el punto continental más septentrional del país. Las condiciones desérticas de sequedad extrema se reconocen en el litoral occidental y, sobre todo, en el istmo de Los Médanos de Coro, con temperaturas anuales promedio entre 28 y 29 °C. La hidrografía del estado es pobre y las precipitaciones son escasas hacia la costa, Litoral Occidental y Península de Paraguaná, con medias anuales de 800 a 1.200 mm en las áreas de mayor altura. La época de lluvias es bastante corta, generalmente entre los meses de octubre y diciembre. El clima semiárido de precipitaciones escasas domina tanto en el litoral Occidental como en la península de Paraguaná, en donde se encuentran las comunidades rurales y electrificadas con energías renovables de Los Arroyos y Matica de Yabo (Litoral Occidental) y Punta Prudencio, Jacuque y Punta Macolla (Península de Paraguaná). En la vegetación de estas comunidades del predominan los cardonales y una variedad particular de plantas fuertemente armadas con espinas. En las comunidades rurales en general, y particularmente en las de la península de Paraguaná y litoral occidental de Falcón, las actividades económicas de la población son la cría de ganado caprino y bovino, producción de leche, queso, conservas y cueros, así como la pesca, que es muy importante en todo el estado siendo el tercero en producción de pescado en toda Venezuela, después del estado Sucre y la Isla de Margarita. La actividad petrolera es la más importante en el estado Falcón debido a la presencia de las dos refinerías más grandes de Latinoamérica: Amuay y Cardón. En 1997 las actividades de estas dos refinerías fueron concentradas con la de Bajo Grande (Estado Zulia) y se constituyó el Centro de Refinación de Paraguaná (CRP) que es actualmente el segundo complejo refinador con mayor capacidad del mundo,

justo después de Jamnagar (India) y seguido por la refinería Ulsan (Corea del Sur). Los ingresos petroleros son la principal fuente de financiamiento para todos los proyectos energéticos alternativos venezolanos tanto en el occidente del país (Zulia, Mérida y Falcón) como en el Sur (Bolívar).

Figura 6 (A) Comunidad rural de La Macolla electrificada con una Micorred rural híbrida y varios aerogeneradores de baja potencia; (B) Punta Prudencio electrificada con una Microrred rural híbrida; (C) Jacuque electrificada con la primera Microrred rural híbrida de Venezuela

Sistema eléctrico del Estado Falcón

El sistema eléctrico de Falcón cuenta con una capacidad de generación termoeléctrica de 782 MW que puede cubrir entre el 70% y el 100% de la demanda eléctrica total del estado según la disponibilidad de las unidades del parque de generación, el resto de la potencia demandada es aportada por la red nacional de transmisión que aporta entre 100 MW y 200 MW, según sea requerido. Históricamente, la calidad del servicio eléctrico en este estado ha sido de las más bajas de Venezuela evidenciado en 2011 con un indicador de Tiempo Total de Interrupciones (TTI) de 40 horas, muy por encima del promedio nacional de 24,9 horas. En cuanto a la cobertura del servicio eléctrico, en conjunto, generación propia y red nacional de transmisión, suministran electricidad al 96,1% de la población. El conjunto restante de viviendas corresponde a un 2,6% que aún carece de acceso al servicio y un 1,3% que se abastece a través de sistemas domésticos propios de electrificación y sistemas basados en energías renovables instalados por el gobierno nacional. Cabe mencionar que, debido a los ajustes realizados durante la nacionalización y centralización de todo el sistema eléctrico nacional en una única empresa (Corpoelec), el 70% de los usuarios del servicio eléctrico, en Falcón, no cuentan con medidor de consumo eléctrico.

Tabla 9 Sistema de Generación del Estado Falcón

Planta de Generación Termoeléctrica	Capacidad Instalada (MW)
Punto Fijo	103,4
Coro	95,4
Josefa Camejo	450
Dabajuro	15,6
Grupos Electrógenos	117,6
Total	**782**

El conjunto de plantas termoeléctricas de Falcón genera anualmente alrededor de 3000 GWh consumiendo para ello unos 800 millones de litros de gasoil y 100 mil millones de metros cúbicos de gas. Este funcionamiento del sistema eléctrico regional implica un factor de emisiones ponderado anual de 0,201 kg Eq CO_2 / kWh.

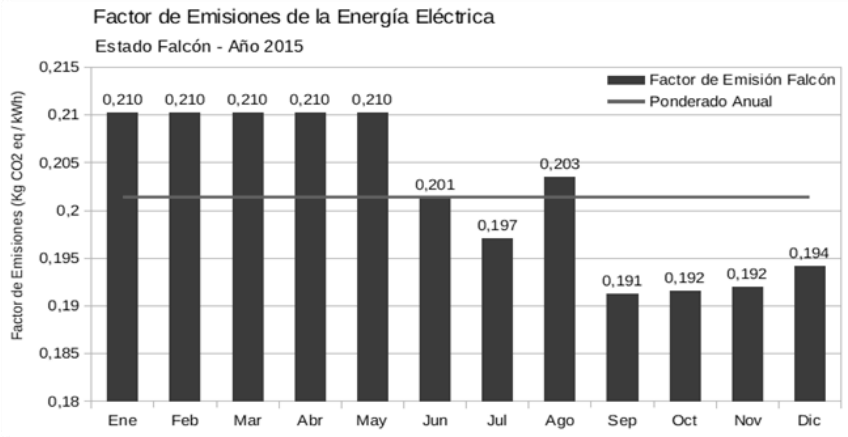


Figura 7 Factor de emisión de GEI del sistema eléctrico en Falcón

Electrificación rural sostenible en el Estado Falcón

Entre los años 2001 y 2013, el índice de electrificación rural en el estado Falcón aumentó de un 89,2% hasta un 97,4%. En el año 2001, existía una marcada diferencia en los niveles de electrificación de los municipios rurales y de los municipios urbanos del estado Falcón ya que mientras que en los municipios urbanos un 7% de la población carecía de servicio eléctrico, en los municipios rurales esta cifra ascendía hasta el 14%, es decir, había una diferencia del 7% más de viviendas sin electrificar en el campo que en las ciudades de Falcón. En el año 2013 la brecha se redujo a un 2% debido al incremento en el índice de electrificación rural. Esto implica una disminución de alrededor del 80% en el número de viviendas rurales sin acceso al servicio eléctrico y una importante mejora en la calidad de vida de más de 10 mil familias. Es importante destacar que, entre 2001 y 2013, la cantidad de viviendas rurales en Falcón se incrementó en un 27,7%. Por lo tanto, para cubrir este crecimiento y lograr la mejora en el índice de electrificación rural se han tenido que electrificar alrededor de 10390 viviendas rurales lo que incluye las 8100 viviendas construidas durante ese período y unas 2 mil más que nunca habían tenido acceso a la electricidad. Estos valores implican que el índice de electrificación rural ha aumentado un 43% más que la cantidad de viviendas rurales del estado Falcón, durante este mismo tiempo.

Los municipios de Falcón en los cuales existe más de un 50% de población rural presentan una densidad poblacional media ponderada de 28,6 hab / km2 mientras que en aquellos en los cuales más del 50% de la población es urbana el valor es del 41,9 hab / km2. Se ha encontrado que existe una relación entre la densidad poblacional y el porcentaje de viviendas sin electrificar en cada Municipio. En este sentido, en la medida que la densidad

poblacional de un municipio es mayor la cantidad de viviendas sin acceso a la electricidad decrece exponencialmente (Figura 9). Esta relación es válida para el sistema de servicio eléctrico liberalizado existente en Falcón hasta el año 2001, pero ha cambiado con el aumento de la tasa de electrificación rural en este estado derivada de la nacionalización del sector, tal y como se muestra en la figura 8. De tal manera que la relación inversamente exponencial entre densidad poblacional y viviendas sin acceso a la electricidad ya había desaparecido para el año 2013.

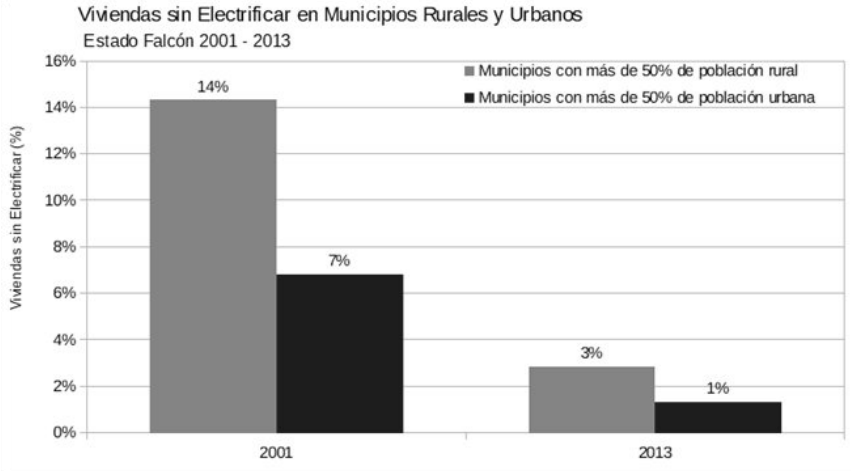


Figura 8 Reducción en la brecha de electrificación entre municipios rurales y urbanos en el estado Falcón de la República Bolivariana de Venezuela, entre 2001 y 2013

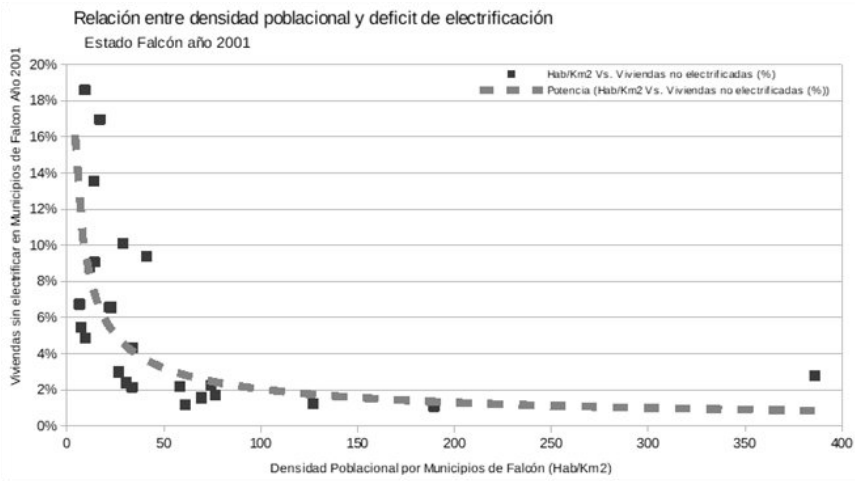


Figura 9 Relación entre las viviendas sin electrificar y la densidad poblacional por municipios del estado Falcón en 2001

En Falcón se ha producido una ampliación de la capacidad de generación, transmisión y distribución de la red eléctrica nacional y estadal, se han instalado sistemas de generación distribuida con grupos electrógenos en los extremos de la red de distribución y sistemas basados en energías renovables, particularmente en los municipios y parroquias con mayor índice de población rural. Entre los sistemas de electrificación con energías renovables en todo el estado Falcón (267 viviendas e infraestructuras comunitarias) el 76% se abastecen de sistemas fotovoltaicos autónomos (SFV), el 15% de Sistemas Híbridos eólico-solar-diésel (SH) y el restante 9% de Aerogeneradores de Baja Potencia Autónomos (ABP).

Tabla 10 Parroquias y/o comunidades rurales de Falcón con viviendas electrificadas con sistemas basados en energías renovables, para el año 2013

Parroquia	Comunidad	Viviendas Electrificadas con Energías Renovables				Generación a gasoil	Otro tipo de Generación	Red Eléctrica Pública	Total Año 2013	
		SFV	ABP	SH	Total				Con Servicio Eléctrico	Sin Servicio Eléctrico
Zazárida	Los Arroyos	-	-	12	29	3	-	282	314	0*
	Matica de Yabo	17	-	-						
Santa Ana	Punta Prudencio	-	-	12	14	6	1	3720	3741	21
	Caseto	1	-	-						
	El Cayude	1	-	-						
Avaria	El Solito	26	-	-	26	14	2	167	209	58
Jadacaquiva	Jacuque	16	-	8	81	12	5	887	985	0*
	La Macolla	24	13	7						
	Miraflores	1	-	-						
	Punta Macolla	1	11	-						
Casigua	Casigua	2	-	-	38	12	-	1794	1844	0*
	Varguitas	36	-	-						
Sabaneta	Agua Viva	1	-	-	21	-	-	1059	1080	17
	Chuchure	1	-	-						
	Conejal	1	-	-						
	El Palmar	1	-	-						
	Sabaneta	1	-	-						
	Turamaco	16	-	-						
El Charal	Los Riegos	1	-	-	34	12	-	743	789	0*
	Carpita	33	-	-						
Total		**180**	**24**	**39**	**243**	**59**	**8**	**8652**	**8962**	**96**

En las comunidades y/o parroquias rurales de Falcón del total de viviendas electrificadas entre 2001 y 2013, la electrificación con energías renovables ha significado el acceso a la electricidad para un 12% de ellas, un 3% autogeneran a partir de gasoil y el 85% restante fueron integradas en la red de distribución estadal. En la tabla 10 se muestran las comunidades en las cuales se ha instalado la mayoría de los sistemas de electrificación basados en energías renovables en el estado Falcón y la situación de suministro eléctrico de las mismas para el año 2013.

Figura 10 Microredes rurales híbridas instaladas en el estado Falcón en el marco del programa "Sembrando Luz" de Fundelec

Microrred rural híbrida de Punta Prudencio

La comunidad pesquera de Punta Prudencio está ubicada en la parroquia de Santa Ana, en el Municipio Carirubana del estado Falcón. El pueblo está ubicado a 5 kilómetros, por carretera de tierra, desde la avenida intercomunal Coro-Punto Fijo y a misma distancia de la red de distribución más cercana.

Esta comunidad fue electrificada con una microrred rural híbrida del tipo 20-Viviendas.

Tabla 11 Sistema Híbrido de la Microrred Rural de Punta Prudencio (SH-20)

Aerogeneradores (kWp)	Placas Fotovoltaicas (kWp)	Grupo Electrógeno (kW)	Respaldo en Baterías (A-h)	Denominación Estándar Venezolana	Viviendas Electrificadas
1 x 6 kWp	36 x 150 Wp	14 kW (0,8 fp)	48 x 800 A-h	20-Viviendas	12

Figura 11 Sistema Híbrido de la Microrred Rural de Punta Prudencio

Microrred rural híbrida y sistemas solares fotovoltaicos domésticos de Jacuque

La comunidad de Jacuque que está ubicada en la parroquia de Jadacaquiva, en el Municipio Falcón del estado Falcón. La comunidad está ubicada a 10 kilómetros, por carretera de tierra de la próxima vía asfaltada en "La Guadalupe" y a 15 kilómetros del pueblo de Jadacaquiva (Capital de Parroquia) y a la misma distancia de la red de distribución más cercana. Además, se encuentra a 11 kilómetros por carretera de tierra de la Comunidad de "La Macolla". Jacuque fue la primera comunidad del país electrificada con un Sistema Híbrido, en este caso, del tipo 10-Viviendas. Igualmente, hay sistemas fotovoltaicos (SFV) domésticos de 600 W instalados aquí que son los más viejos del país. Hay 8 viviendas electrificadas a través de una red de distribución en baja tensión de 120 V de la microrred rural híbrida de la

comunidad. En el pueblo hay una escuela que cuenta con un SFV e internet. Es una comunidad donde las familias habitan de forma permanente y se dedican a la cría de ganado caprino, elaboración de queso y conservas con leche de cabras. No hay servicio de agua. Sin embargo, la comunidad cuenta con un sistema de potabilización de agua a partir de un pozo que emplea energía solar fotovoltaica para su funcionamiento.

Tabla 12 Sistema Híbrido de la Microrred Rural de Jacuque (SH-20)

Aerogeneradores (kWp)	**Placas Fotovoltaicas (kWp)**	**Grupo Electrógeno (kW)**	**Respaldo en Baterías (A-h)**	**Denominación Estándar Venezolana**	**Viviendas Electrificadas**
1 x 3 kW	20 x 150 Wp	9,8 kW (1 fp)	24 x 1080 A-h	10-Viviendas	8

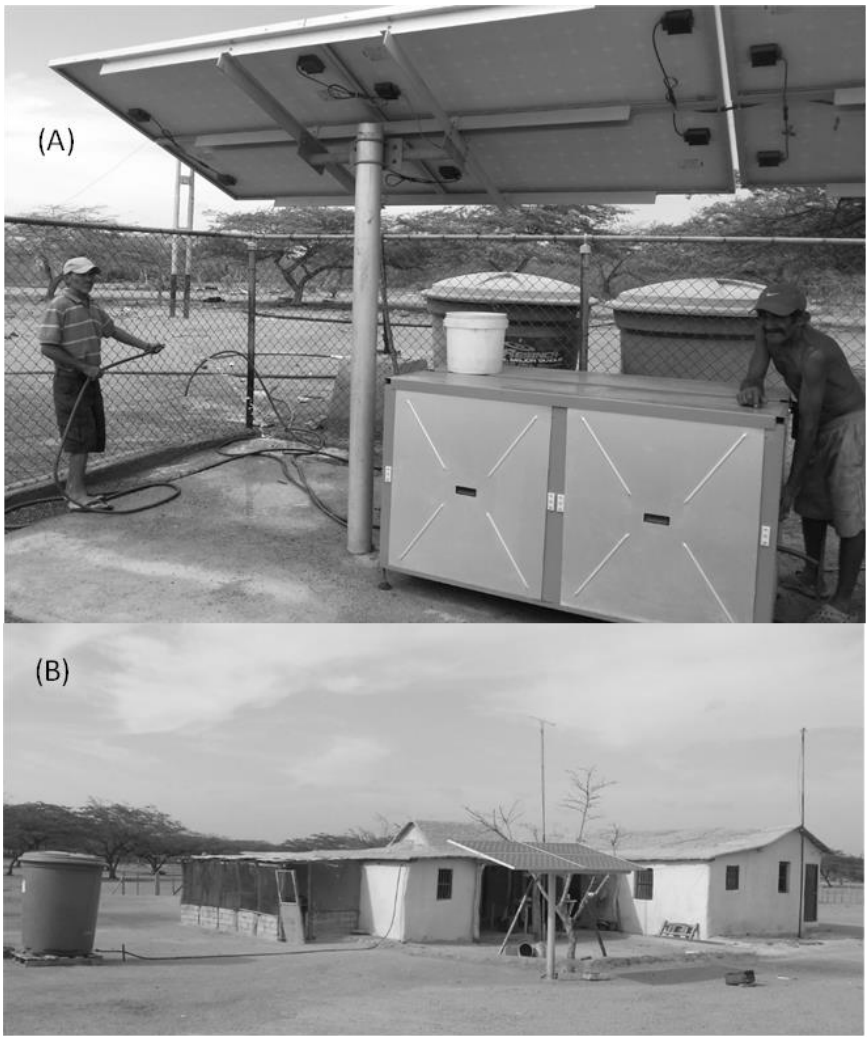


Figura 12 (A) Sistema fotovoltaico para la desalinización y potabilización de agua en Jacuque de 1200 Wp; (B) Sistema Solar Fotovoltaico doméstico de 600 Wp en Jacuque

Microrred, sistemas solares y eólicos domésticos de La Macolla

La Macolla está ubicada en la parroquia de Jadacaquiva, en el Municipio Falcón del estado Falcón. La comunidad está ubicada a 11 kilómetros por carretera de tierra de la Comunidad de "Jacuque", y a 26 kilómetros del pueblo de Jadacaquiva (Capital de Parroquia) y a la misma distancia de la red de distribución más cercana. En esta comunidad, se realizó un trabajo

conjunto entre la empresa estatal, filial de PDVSA, Unerven y Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, el sistema híbrido y las viviendas electrificadas a través de él fueron parte de un proyecto de Fundelec y las viviendas electrificadas con sistemas eólicos domésticos ABP-1500 forman parte de un proyecto de Unerven, ambas empresas trabajaron en este caso en conjunto.

Tabla 13 Sistema híbrido de la microrred rural de La Macolla

Aerogeneradores (kWp)	**Placas Fotovoltaicas (kWp)**	**Grupo Electrógeno (kW)**	**Respaldo en Baterías (A-h)**	**Denominación Estándar Venezolana**	**Viviendas Electrificadas**
1 x 6 kWp	36 x 150 Wp	14 kW (0,8 fp)	48 x 800 A-h	20-Viviendas	7

Hay 7 viviendas electrificadas a través de una red de distribución en baja tensión de 120 V perteneciente a la microrred rural híbrida. En el pueblo hay una escuela que cuenta con internet vía satelital. Es una comunidad donde las familias habitan de forma permanente y se dedican a la pesca y a la cría de ganado caprino, elaboración de queso y conservas con leche de cabras. No hay servicio de agua. Un ABP fue instalado luego de culminado el Sistema Híbrido, así como la vivienda. Esta vivienda no existía cuando se desarrolló el proyecto de la microrred, esta familia vivía en un "rancho" (vivienda de autoconstrucción generalmente elaborada por personas en extrema pobreza con restos de materiales desechados) y fueron incluidos en el programa de "sustitución de ranchos por viviendas" en el marco del plan nacional denominado "Misión Vivienda" que ha construido cerca de 3 millones de viviendas de este tipo a nivel nacional. Por esta razón, se incluyó esta vivienda en el plan de ABP que desarrolló Unerven luego de que Fundelec instalase la microrred híbrida. Esta vivienda está a una distancia de 600 metros del sistema de generación híbrido de la comunidad. Hay otro caso en la Comunidad de La Macolla, en que el Consejo Comunal aprobó que una familia tuviera tanto un SFV-300 como un ABP-1500 ya que ellos habían tenido previamente tenido un SFV-300 y, luego, cuando se instaló la Microrred (con mayor capacidad) pidieron pasarse a la Microrred pero, finalmente, se les ofreció colocarles un ABP-1500, por lo tanto, tienen en su vivienda tanto un ABP-1500 como un SFV-300 . Esta vivienda está ubicada a unos 300 metros de la microrred.

Figura 13 (A) Sistema híbrido de la microrred rural de La Macolla; (B) Aerogenerador de Baja Potencia de 1500 W (ABP-1500) de UNERVEN instalado junto a Sistema Solar Fotovoltaico Doméstico de 300W en una vivienda.

Microrred rural híbrida de Los Arroyos

Los Arroyos está ubicada en la parroquia de Zazárida, en el Municipio Buchivacoa del estado Falcón. La comunidad está ubicada a 6,7 kilómetros por carretera de tierra del pueblo de Zazárida (Capital de Parroquia) y a la misma distancia de la red de distribución más cercana. Esta población está a 3,31 kilómetros de la aldea de Matica de Yabo. En esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, el sistema híbrido y las viviendas electrificadas a través de él fueron parte de un proyecto de Fundelec.

Tabla 14 Sistema híbrido de la microrred rural de Los Arroyos

Aerogeneradores (kWp)	**Placas Fotovoltaicas (kWp)**	**Grupo Electrógeno (kW)**	**Respaldo en Baterías (A-h)**	**Denominación Estándar Venezolana**	**Viviendas Electrificadas**
1 x 6 kWp	36 x 160 Wp	14 kW (0,8 fp)	48 x 800 A-h	20-Viviendas	12

Hay 12 viviendas electrificadas a través de una red de distribución en baja tensión de 120 V perteneciente a la microrred rural híbrida, además, hay una escuela y una iglesia electrificadas con el sistema. Es una comunidad donde las familias habitan de forma permanente y son mayormente jubilados y personas dedicadas a actividades propias del sector de servicios, aunque algunos se dedican a la cria de cabras como la mayoría de los pueblos de los Estados Falcón, Lara y Península Guajira del Estado Zulia.

Figura 14 Escuela Básica de "Los Arroyos" electrificada a través de la red en 120 V de la microrred rural híbrida de la comunidad

Sistemas solares fotovoltaicos domésticos de Matica de Yabo

Matica de Yabo está ubicada en la parroquia de Zazárida, en el Municipio Buchivacoa del estado Falcón. Ha sido electrificada con Sistemas Fotovoltaicos Domésticos de 600 Wp (SFV-600). La comunidad está ubicada a 9,56 kilómetros por carretera de tierra del pueblo de Zazárida (Capital de Parroquia) y a la misma distancia de la red de distribución más cercana. Esta población está a 3,31 kilómetros del Sistema Híbrido de Los Arroyos. En esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, las viviendas electrificadas con SFV-600 en Matica de Yabo formaron parte de la segunda fase de implantación del programa Sembrando Luz, a nivel nacional. La mayoría de los pobladores de Matica de Yabo se dedican a la pesca. Los niños de esta comunidad asisten a la escuela básica de Los Arroyos y el resto de los servicios públicos se tienen en el pueblo de Zazárida.

Figura 15 . Usuaria de SFV-600 en Matica de Yabo, recubre el inversor y baterías con trapos para protegerlos de los intensos vientos salinos de la costa que provocan severa corrosión

LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL ZULIA

El estado Zulia posee una superficie de 63.100 Km², que representa el 6,8% del territorio venezolano, limita al Norte con el Golfo de Venezuela; por el Este con los estados Falcón, Lara y Trujillo: por el Sur con los estados Mérida y Táchira, y por el Oeste, con la República de Colombia. Su capital es Maracaibo (Municipio Maracaibo). Actualmente, el estado Zulia está constituido por 21 municipios que, a su vez, se dividen en 110 parroquias de las cuales 11 están constituidas por pueblos, aldeas y caseríos íntegramente rurales (10 % de las parroquias son rurales). En estas parroquias rurales, donde se agrupa gran parte de la población indígena del Zulia, habita un 7,9% (292.798 personas) del total de la población de este estado (3.704.404 personas). En el estado Zulia está asentada la mayor cantidad de indígenas de Venezuela, unos 443.544, que representan el 11,97% del total de la población zuliana. En las parroquias rurales, la proporción de población indígena asciende hasta un 18,82%. El territorio que pertenece al estado Zulia rodea al Lago de Maracaibo que cuenta con 12.870 km² y unos 550 kilómetros de costa. El Lago recibe a los ríos de la costa occidental que se originan en la Sierra de Perijá, a los ríos de la cordillera andina, que aportan una considerable carga sedimentaria que enriquece a los suelos y a los ríos de la costa oriental, que son las reservas hídricas de las ciudades de esa región (Costa Oriental del Lago de Maracaibo). Hacia la Península de la Guajira (Municipios Indígena Bolivariano Guajira y Almirante Padilla), hay muy pocos ríos y la red hídrica es escasa. Entre Cojoro y Castilletes (territorios poblados por la etnia Guajira o Wayú) se observa un paisaje pedregoso con especies vegetales como tunas, cardones y cujíes. Sin embargo, en las zonas del bosque tropical húmedo donde se alcanzan alturas superiores a los 1.000 y los 1.500 msnm, aparece otro tipo de vegetación característica. Esto es en la Sierra de Perijá (Municipio Rosario de Perijá), donde se alcanza el área de mayor elevación del Zulia con alturas de 2.500 a 3.000 msnm, territorio éste donde habitan la mayoría de los indígenas Barí y Yukpa del estado. Las comunidades rurales del Municipio Indígena Guajira y Municipio Jesús María Semprum, donde se concentra la mayor población indígena rural, se dedican mayormente a la cría de ganado caprino, bovino, agricultura, pesca y comercio binacional entre Colombia y Venezuela. El estado Zulia es el primero en Venezuela en cuanto a producción de leche, queso, ganado bovino, ovino y aves. Esto se debe al alto potencial de los suelos del sur del lago de Maracaibo que han permitido un desarrollo agrícola y ganadero muy significativo. Además, se cultiva: caña de azúcar, coco, yuca, algodón, frijol, melón, cacao, maíz y sorgo.

Figura 16 Inauguración de Sistema Híbrido en la Comunidad Indígena Guajira de Wososopo. Municipio Indígena Bolivariano Guajira del Estado Zulia

La actividad económica más extendida es, con diferencia, la explotación petrolera. En la mayor parte del estado Zulia y particularmente en los Municipios Lagunillas, Cabimas, Baralt y Simón Bolívar, en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, la explotación petrolera se lleva a cabo de forma intensiva y ha cubierto históricamente el 80% de toda la producción venezolana de hidrocarburos. La mayor parte de este crudo se procesa en el Complejo Petroquímico de El Tablazo (Municipio Santa Rita) y otra en la refinería de Bajo Grande (Municipio La Cañada de Urdaneta) que pertenece, desde 1997, al Centro de Refinación de Paraguaná (CRP) juntamente con Amuay y Cardón, en el estado Falcón. Igualmente, la explotación carbonífera de Guasare (Municipio Mara) es otra actividad minera que se ha consolidado en la región, siendo el primer estado en producción de Carbón de Venezuela, convirtiendo a este país en el segundo en exportación de carbón en toda

Suramérica, después de Colombia.

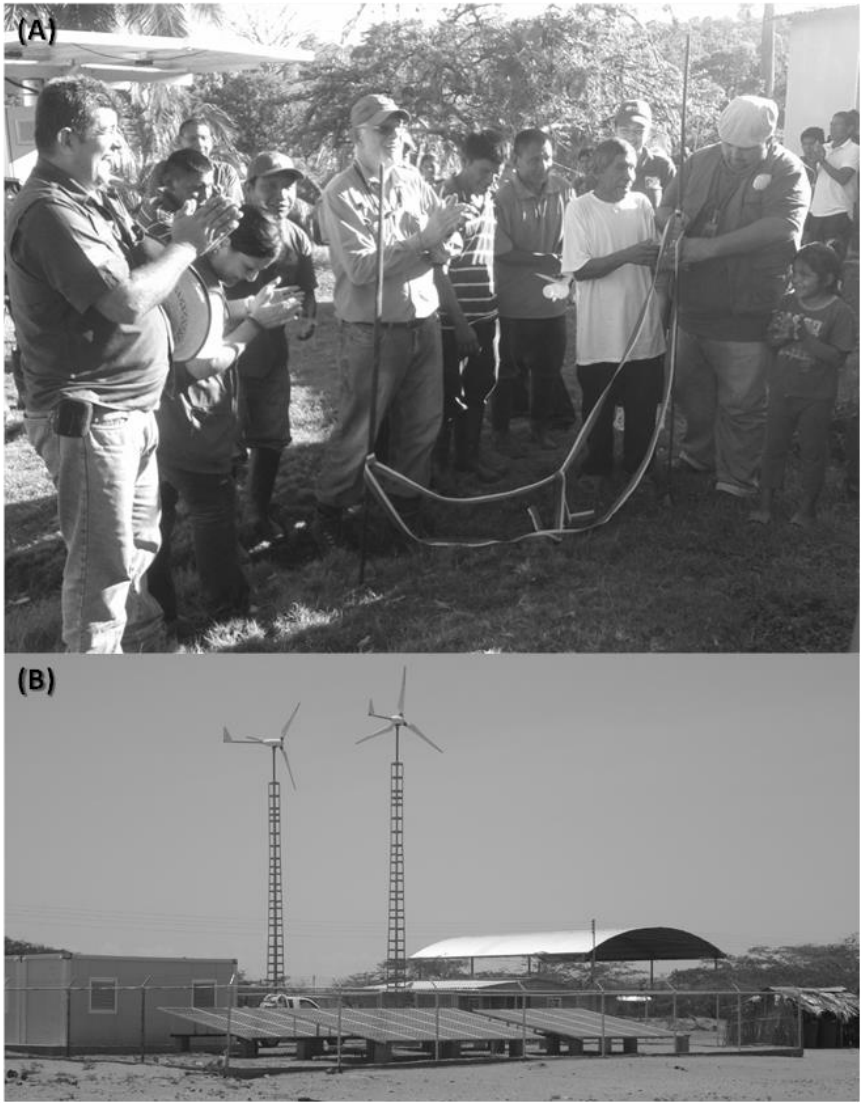


Figura 17 (A) Inauguración de los sistemas solares fotovoltaicos domésticos en la Comunidad Indígena de Barí de Bokshi en la Sierra de Perijá con la participación de Jesús Marrero (fundador del programa Sembrando Luz) (B) Sistema Híbrido de la Microrred Rural de la Comunidad Indígena Wayuu de Cusia en la Alta Guajira.

Sistema eléctrico del Estado Zulia

El sistema eléctrico de Zulia cuenta con una capacidad de generación termoeléctrica de 2443 MW que puede cubrir entre el 50% y el 70% de la demanda eléctrica total del estado según la disponibilidad de las unidades del parque de generación, el resto de la potencia demandada es aportada por la red nacional de transmisión que aporta entre 1000 MW y 2000 MW, según sea requerido. Históricamente, la calidad del servicio eléctrico en este estado ha sido de las mejores de Venezuela. En 2011 el indicador de Tiempo Total de Interrupciones (TTI) fue de 2 horas, muy por debajo del promedio nacional de 24,9 horas, para ese mismo año. En cuanto a la cobertura del servicio eléctrico, en conjunto, generación propia y red nacional de transmisión, suministran electricidad al 98,29% de la población. El conjunto restante de viviendas corresponde a un 1,25% que aún carece de acceso al servicio y un 0,47% que se abastece a través de sistemas domésticos propios de electrificación y sistemas basados en energías renovables instalados por el gobierno nacional. Debido al rápido crecimiento de las nuevas viviendas en el estado y los ajustes en el sector eléctrico, el 21% de los usuarios de la red eléctrico no cuentan con medidor del consumo. Esto se debe a que la ley del servicio eléctrico vigente privilegia el acceso al servicio antes que la disponibilidad de mecanismos de medida del consumo.

Tabla 15 Sistema de Generación del Estado Zulia

Planta de Generación Termoeléctrica	Capacidad Instalada (MW)
Ramón Laguna	660
Termozulia	1206
Rafael Urdaneta	231
Santa Bárbara	39
Casigua	71,9
San Lorenzo	153
Guaicaipuro	51
Grupos Electrógenos	31,5
Total	**2443,4**

El conjunto de plantas termoeléctricas de Zulia genera anualmente alrededor de 10.450 GWh consumiendo para ello unos 17.500 millones de litros de gasoil y 1,9 billones de metros cúbicos de gas. Este implica un factor de emisiones ponderado anual de 0,206 kg Eq CO2 / kWh.

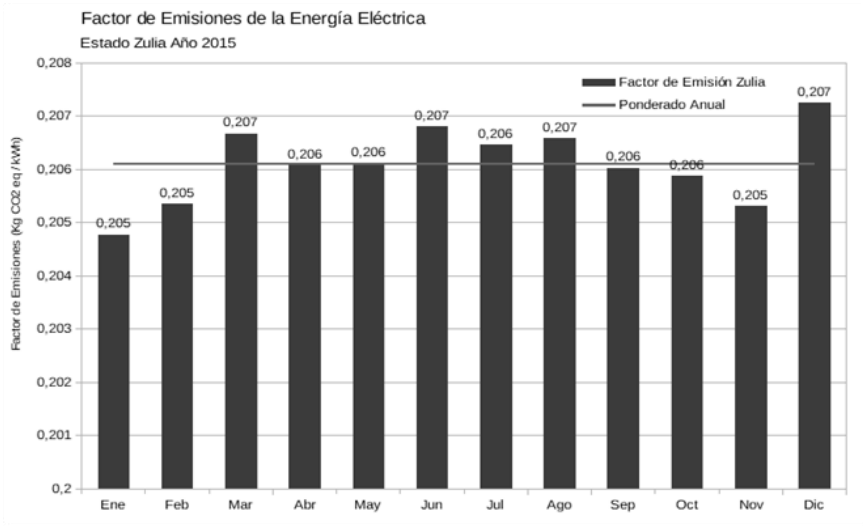


Figura 18 Factor de emisión de GEI del sistema eléctrico en Zulia

Electrificación rural sostenible en el Estado Zulia

Entre los años 2001 y 2013, el índice de electrificación rural en el estado Zulia aumentó de un 92,49% hasta un 94,53%. En el Zulia es mucho más difícil alcanzar una plena electrificación, como ya ha sucedido en zonas rurales de otros estados de Venezuela, debido a las condiciones geográficas y al crecimiento acelerado de las viviendas indígenas en esas zonas. Entre 2001 y 2013, la cantidad de nuevas viviendas rurales se incrementó en un 63% (casi el doble que en Falcón), por lo tanto, aun cuando se han electrificado alrededor de 17 mil nuevas viviendas, aún restan 2 mil más para alcanzar niveles superiores al 99% de electrificación rural. En estas circunstancias, aunque se ha reducido la brecha entre electrificación urbana y rural, aún resta mucho por hacer en este estado, particularmente en las parroquias rurales indígenas. Las viviendas sin electrificar en municipios rurales se redujeron en un 28% mientras que en los municipios urbanos la reducción de viviendas sin acceso al servicio eléctrico fue del 53%. La brecha entre electrificación rural y urbana apenas disminuyó de 6,55% hasta 4,96% aun cuando la cantidad de viviendas electrificadas fue mucho mayor que en otros estados del país.

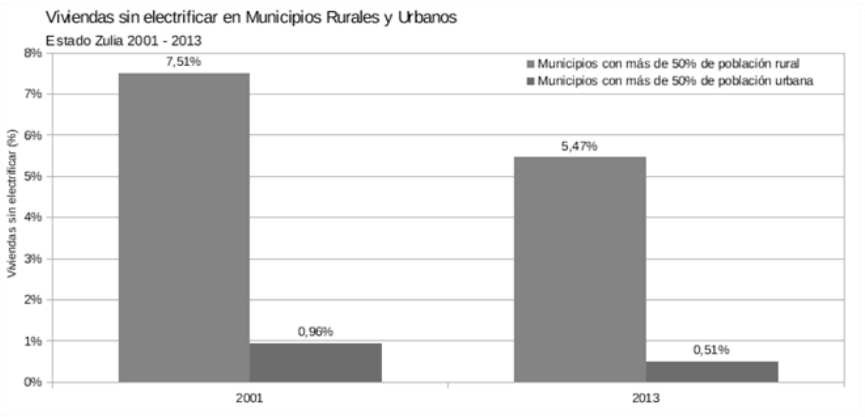


Figura 19 Reducción en la brecha de electrificación entre municipios rurales y urbanos en el estado Zulia de la República Bolivariana de Venezuela, entre 2001 y 2013

En las parroquias rurales con mayor porcentaje de población indígena (Monagas, Río Negro, Monseñor Marcos Sergio Godoy, Alta Guajira, Barí, Elías Sánchez Rubio y Sixto Zambrano) el índice de electrificación apenas se incrementó en un 6,25% pasando de un 80,44% hasta un 85,02%, entre 2001 y 2013 y esto se debe a un aumento en la cantidad de viviendas del 114% por lo que, en valores absolutos, la cantidad de viviendas electrificadas en comunidades rurales indígenas, ha tenido que aumentar en un 126%, en ese mismo período. Cabe destacar la acentuada diferencia entre la densidad poblacional de los municipios rurales y urbanos en el Zulia. En el caso rural la densidad poblacional media ponderada es de 33,49 hab / km^2 mientras que en los urbanos el valor es de 688,99 hab / km^2. En este caso, también se ha encontrado una relación entre la densidad poblacional y el porcentaje de viviendas sin electrificar en cada Municipio. En este sentido, en el año 2001, en la medida que la densidad poblacional de un municipio es mayor la cantidad de viviendas sin acceso a la electricidad decrece exponencialmente, tal y como se puede observar en la figura 20. Esta relación ha cambiado con el ligero aumento de la tasa de electrificación rural. De tal manera que la relación inversamente exponencial entre densidad poblacional y viviendas sin acceso a la electricidad ya había desaparecido para el año 2013.

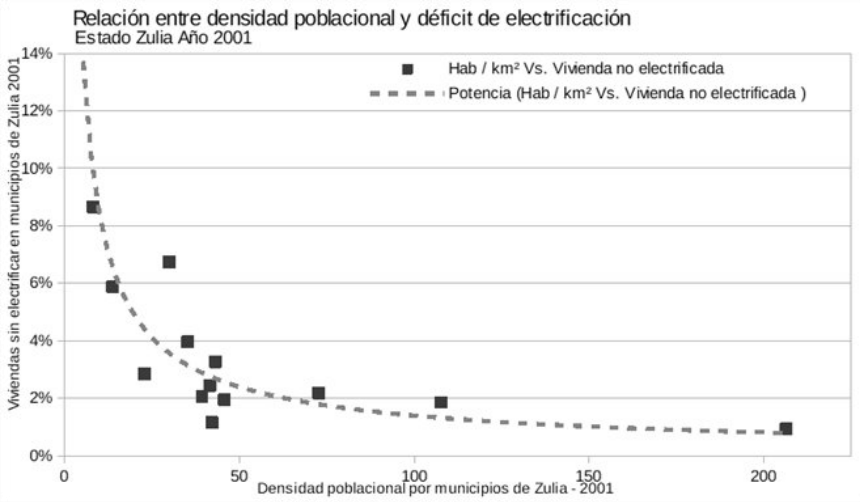


Figura 20 Relación entre las viviendas sin electrificar y la densidad poblacional por municipios del estado Zulia en 2001

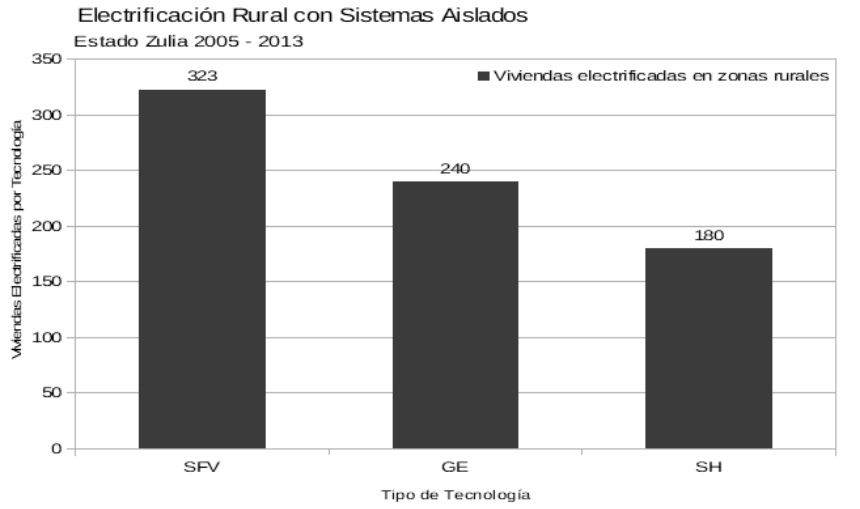


Figura 21 Sistemas de electrificación en comunidades rurales implementados en Zulia entre 2005 y 2013, por tipo de tecnología de generación (SFV: Sistemas Fotovoltaicos, GE: Grupos Electrógenos, SH: Sistemas Híbridos)

En Zulia se ha producido una ampliación de la capacidad de generación mucho mayor que en la mayoría que los estados de Venezuela, además de un aumento en la capacidad de transmisión y distribución de la red eléctrica estadal, sistemas de generación distribuida con grupos electrógenos en los extremos de la red de distribución y sistemas basados en energías renovables, particularmente en los municipios y parroquias con mayor índice de población rural. Entre los sistemas de electrificación rural implementados por el gobierno nacional en el estado Zulia (839 viviendas e infraestructuras comunitarias electrificadas) el 49,94% se abastecen de sistemas fotovoltaicos autónomos (SFV), 21,45% de Sistemas Híbridos eólico-solar-diésel (SH) y el restante 28,61% de redes aisladas alimentadas por Grupos Electrógenos (GE). Los grupos electrógenos se instalaron en comunidades con mayor densidad poblacional y cantidad de viviendas que aquellas en las cuales se instalaron Sistemas Híbridos o Fotovoltaicos. Cabe destacar que en el 71,39% de las viviendas rurales electrificadas con sistemas aislados se emplearon sistemas de generación basados en energías renovables y que, en las tres parroquias donde se implementó el programa gubernamental de electrificación rural (Tabla 16), la electrificación con energías renovables ha significado el acceso a la electricidad para un 12 % de las viviendas, un 6% recibe el servicio de redes alimentadas por grupos electrógenos, un 9% autogenera su energía y el restante 73% restante fueron integradas en la red de distribución estadal.

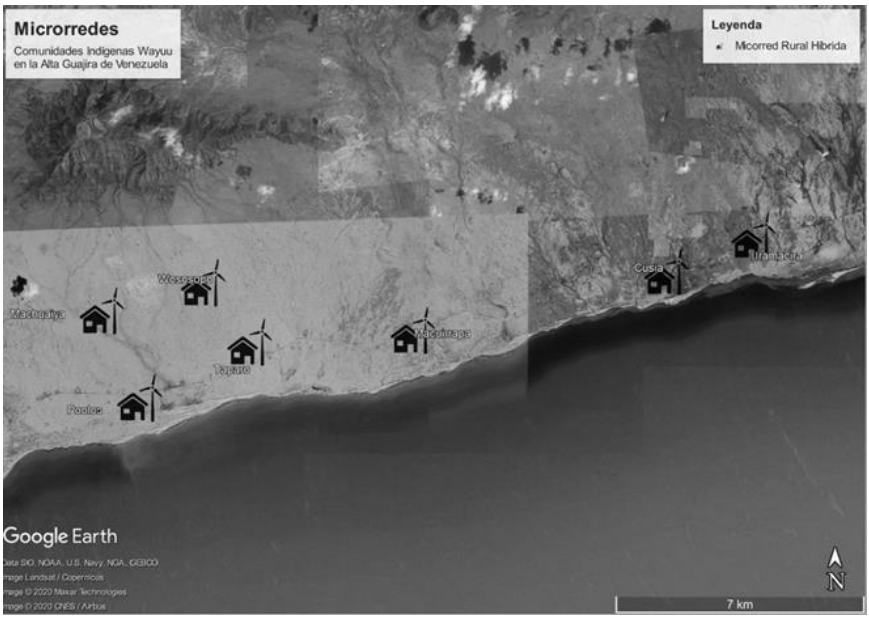


Figura 22 Imagen satelital de la ubicación de 7 microrredes rurales híbridas en La Guajira (Edo. Zulia)

Tabla 16 Parroquias y/o comunidades rurales de Falcón con viviendas electrificadas con sistemas aislados, para el año 2013

Parroquia	Comunidad	Generación Aislada con Grupos Electrógenos	Viviendas Electrificadas con Energías Renovables			Auto-generación a gasoil	Otro tipo de Auto-generación	Red Eléctrica Pública	Total Año 2013	
			SFV	SH	Total				Con Servicio Eléctrico	Sin servicio eléctrico
Alta Guajira	Poloos	-	-	24	164	110	11	115	490	260
	Taparo	-	-	15						
	Iramacira	-	-	14						
	Wososopo	-	-	26						
	Machuaiya	-	-	17						
	Castilletes	-	-	6						
	Cúsia	-	-	36						
	Macuirrapa	-	-	26						
	Cojoro	90	-	-						
Monagas	Punta Manglar	-	-	16	16	173	11	788	1138	2
	Isla Zapara	150	-	-						
Barí	5 de Julio – Guaicaipuro	-	25	-	323	50	3	2138	2514	56
	Bokshi	-	40	-						
	Caño San Pablo	-	15	-						
	Chuwabarí	-	8	-						
	Cumbarí	-	10	-						
	Dancurí	-	10	-						
	Triunfo de Lora	-	15	-						
	Guaicaipuro	-	22	-						
	Ikiakarora	-	35	-						
	Baría Viladera	-	17	-						
	La Primavera	-	20	-						
	Lora III	-	20	-						
	Orocorí	-	7	-						
	Simón Bolivar	-	69	-						
	Wairí	-	10	-						
Total		**240**	**323**	**180**	**503**	**333**	**25**	**3041**	**4142**	**318**

Microrred rural híbrida de Macuirrapa

La comunidad Indígena Wayuu (Guajira) de Macuirrapa está ubicada en la parroquia Alta Guajira, en el Municipio Bolivariano de la Guajira del estado Zulia. En la Parroquia Alta Guajira no hay red de distribución eléctrica. Todos son sistemas aislados. La Comunidad más grande es Cojoro que está electrificada con Grupos Electrógenos. Desde la comunidad de Macuirrapa hasta Cojoro hay una distancia de 15,4 kilómetros por carretera de tierra. Las comunidades indígenas más cercanas a Macuirrapa son las de Taparo, ubicada a 4,63 kilómetros y la de Cúsia a 7,34 kilómetros, ambas comunidades están servidas por sistemas híbridos. La ciudad más cercana con servicio eléctrico de la red eléctrica es Paraguaipoa, que está ubicada a 56,2 kilómetros de Macuirrapa. Esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, las viviendas electrificadas formaron parte de esta fase de implantación del programa Sembrando Luz, a nivel nacional.

Tabla 17 Sistema híbrido de la microrred rural de Macuirrapa

Aerogeneradores (kWp)	**Placas Fotovoltaicas (kWp)**	**Grupo Electrógeno (kW)**	**Respaldo en Baterías (A-h)**	**Denominación Estándar Venezolana**	**Viviendas Electrificadas**
(1 x 6) + (1 x 3) kWp	56 x 150 Wp	19 kW (0,8 fp)	48 x 1200 A-h	30-Viviendas	26

En Macuirrapa, hay 26 viviendas electrificadas a través de una red de distribución en baja tensión de 120 V, además, hay una escuela electrificada con el sistema. Es una comunidad donde las familias habitan de forma permanente y están mayormente dedicadas a la cría de caprinos, comercio y son todos de la étnica Wayuu. El sistema híbrido de Macuirrapa está diseñado para 30 viviendas y sirve actualmente a 26.

Figura 23 Sistema hibrido de la microrred rural de Macuirrapa. En la fotografía se observa que el aerogenerador de 3 kW ha sido desmontado para mantenimiento.

Microrred rural híbrida de Iramacira

La comunidad Indígena Wayuu (Guajira) de Iramacira está ubicada en la parroquia Alta Guajira, en el Municipio Bolivariano de la Guajira del estado Zulia. Desde la comunidad de Iramacira hasta Cojoro hay una distancia de 24,4 kilómetros por carretera de tierra. La comunidad indígena más cercana a Iramacira es Cúsia, ubicada a 2,76 kilómetros, servida por un sistema híbrido. La ciudad más cercana con servicio eléctrico de la red eléctrica es Paraguaipoa, que está ubicada a 66,2 kilómetros de Iramacira. Esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, las viviendas electrificadas formaron parte de esta fase de implantación del programa Sembrando Luz, a nivel nacional.

Tabla 18 Sistema híbrido de la microrred rural de Iramacira

Aerogeneradores (kWp)	**Placas Fotovoltaicas (kWp)**	**Grupo Electrógeno (kW)**	**Respaldo en Baterías (A-h)**	**Denominación Estándar Venezolana**	**Viviendas Electrificadas**
1 x 6 kW	36 x 160 Wp	14 kW (0,8 fp)	48 x 800 A-h	30-Viviendas	14

En Iramacira, hay 14 viviendas electrificadas a través de una red de distribución en baja tensión de 120 V, además, hay una escuela y una iglesia electrificadas con el sistema. Es una comunidad donde las familias habitan de forma permanente y están mayormente dedicadas a la cría de caprinos,

comercio y son todos de la étnica Wayuu. El sistema híbrido de Iramacira está diseñado para 20 viviendas y sirve actualmente a 14. Iramacira está a una distancia aproximada de 980 metros de la costa del Golfo de Venezuela y a 3,5 kilómetros de frontera con la República de Colombia.

Figura 24 Luego de la instalación del sistema híbrido en Iramacira, se han mudado a la ladea nuevas familias indígenas que se auto-conectan al sistema a través de redes artesanales. La vivienda típica de los indígenas Wayuu es como se muestra.

Microrred rural híbrida de Poolos

La comunidad Indígena Wayuu (Guajira) de Poolos está ubicada en la parroquia Alta Guajira, en el Municipio Bolivariano de la Guajira del estado Zulia. La comunidad de Poolos es la más cercana a Cojoro, hay una distancia de 7,43 kilómetros por carretera. La comunidad indígenas más cercana a Iramacira es Machuaiya, ubicada a 2,53 kilómetros, servida por un sistema híbrido. La ciudad más cercana con servicio eléctrico de la red eléctrica es Paraguaipoa, que está ubicada a 48,2 kilómetros de Poolos. Esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, las viviendas electrificadas formaron parte de esta fase de implantación del programa Sembrando Luz, a nivel nacional.

Tabla 19 Sistema híbrido de la microrred rural de Poolos

Aerogeneradores (kWp)	Placas Fotovoltaicas (kWp)	Grupo Electrógeno (kW)	Respaldo en Baterías (A-h)	Denominación Estándar Venezolana	Viviendas Electrificadas
1 x 6 kW	36 x 150 Wp	14 kW (0,8 fp)	48 x 800 A-h	30-Viviendas	24

En Poolos, hay 24 viviendas electrificadas a través de una red de distribución en baja tensión de 120 V, además, hay una escuela electrificada con el sistema. Es una comunidad donde las familias habitan de forma permanente y están mayormente dedicadas a la cría de caprinos, pesca, comercio y son todos de la étnica Wayuu. El sistema híbrido de Poolos está diseñado para 20 viviendas y sirve actualmente a 24. Poolos está a una distancia aproximada de 1095 metros de la costa del Golfo de Venezuela y a 2,95 kilómetros de la frontera con la República de Colombia.

Figura 25 Sistema híbrido de la microrred rural de Poolos

Microrred rural híbrida de Castillete

La comunidad de Castillete no es estrictamente una comunidad Wayuu. Castillete está ubicada en la parroquia Alta Guajira, en el Municipio Bolivariano de la Guajira del estado Zulia. Es una pequeña comunidad en la frontera colombo-venezolana, donde las viviendas están a escasos 40 o 60 metros del borde limítrofe entra ambos países. Es la más apartada de todas las comunidades visitadas en el occidente de Venezuela. Desde Castilletes hasta Cojoro hay una distancia de 65 kilómetros por carretera de tierra. La comunidad indígena venezolana más cercana a Castilletes es Iramacira, ubicada a 38,4 kilómetros, también servida por un sistema híbrido. La ciudad más cercana con servicio eléctrico de la red eléctrica es Paraguaipoa, que está ubicada a 108 kilómetros de Castilletes. Esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, las viviendas

electrificadas formaron parte de esta fase de implantación del programa Sembrando Luz, a nivel nacional. Las playas de Castilletes le hacen una comunidad con un inmenso potencial turístico.

Tabla 20 Sistema híbrido de la microrred rural de Castillete

Aerogeneradores (kWp)	Placas Fotovoltaicas (kWp)	Grupo Electrógeno (kW)	Respaldo en Baterías (A-h)	Denominación Estándar Venezolana	Viviendas Electrificadas
1 x 6 kW	36 x 150 Wp	14 kW (0,8 fp)	48 X 800 A-h	20-Viviendas	6

Es una comunidad donde las familias habitan de forma permanente y están mayormente dedicadas a la pesca y al comercio. El sistema híbrido de Castilletes está diseñado para 20 viviendas y sirve actualmente a 6.

Figura 26 El Sistema Hibrido de Castilletes evidencia altos niveles de corrosión debido a la salinidad de la zona costera y las elevadas velocidades de viento en la Guajira venezolana

Microrred rural híbrida de Cúsia

La comunidad de Cúsia, ubicada en la parroquia Alta Guajira, en el Municipio Bolivariano de la Guajira del estado Zulia, es la comunidad indígena fronteriza con el Sistema Híbrido de mayor capacidad en Venezuela, al poder abastecer hasta 40 viviendas. Desde Cúsia hasta Cojoro hay una distancia de

22 kilómetros por carretera de tierra. La comunidad indígena venezolana más cercana a Cúsia es Iramacira, ubicada a 2,85 kilómetros, también servida por un sistema híbrido. La ciudad más cercana con servicio eléctrico de la red eléctrica es Paraguaipoa, que está ubicada a 63 kilómetros de Cúsia. Esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, las viviendas electrificadas formaron parte de esta fase de implantación del programa Sembrando Luz, a nivel nacional.

Tabla 21 Sistema híbrido de la microrred rural de Cúsia

Aerogeneradores (kWp)	**Placas Fotovoltaicas (kWp)**	**Grupo Electrógeno (kW)**	**Respaldo en Baterías (A-h)**	**Denominación Estándar Venezolana**	**Viviendas Electrificadas**
2 x 6 kW	72 x 150 Wp	23 kW (0,8 fp)	96 x 800 A-h	40-Viviendas	36

Es una comunidad donde las familias habitan de forma permanente y están mayormente dedicadas al comercio y a la cría de ganado caprino. El sistema híbrido de Castilletes está diseñado para 40 viviendas y sirve actualmente a 36.

Figura 27 Sistema de almacenamiento en baterías del sistema híbrido de Cúsia

Microrred rural híbrida de Taparo

La comunidad indígena guajira de Taparo está ubicada en la parroquia Alta Guajira, en el Municipio Bolivariano de la Guajira del estado Zulia. Desde Taparo hasta Cojoro hay una distancia de 11,2 kilómetros por carretera de tierra. La comunidad indígena venezolana más cercana a Taparo es Wososopo, ubicada a 2,19 kilómetros, también servida por un sistema híbrido. La ciudad más cercana con servicio eléctrico de la red eléctrica es Paraguaipoa, que está ubicada a 52 kilómetros de Taparo. Esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, las viviendas electrificadas formaron parte de esta fase de implantación del programa Sembrando Luz, a nivel nacional.

Tabla 22 Sistema híbrido de la microrred rural de Taparo

Aerogeneradores (kWp)	**Placas Fotovoltaicas (kWp)**	**Grupo Electrógeno (kW)**	**Respaldo en Baterías (A-h)**	**Denominación Estándar Venezolana**	**Viviendas Electrificadas**
1 x 6 kW	36 x 150 Wp	14 kW (0,8 fp)	48 X 800 A-h	20-Viviendas	15

Figura 28 Sistema híbrido de la microrred rural de Taparo

Microrred rural híbrida y sistema de agua de Wososopo

La comunidad indígena guajira de Wososopo está ubicada en la parroquia Alta Guajira, en el Municipio Bolivariano de la Guajira del estado Zulia. Durante la visita no se realizaron encuestas, solo se pudieron tomar fotografías y constatar la operatividad del sistema. Desde Wososopo hasta Cojoro hay una distancia de 12,85 kilómetros por carretera de tierra. La comunidad indígena venezolana más cercana a Wososopo es Taparo, ubicada a 2,19 kilómetros, también servida por un sistema híbrido. La ciudad más cercana con servicio eléctrico de la red eléctrica es Paraguaipoa, que está ubicada a 55 kilómetros de Wososopo. Esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, las viviendas electrificadas formaron parte de esta fase de implantación del programa Sembrando Luz, a nivel nacional. Hay 26 viviendas electrificadas a través de una red de distribución en baja tensión de 120 V, alimentada por un sistema híbrido diseñado para 30 viviendas. Adicionalmente hay una planta potabilizadora de agua que funciona con un sistema SFV-1200.

Tabla 23 Sistema híbrido de la microrred rural de Wososopo

Aerogeneradores (kWp)	Placas Fotovoltaicas (kWp)	Grupo Electrógeno (kW)	Respaldo en Baterías (A-h)	Denominación Estándar Venezolana	Viviendas Electrificadas
(1 x 6) + (1 x 3) kWp	56 x 150 Wp	19 kW (0,8 fp)	48 X 1200 A-h	30-Viviendas	26

Microrred rural híbrida de Machuaiya

La comunidad está a 2500 metros de la otra comunidad indígena electrificada con un sistema híbrido, Poolos y a 500 metros del límite fronterizo con la República de Colombia.

Tabla 24 Sistema híbrido de la microrred rural de Machuaiya

Aerogeneradores (kWp)	Placas Fotovoltaicas (kWp)	Grupo Electrógeno (kW)	Respaldo en Baterías (A-h)	Denominación Estándar Venezolana	Viviendas Electrificadas
1 x 6 kWp	36 x 150 Wp	14 kW (0,8 fp)	48 x 800 A-h	20-Viviendas	17

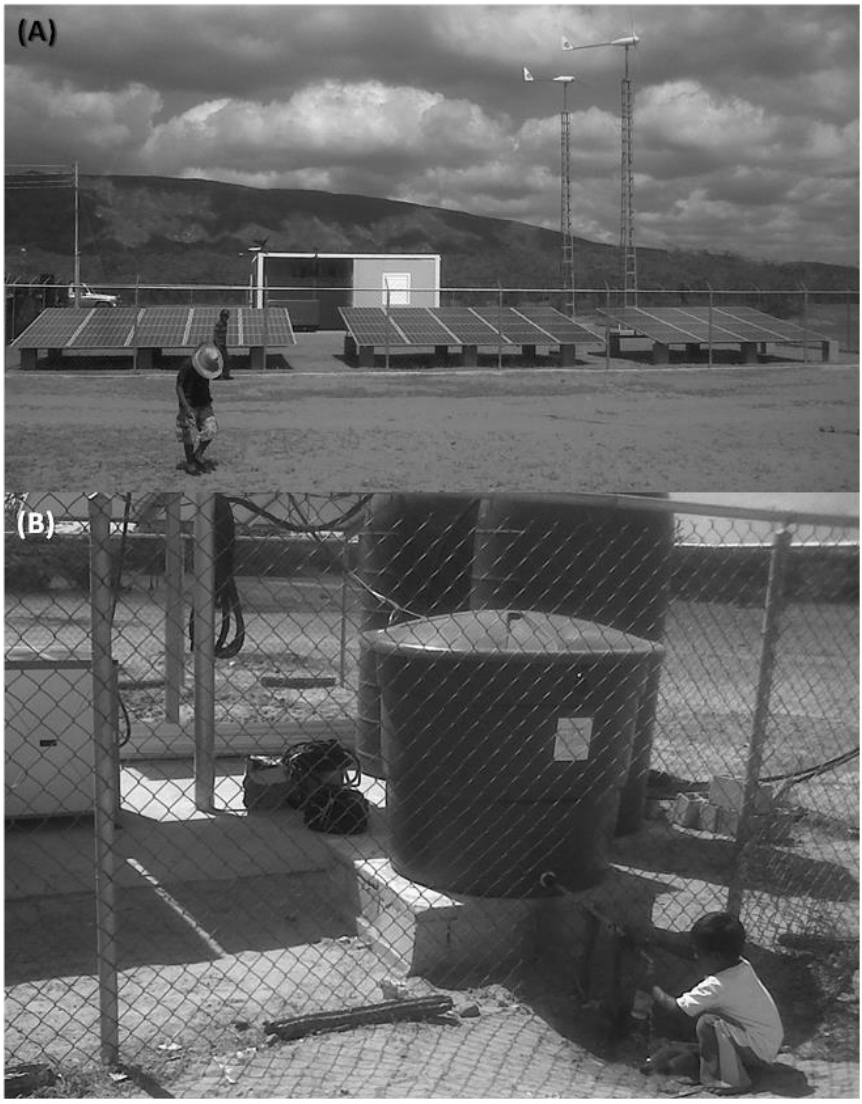


Figura 29 (A) Sistema híbrido de la microrred rural de Wososopo; (B) Planta desalinizadora y potabilizadora de agua con energía solar fotovoltaica (SFV-1200) en Wososopo

Microrred rural híbrida de Punta Manglar

La comunidad de Punta Manglar, ubicada en la parroquia Monagas, en el Municipio Insular Padilla del estado Zulia. Es una comunidad de paraujanos que, no se identifican directamente como guajiros. Desde Punta Manglar hasta el pueblo de San Carlos, el centro urbano más cercano con conexión a la red de distribución, hay una distancia de 17 kilómetros por carretera de tierra. Otra comunidad cercana es en la Isla de Zapara, donde la electrificación es por Grupos Electrógenos. Desde Punta Manglar hasta el punto de la costa más cercano a la Isla de Zapara, hay 12 kilómetros, luego se deben navegar 1,15 millas náuticas (2 kilómetros, aproximadamente). Esta comunidad, ha sido atendida íntegramente por Fundelec (ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, MPPEE). En este sentido, las viviendas electrificadas formaron parte de esta fase de implantación del programa Sembrando Luz, a nivel nacional. La comunidad cuenta con un sistema de agua, instalado durante la primera fase del programa "Sembrando Luz" que está actualmente fuera de servicio.

Tabla 25 Sistema híbrido de la microrred rural de Punta Manglar

Aerogeneradores (kWp)	**Placas Fotovoltaicas (kWp)**	**Grupo Electrógeno (kW)**	**Respaldo en Baterías (A-h)**	**Denominación Estándar Venezolana**	**Viviendas Electrificadas**
(1 x 6) + (1 x 3) kWp	56 x 150 Wp	19 kW (0,8 fp)	48 x 800 A-h	30-Viviendas	16

Figura 30 Módulo solar fotovoltaico del sistema híbrido de la microrred rural de Punta Manglar inmerso en arena debido a la falta de mantenimiento de los operadores comunitarios

LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN BOLÍVAR

El estado Bolívar posee una superficie de 240.528 Km^2, que representa el 26,24 % del territorio venezolano, limita al Norte separado por el Orinoco con los estados Delta Amacuro, Monagas, Anzoátegui y Guárico; al Sur con la República del Brasil y el estado Amazonas; al Este con el estado Delta Amacuro y la Zona en Reclamación que nos separa con la República de Guyana y al Oeste con los Estados Apure y Amazonas. Su capital es Ciudad Bolívar (Municipio Heres). Actualmente, el estado Bolívar está constituido por 11 municipios que, a su vez, se dividen en 47 parroquias de las cuales 14 están constituidas por pueblos, aldeas y caseríos íntegramente rurales (30 % de las parroquias son rurales). En estas comunidades rurales, donde se agrupa gran parte de la población indígena de Bolívar, habita un 8,8% (124.897 personas) del total de la población de este estado (1.413.115 personas). En el estado Bolívar están asentados unos 55 mil indígenas el 79,9% de ellos en zonas rurales. En general, la población indígena representa el 3,8% de la población del estado Bolívar, sin embargo, en las parroquias rurales la proporción de población indígena asciende hasta el 26,12%. Los grupos étnicos originarios presentes en el estado Bolívar son los Pemones, Yanomamis, Yecuanas, Panares, Hotis, Piaroas, entre otros, que mantienen sus propias manifestaciones musicales y artesanales. El 89,2% de la población indígena del estado Bolívar habita en los municipios y parroquias rurales del estado donde, debido a la inmensa extensión territorial, se presenta también la menor densidad poblacional (entre 0,5 y 5 hab /km^2). Los Municipios con mayor presencia indígena son Gran Sabana, Sucre, Bolivariano Angostura, Sifontes y Cedeño que son también los de menor densidad poblacional. El 75% de la superficie del estado Bolívar está surcada por extensos y caudalosos ríos, que representan la mayor reserva hidrológica de Venezuela. Debido al enorme caudal de sus ríos, a Bolívar, se le confiere la característica de estado hidro-energético. Entre las siete (7) cuencas hidrográficas de Bolívar, la más importante es la del río Orinoco. La cuenca del Orinoco tiene una superficie de casi 989.000 km^2, de los cuales el 65% quedan en Venezuela y el 35 % restante en territorio colombiano. Con un caudal promedio de unos 33.000 m^3/s, es el tercer río más caudaloso del mundo, después del Amazonas y del Congo. La mayoría de los ríos venezolanos importantes son afluentes del Orinoco, siendo el más caudaloso el río Caroní, donde se encuentran las centrales hidroeléctricas que generan el 70% de toda la energía eléctrica de la República Bolivariana de Venezuela. El ecosistema del estado Bolívar ha sido definido científicamente como muy frágil debido a que está compuesto por vegetación endémica que solo es posible encontrarla de forma natural en el macizo guayanés, que es una de las formaciones geológicas más antiguas de la Tierra. Esta formación geológica abarca todo el estado Bolívar, la región norte de Brasil, las repúblicas de Guyana, Surinam, Guayana Francesa y una

pequeña parte del Amazonas colombiano. Su antigüedad se evidencia en el levantamiento y plegamiento de placas superiores casi desde el mismo momento de formación del planeta Tierra, lo cual ha originado unas mesetas muy elevadas y de pendientes verticales, denominadas tepuyes por los indígenas de la etnia Pemón que habitan La Gran Sabana. El escudo guayanés, en la Gran Sabana, está cubierto por la mayor masa forestal tropical inalterada del mundo y la caída de agua más alta del mundo: el Salto Ángel, de 979 m de caída libre.

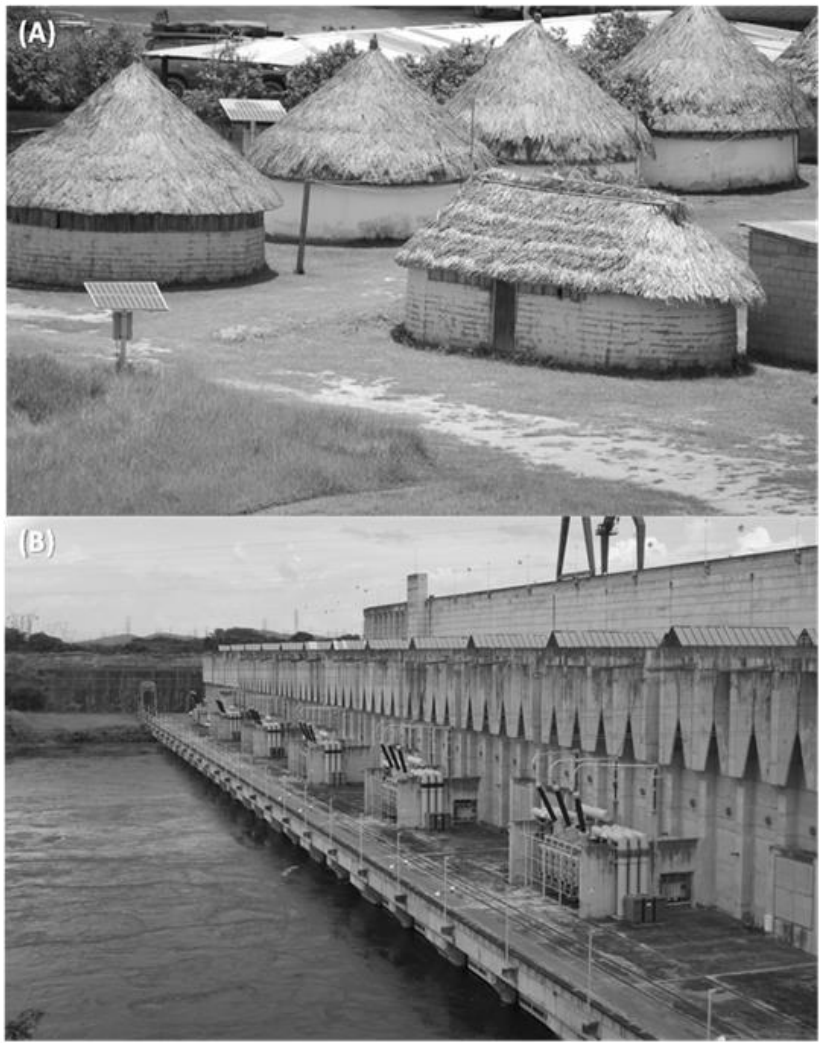


Figura 31(A) Comunidad rural indígena Pemón de Arapán, en La Gran Sabana, donde se instalaron sistemas solares fotovoltaicos domésticos; (B) Central hidroeléctrica de Macagua, en Ciudad Guayana.

Las áreas bajas y cálidas del estado Bolívar presentan temperaturas entre 31ºC y 27º en la zona del Municipio Heres (Ciudad Bolívar), un promedio de 27ºC en la zona del Municipio Caroní (Puerto Ordaz) y entre 23ºC y 18ºC en la zona de la Gran Sabana, en el municipio del mismo nombre. La principal actividad económica del estado Bolívar está representada por el Sector Minero. La explotación del hierro comenzó en 1950. Otra actividad de importancia para la economía del estado, como del país, es el sector industrial. Los planes de industrialización del sur de Venezuela se iniciaron en la década del 40, época en la cual, se le dio prioridad al desarrollo de industrias básicas, tales como la industria eléctrica, a través de la electrificación del río Caroní por medio de hidroeléctricas, y la industria siderúrgica. Para ello se constituyeron empresas subsidiarias del estado venezolano que han constituido la base del Complejo Industrial de Guayana, hasta la actualidad.

Tabla 26 Población rural e indígena por municipios, según la densidad poblacional

Municipio	Densidad (Hab / km²)	Población rural (%)	Población Indígena (%)
Caroní	525,9	1,50%	0,20%
Cedeño	2,1	43,90%	16,00%
El Callao	10,9	4,00%	0,10%
Gran Sabana	1,1	50,50%	56,40%
Heres	67,3	2,10%	1,10%
Piar	7,5	16,80%	0,70%
Bolivariano Angostura	0,9	36,20%	18,00%
Roscio	4,2	8,80%	0,00%
Sifontes	2,5	23,80%	17,50%
Sucre	0,5	52,30%	28,80%
Padre Pedro Chien	7,7	45,30%	0,30%

Sistema eléctrico del Estado Bolívar

El sistema eléctrico del estado Bolívar cuenta con la mayor capacidad de generación del país: 15.420 MW, con los cuales se cubre el 70% de la demanda eléctrica total de Venezuela, según la disponibilidad de las unidades del parque de generación hidroeléctrico del bajo Caroní. El aprovechamiento del río Caroní permite una generación local a pequeñas comunidades en el alto Caroní (micro-centrales) y una generación para todo el país en el bajo Caroní a través de las tres grandes centrales hidroeléctricas del país. El resto de la energía consumida en Venezuela es generado en cada estado del país

por centrales termoeléctricas distribuidas en todo el territorio venezolano, como las que se han mostrado para los estados Falcón y Bolívar. Históricamente, el indicador de Tiempo Total de Interrupciones (TTI) ha sido de 43 horas, muy por encima del promedio nacional de 24,9 horas, para el año 2011. El servicio eléctrico se extendió del 95,2% en el año 2001 al 97,9% en el 2013. En conjunto, la red eléctrica pública suministra electricidad al 98,2 % de la población con servicio del estado Bolívar, un 1,3% se abastece a través de sistemas domésticos propios de electrificación y un 0,5% con sistemas basados en energías renovables instalados por el gobierno nacional. Un 60% de la población no paga por el servicio eléctrico. En este estado no hay emisiones por kWh generado, debido al tipo de generación.

Tabla 27. Sistema de Generación del Estado Bolívar

Central Hidroeléctrica	Unidades Operativas	Capacidad Instalada (MW)
Guri	20	10.000
Macagua	20	3.140
Caruachi	12	2.280
Total	**52**	**15.420**

Figura 32. Ubicación de centrales y micro-centrales hidroeléctricas en el estado Bolívar

Electrificación rural sostenible en el Estado Bolívar

Entre los años 2001 y 2013, el índice de electrificación rural en el estado Bolívar aumentó de un 72,45% hasta un 88%. En Bolívar las inmensas extensiones de terreno en las cuales se encuentran dispersas las viviendas, muchas de ellas indígenas, dificulta una implantación más acelerada del programa gubernamental de electrificación rural, debido a que la densidad poblacional de las parroquias rurales es la más baja de todo el país (0,5 hab / km² a 5 hab / km²). Entre 2001 y 2013, la cantidad de viviendas rurales en el estado Bolívar ha permanecido relativamente constante (variación menor al 1%) la proporción de viviendas rurales sin acceso al servicio eléctrico se ha reducido en un 57%. Sin embargo, aunque se ha reducido la brecha entre electrificación urbana y rural, de 22,5% de diferencia hasta menos de un 10%, aún resta mucho por hacer en este estado, donde persiste un 12% de viviendas rurales sin electrificar.

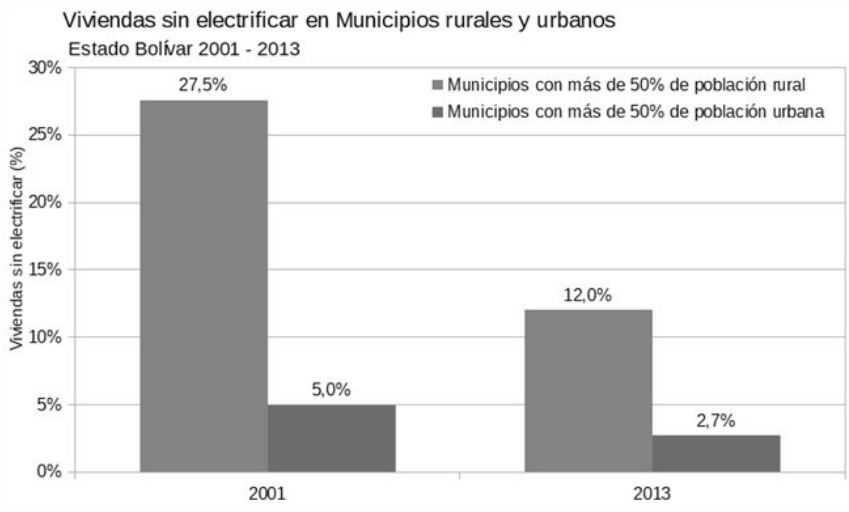


Figura 33. Reducción en la brecha de electrificación entre municipios rurales y urbanos en el estado Bolívar de la República Bolivariana de Venezuela, entre 2001 y 2013

En las parroquias rurales con mayor porcentaje de población indígena (Aripao, Ikabarú, Gran Sabana, Barceloneta, Pijiguaos, entre otras) el índice de electrificación se incrementó en un 16,5%, entre 2001 y 2013, pasando de 68% a 79,2%. En estas parroquias es donde más se han instalado sistemas solares fotovoltaicos domésticos (SFV) en el estado Bolívar. Cabe destacar

las dificultades de electrificación debidas a la acentuada diferencia entre la densidad poblacional de los municipios rurales y urbanos y la asociada dispersión de las viviendas en las zonas foráneas del estado Bolívar, en este sentido, mientras la densidad poblacional rural es la más baja del país: 2,12 hab / km², la densidad poblacional urbana es de 145,1 hab / km². En este caso, también se ha encontrado una relación entre la densidad poblacional y el porcentaje de viviendas sin electrificar en cada Municipio. En este sentido, en el año 2001, en la medida que la densidad poblacional de un municipio es mayor la cantidad de viviendas sin acceso a la electricidad decrece exponencialmente, tal y como se puede observar en la figura 34. Esta relación ha cambiado con el ligero aumento de la tasa de electrificación rural. De tal manera que la relación inversamente exponencial entre densidad poblacional y viviendas sin acceso a la electricidad ya había desaparecido para el año 2013.

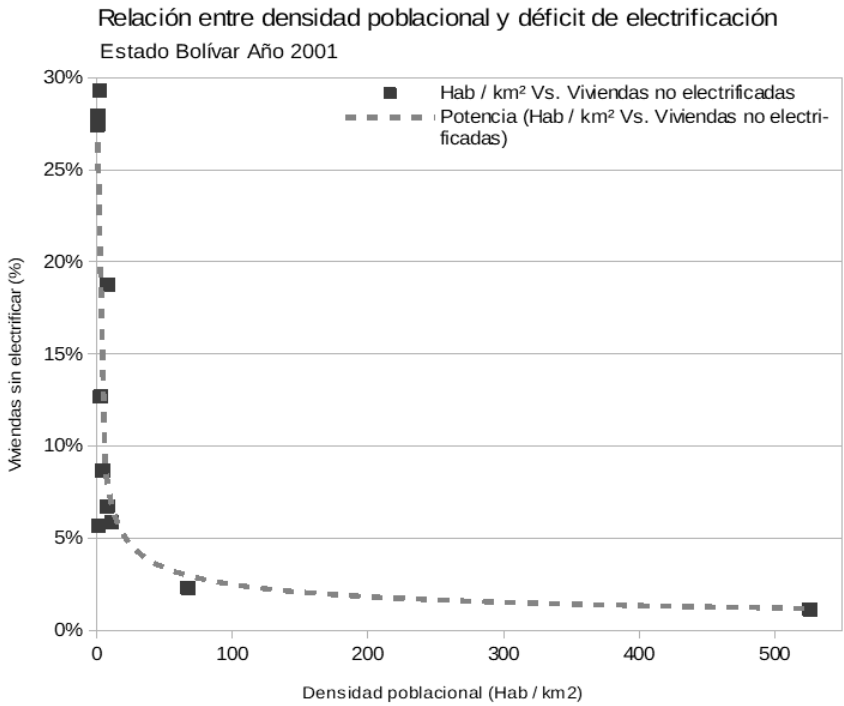


Figura 34. Relación entre las viviendas sin electrificar y la densidad poblacional por municipios del estado Bolívar en 2001

Entre los sistemas de electrificación rural implementados por el gobierno nacional en el estado Bolívar se destaca que, en Gran Sabana, el 24,7% de las

viviendas han sido electrificadas con sistemas que emplean energías renovables, bien sea energía solar fotovoltaica o micro-hidráulica. Las micro-centrales hidroeléctricas se han venido instalado en el estado Bolívar desde la década de 1960 (Ver tabla 28). En las comunidades con mayor densidad de población como San Rafael de Kamoirán o Santa Cruz de Mapaurí, se han colocado grupos electrógenos para la electrificación, aunque también se cuenta con soporte para las infraestructuras vitales de la comunidad, a través de sistemas fotovoltaicos.

Tabla 28 Micro-centrales hidroeléctricas (MCH) del estado Bolívar

Microcentral	**Año de Instalación**	**Tipo de Turbina(s) Hidroeléctrica**	**Capacidad de Turbina (kW)**	**Nombre del Río**	**Caída Neta (mts)**	**Viviendas Electrificadas**
WONKEN II	1983	Banki	1 x 58 kW	Macarupuey	6,7	180
KAVANAYEN	1957	Francis	1 x 110 kW	Apacairo	44	300
KAMARATA	1962	Francis	1 x 60 kW	Tapere	6	145
LA CIUDADELA	1994	Francis	2 x 60 kW	Aponguao	14	120
AURAUTAMERÚ	1988	Banki	6 X 25 kW	Yuruani	4	232
CANAIMA	1994	Banki	2 x 400 kW	Carrao	25	280

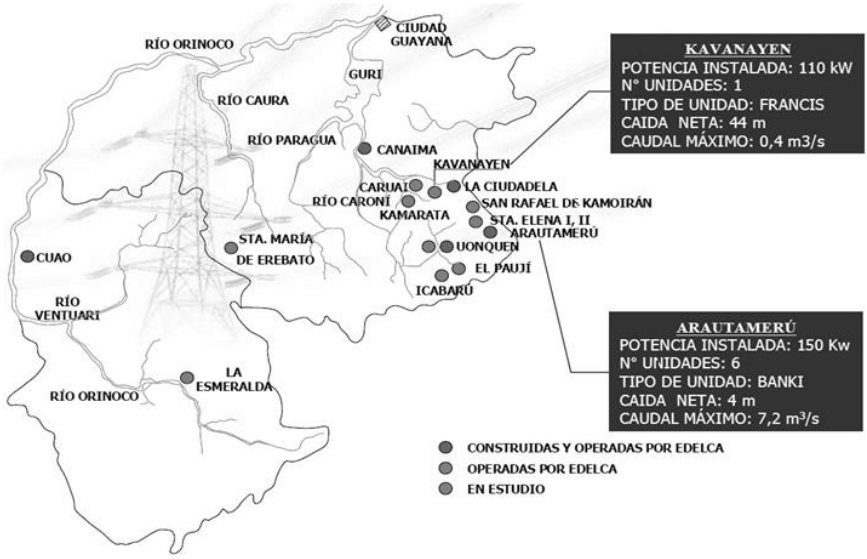


Figura 35. Ubicación de las micro-centrales hidroeléctricas instaladas y proyectadas en los estados Bolívar y Amazonas, en el Sur de Venezuela, en la cuenca del río Orinoco

Tabla 29 Parroquias y/o comunidades rurales de Falcón con viviendas electrificadas con sistemas basados en energías renovables, para el año 2013

Municipio	Comunidad	Generación Aislada con Grupos Electrógenos	Viviendas Electrificadas con Energías Renovables			Auto-generación a gasoil	Otro tipo de Auto-generación	Red Eléctrica Pública	Total Año 2013	
			SFV	MCH	Total				Con Servicio Eléctrico	Sin servicio eléctrico
Gran Sabana	Wonken II	-	-	180	1354	500	58	4641	5474	725
	Kavanayen	-	-	300						
	Kamarata	-	-	145						
	La Ciudadela	-	-	120						
	San Ignacio de Yuruaní	-	-	82						
	San Francisco de Yuruaní	-	-	150						
	Canaima	-	-	280						
	San Marcos de Agua Fria	-	7	-						
	San Rafael de Kamoirán	50	-	-						
	Santa Cruz de Mapaurí	80	1	-						
	Uroy Uaray	48	-	-						
	Parupa	-	41	-						
	Arapan	-	5	-						
	Jaspe	-	7	-						
	Mare Paru	-	10	-						
	Paraitepuy De Roraima	-	10	-						
	Salto Kawi	-	3	-						
	Saro Wapo	-	4	-						
	Warpata	-	9	-						
Cedeño	Caño Bejuco	-	4	-	75 (206)	980	236	13320	14742	2406
	Cerro Pastoral De Villa Coa	-	18	-						
	Culebra	-	4	-						
	El Guamal	-	4	-						
	La Pista	-	4	-						
	Salto Maraca	-	4	-						
	Salvacion	-	6	-						
	San Rafael De Parhuaza	-	18	-						
	Santa Fe	-	4	-						
	Tierra Blanca	-	9	-						
Sucre	El Palmar	-	5	-	61 (70)	203	45	3961	4279	549
	Icutu	-	12	-						
	Jiyakwaña	-	9	-						
	Kadansakaduña	-	4	-						
	Kanadakuni	-	15	-						
	Kusime	-	13	-						
	Sede Escuela Granja Kasimaya	-	3	-						
Piar	El Plomo	-	21	-	21 (24)	291	49	22049	22413	428

Las primeras micro-centrales hidroeléctricas fueron instaladas por las misiones de los monjes capuchinos en las comunidades indígenas pemón de Kavanayen y Kamarata y posteriormente fueron asumidas por al gobierno venezolano, ampliadas y mejoradas en su infraestructura civil. La generación con micro-centrales aprovecha ríos que son, todos, afluentes del río Caroní. En este sentido, el alto Caroní es aprovechado para generación local por medio de micro-centrales y el bajo Caroní es aprovechado para la generación del 70% de la energía eléctrica de toda Venezuela, principalmente, en la Central Hidroeléctrica del Guri (Ver figura 35).

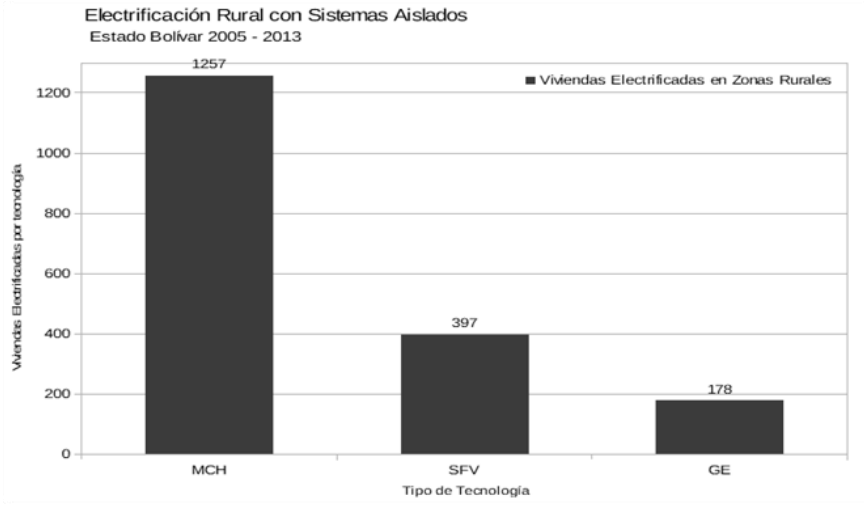


Figura 36. Sistemas de electrificación en comunidades rurales implementados en Bolívar entre 2005 y 2013, por tipo de tecnología de generación

Sistemas SFV domésticos en la comunidad de Arapán

Arapán es una comunidad muy pequeña de cinco viviendas, donde los habitantes son familias cercanas. En Arapán basan su actividad económica en el turismo debido a la cercanía a la quebrada de Pacheco. En ese sentido, tienen una posada y un comercio pequeño. El terreno ocupado por la comunidad lo alcanza la hectárea (0,95 Ha.) y cuenta con cinco (05) sistemas fotovoltaicos domiciliares de 300 Wp (SFV-300). Uno de estos SFV-300 sirve a cuatro cabañas que se ofrecen a turistas que visitan la Quebrada de Pacheco. Los equipos fueron instalados en 2011.

Tabla 30 Electrificación con sistemas solares fotovoltaicos (SFV) en Arapán, con capacidades de 300 Wp.

Sistemas	Objetos Sociales	
	Descripción	**Cantidad**
SFV-300	Viviendas	5
SFV-300	Cabañas Turísticas	4
SFV-300	Oficina Imparques	1
SFV-300	Comercio	1
SFV-300	Chozas Turísticas	3
Total		**14**

Figura 37 Comunidad de Arapán. Posada Turística con SFV-300.

Sistemas SFV domésticos en la comunidad de Jaspe

Jaspe es una comunidad compuesta por sietes viviendas ocupadas por familias permanentes en la aldea y por diez cabañas turísticas arrendadas por una de las familias de la comunidad. La comunidad está compuesta por indígenas pemón que basan sus actividades en el conuco y la pesca en el río. La cercanía a la Quebrada de Jaspe, uno de los más concurridos destinos turísticos de la Gran Sabana, le proveen de un gran potencial turístico a esta

aldea que ha sido aprovechado a través de la posada. En la tabla 31 se muestran los objetos sociales electrificados con energías renovables en la Comunidad de Jaspe.

Tabla 31 Electrificación con sistemas solares fotovoltaicos (SFV) con capacidades de 300 Wp en Jaspe

Sistemas	Objetos Sociales	
	Descripción	Cantidad
SFV-300	Viviendas	1
SFV-300	Viviendas	3
SFV-300	Viviendas	3
SFV-600	Cabañas Turísticas	6
SFV-300	Cabañas Turísticas	2
SFV-300	Usos Compartidos	3
Total		**18**

Figura 38 Comunidad de Jaspe. SFV-600 para posadas turísticas

Sistemas SFV comunitarios en Santa Cruz de Mapaurí

Es una comunidad de 80 viviendas cuyos habitantes pertenecen a la etnia indígena Pemón. Esta comunidad fue atendida en la primera fase del programa "Sembrando Luz", es decir, se atendieron las infraestructuras prioritarias con sistemas fotovoltaicos de 1200 y 2100 Wp, para plantas potabilizadoras de agua, escuelas, ambulatorios y centro de telecomunicaciones. En esta comunidad se realizó una encuesta a un vivida

con un SFV-300. La comunidad tiene un Grupo Electrógeno que suministra electricidad a una red de distribución para las 80 viviendas del pueblo en media tensión. Todos los sistemas fotovoltaicos están operativos y sin fallas desde su instalación en el año 2012. Hay posadas turísticas en esta comunidad.

Tabla 32 Electrificación en Santa Cruz de Mapaurí con sistemas de 300 Wp y de 1200 Wp

Sistemas	**Objetos Sociales**	
	Descripción	**Cantidad**
SFV-1200	Escuela	1
SFV-1200	Ambulatorio	1
SFV-1200	Planta de Agua	1
SFV-300	Vivienda	1
SFV-4080	Centro de Telecomunicaciones	1
Total		**5**

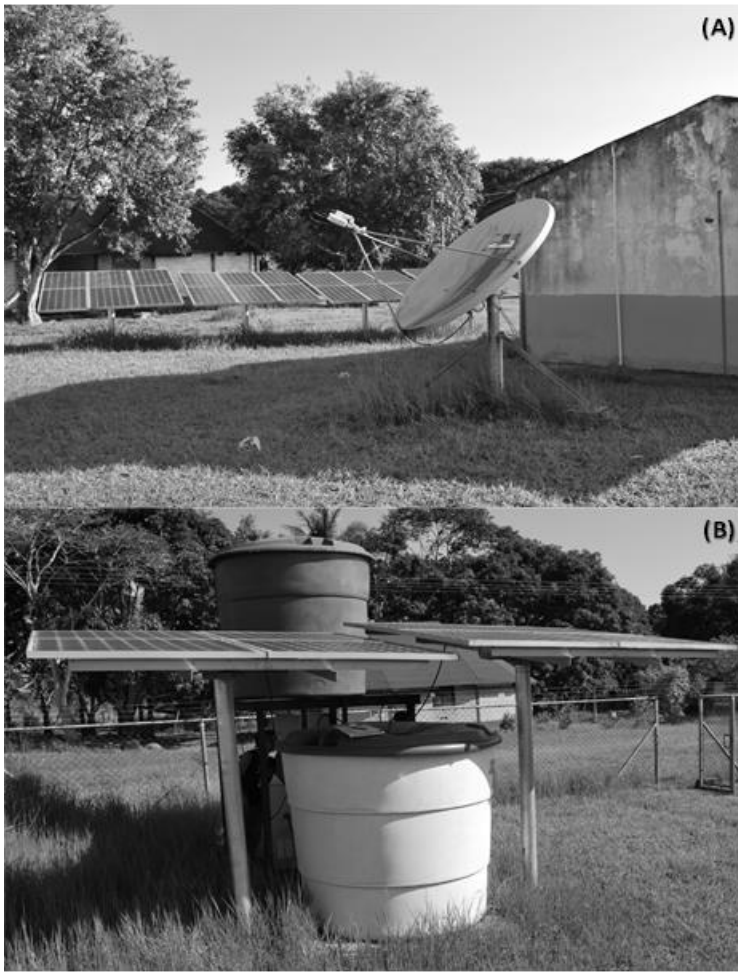


Figura 39 (A) Centro de Telecomunicaciones; (B) Planta de Agua electrificados con sistemas solares fovotovoltaicos comunitarios

Sistemas SFV comunitarios en San Rafael de Kamoirán

En esta comunidad indígena habitan 635 personas distribuidas en 74 viviendas. En esta comunidad hay tres SFV-1200 tal y como se muestran en la tabla 33. Los sistemas fueron instalados en la primera fase del programa sembrando luz y la electrificación de la red de distribución de la comunidad se hace con un Grupo Electrógeno de 72 kW que enciende por doce (12) horas diarias. El consejo comunal, a través de la mesa técnica de energía, administra y gestiona la planta eléctrica que fue adquirida a través de un

proyecto propuesto por ellos mismos. Tanto en la escuela como en el ambulatorio hay servicio de internet las 24 horas del día.

Tabla 33 Electrificación en San Rafael de Kamoirán con sistemas solares fotovoltaicos comunitarios

Sistemas	Objetos Sociales	
	Descripción	**Cantidad**
SFV-1200	Escuela / Telecomunicaciones	1
SFV-1200	Planta de Agua	1
SFV-1200	Ambulatorio / Telecomunicaciones	1
Total		**3**

Figura 40 Sistema de 1200 Wp para electrificación del ambulatorio de la Comunidad de San Rafael de Kamoirán y acceso a internet en las instalaciones de este.

LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉRIDA

El estado Mérida posee una superficie de 11.300 Km² que representa el 1,2% del territorio de Venezuela. Limita al Norte con los estados Trujillo y Zulia, al Sur con los estados Barinas y Táchira, al Este con el estado Barinas y al Oeste con los estados Zulia y Táchira. En Mérida nace el nombre de los Andes. Cuando los españoles llegaron a estas tierras, en el siglo XVI, observaron que los indígenas, para contrarrestar la erosión y el degaste de los suelos por lo empinado de las montañas, cultivaban la tierra en terrazas. A esta manera de trabajar la tierra los españoles la llamaron "Andenes", de ahí derivó el nombre de los Andes con el cual se conoce desde ese momento y hasta la fecha a la cordillera montañosa que nace en el estado Mérida venezolano y recorre gran parte de la región más occidental de Suramérica, hasta Chile. Actualmente, sólo el 0,3% de la población de los andes venezolanos es indígena. En la época precolombina habitaban los Andes venezolanos indígenas de las etnias Timoto-Cuicas, Torondoyes, Timotes, Mucurubaes, Escagüeyes, Bailadores, Chinatos, Mocotíes y Jirajaras. La capital actual del estado Mérida es la ciudad de Mérida y está constituida por 23 municipios que, a su vez, se dividen en 86 parroquias de las cuales 37 tienen más de un 50% de su población en pueblos, aldeas y caseríos rurales. En las comunidades campesinas de los andes venezolanos habita un 7,83% de la población (148.248 personas de población rural) de Mérida (828.592 personas). El paisaje está formado por dos cadenas montañosas: la sierra de La Culata al norte del estado, con su pico más alto a 4.560 msnm (Piedras Blancas) y la cadena montañosa de Mérida, compuesta por la sierra Nevada y la sierra de Santo Domingo con el pico Bolívar a 4.980 msnm, el más elevado de Venezuela. En los páramos de La Sierra Nevada (comunidades de San Isidro y Los Nevados) la temperatura puede llegar a descender por debajo de los 0°C. Los ríos del estado Mérida, escurren sus aguas hacia la cuenca del Mar Caribe, a través del Lago de Maracaibo mientras otros ríos de Mérida drenan sus aguas a la cuenca del Orinoco. En los páramos es típico encontrar vegetación como los frailejones y, en la parte más elevada de las montañas, líquenes y musgos. La economía del estado está basada en la actividad agrícola vegetal (los rubros que más se producen son las patatas o papas, zanahoria, apio, remolacha y ajo). También hay una importante producción animal, cría de bovinos, porcinos, aves y la truchas. Gracias a las bellezas paisajísticas del estado, el turismo forma parte de su base económica, en Mérida se han desarrollado hoteles y comercios, así como muchas posadas rurales, que sirven de apoyo a esta actividad. Los servicios vinculados al gobierno de la república y el estado, y a la Universidad de Los Andes (ULA), también contribuyen con su base económica.

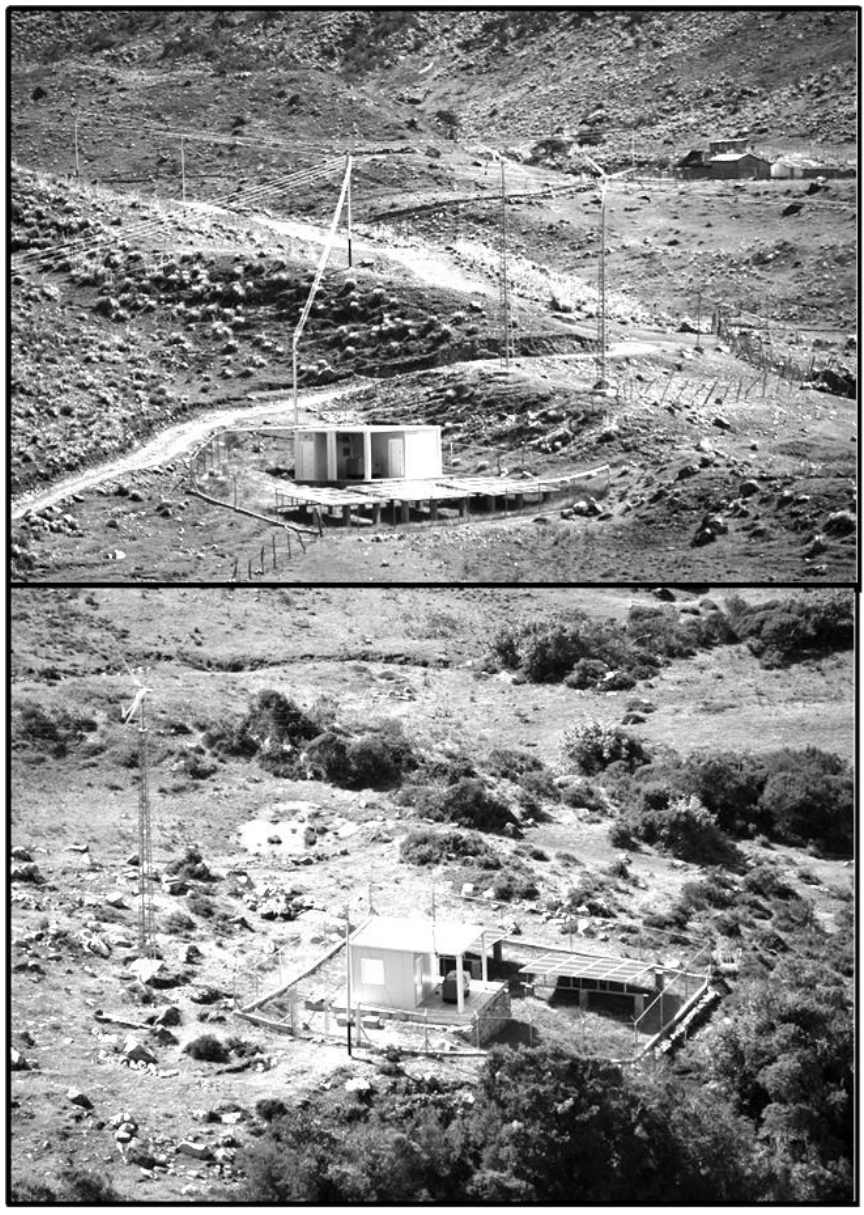


Figura 41 Micorredes rurales híbridas de la Comunidad de Las González en el Páramo de los Conejos

Sistema eléctrico del Estado Mérida

El sistema eléctrico del estado Mérida está integrado en el sistema eléctrico andino venezolano que se denomina Sistema Sur Occidental (SSO), por su ubicación geográfica relativa, dentro del país. Cuenta con una capacidad de generación hidroeléctrica de 545 MW y termoeléctrica de 370 MW, con los cuales se cubre el 50% de la demanda eléctrica del SSO, según la disponibilidad de las unidades del parque de generación propio de los Andes. Históricamente, el indicador de Tiempo Total de Interrupciones (TTI) ha sido de 20 horas, por debajo del promedio nacional de 24,9 horas, para el año 2011. Particularmente, en el estado Mérida, el servicio eléctrico se extendió del 98,19% en el año 2001 al 99,7% en el 2013. En conjunto, la red eléctrica pública suministra electricidad al 99,87 % y sólo 0,05% se abastece con sistemas basados en energías renovables instalados por el gobierno nacional, el restante porcentaje tiene plantas eléctricas propias. Un 38,2% de la población no paga por el servicio eléctrico. No se consideran emisiones en las centrales hidroeléctricas del SSO y las centrales termoeléctricas aportan anualmente unos 1950 GWh emitiendo 450 Mton de CO_2 equivalente. Por lo tanto, la media anual de emisiones equivalentes es 0,239 kg CO_2 eq / kWh, en parque de generación del SSO. Considerando que solo un 50% de la energía consumida es generada en el SSO y el resto es importada del Sistema Interconectado Nacional, generada en Centrales Hidroeléctricas del Estado Bolívar, sin emisiones de CO_2 eq, el factor de emisiones en el SSO es de 0,119 kg CO_2 eq / kWh.

Tabla 34 Plantas de Generación en el Sistema Sur Occidental

Central de Generación	Tecnología	Capacidad Instalada (MW)
Peña Larga	Hidroeléctrica	80
Planta Páez	Hidroeléctrica	200
San Agatón	Hidroeléctrica	270
Masparro	Hidroeléctrica	25
Táchira	Termoeléctrica	165
CAAEZ	Termoeléctrica	15
El Vigía	Termoeléctrica	50
Termobarrancas	Termoeléctrica	140
Total		**945**

Electrificación rural en el Estado Mérida

Entre los años 2001 y 2013, el índice de electrificación rural en el estado Mérida aumentó de un 94,7% hasta un 99,02%. Es decir, la cantidad de viviendas sin acceso al servicio eléctrico en las comunidades rurales se redujo en un 83%. En el ámbito urbano, la reducción en la cantidad de viviendas sin acceso al servicio eléctrico ha sido de un 91%. En conjunto, la brecha entre índices de electrificación rural y urbano en el estado Mérida disminuyó de 4% a 0,8%, lo que significa un acortamiento entre la brecha de electrificación, entre campo y ciudad, del 80%. En el período entre 2001 y 2013, la cantidad de viviendas rurales se incrementó en casi 6000, por lo que tuvieron que ser electrificadas muchas más viviendas rurales de las que fueron construidas para poder superar, en 2013, el índice de electrificación rural del año 2001.

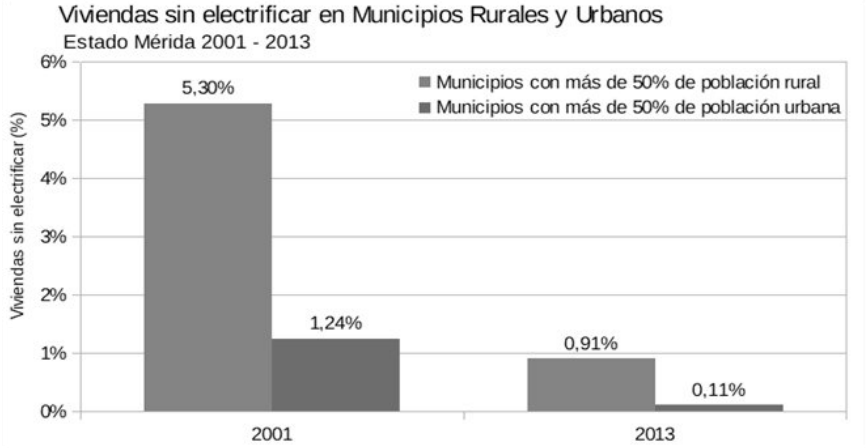


Figura 42 Reducción en la brecha de electrificación entre municipios rurales y urbanos en el estado Mérida de la República Bolivariana de Venezuela, entre 2001 y 2013

Cabe destacar la poca diferencia entre la densidad poblacional de los municipios rurales y urbanos en Mérida. En el caso rural la densidad poblacional media ponderada es de 50,39 hab/km^2 mientras que en los municipios urbanos el valor es de 205,09 hab/km^2. En este caso, también se ha encontrado una relación entre la densidad poblacional y el porcentaje de viviendas sin electrificar en cada Municipio, aunque con una dispersión mayor que en los casos de Bolívar, Zulia y Falcón. En este sentido, en el año 2001, en la medida que la densidad poblacional de un municipio es mayor la cantidad de viviendas sin acceso a la electricidad decrece exponencialmente, tal y como se puede observar en la figura 43. Esta relación ha cambiado con el notable aumento de la tasa de electrificación rural. De tal manera que la relación inversamente exponencial entre densidad poblacional y viviendas sin acceso a la electricidad ya había desaparecido para el año 2013.

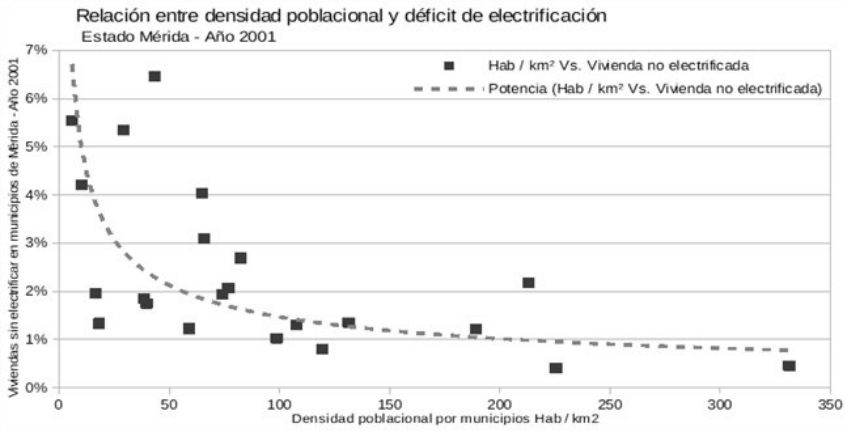


Figura 43 Relación entre las viviendas sin electrificar y la densidad poblacional por municipios del estado Mérida en 2001

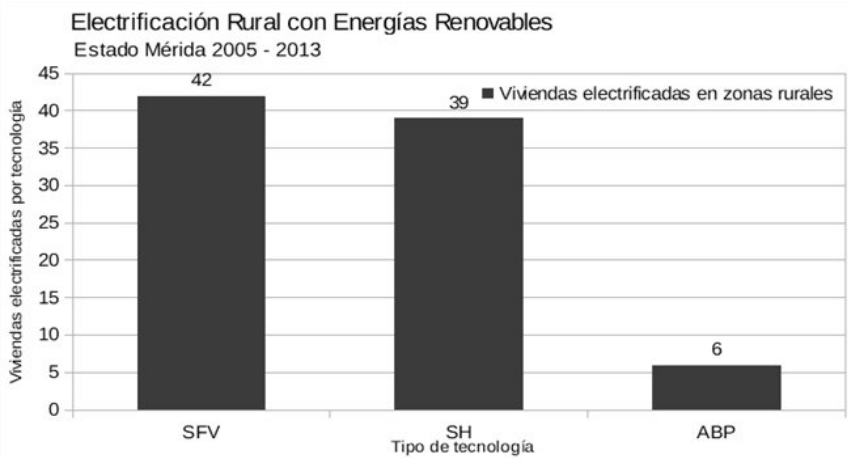


Figura 44 Sistemas de electrificación en comunidades rurales implementados en Mérida entre 2005 y 2013, por tipo de tecnología de generación

Entre los sistemas de electrificación rural basados en energías renovables que fueron implementados por el gobierno nacional en el estado Mérida (100 viviendas e infraestructuras comunitarias electrificadas) el 55% son sistemas fotovoltaicos autónomos (SFV), 39% sistemas híbridos eólico-solar-diésel (SH) y el restante 6% aerogeneradores de baja potencia (ABP). Cabe destacar que en todas las viviendas rurales electrificadas con sistemas aislados se emplearon sistemas de generación basados en energías renovables y que, en las dos parroquias donde se implementó el programa gubernamental de electrificación rural (Tabla 35), la electrificación con energías renovables ha significado el acceso a la electricidad para un 16,7 % de las viviendas con

servicio eléctrico, mientras que el restante 83,3% fueron integradas en la red de distribución estadal.

Tabla 35 Parroquias y/o comunidades rurales de Mérida con viviendas electrificadas con sistemas aislados, para el año 2013

Parroquia	Comunidad	Viviendas Electrificadas con Energías Renovables				Auto-generación a gasoil	Otro tipo de Auto-generación	Red Eléctrica Pública	Total Año 2013	
		SFV	SH	ABP	Total				Con Servicio Eléctrico	Sin servicio eléctrico
Los Nevados	Las Plumas	15	-	-	37	-	-	131	168	0
	San Isidro	22	-	-						
La Mesa	Las González	5	39	6	50	-	-	302	352	0
	Otras Comunidades	-	-	-						

Comunidad de San Isidro

Es una aldea de montaña ubicada en la parroquia Los Nevados del Municipio Libertador del estado Mérida. En esta aldea, con viviendas muy dispersas, se han instalado veintidós (22) SFV-600. Es una zona de muy difícil acceso a la cual se lleva desde el Pueblo de Los Nevados ubicado a 3 kilómetros de camino de montaña de esta aldea. Para llegar solo puede ser en mula o a pie. Para llegar a los Nevados debe hacerse en Camionetas rústicas desde la ciudad de Mérida en un viaje de 4 horas de montaña. Se levantaron las coordenadas de las 4 viviendas electrificadas con SFV-600 que pudieron ser visitadas en San Isidro, se muestran en la figura 45. De los cuatro sistemas visitados 3 estaban operativos desde su puesta en funcionamiento.

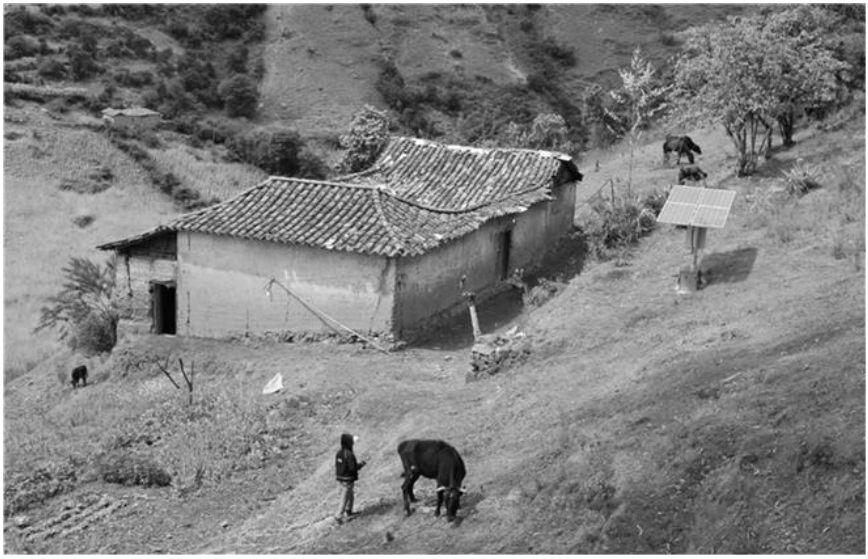


Figura 45 Aldea de San Isidro. SFV-600

Comunidad de Las González

Es la comunidad más compleja de todas las que fueron visitadas, está ubicada en un valle (Valle de las González). Está ubicada en la Parroquia de La Mesa, en el Municipio Sierra Nevada a una distancia de 17 kilómetros de Jají, que es el pueblo electrificado por la red eléctrica de distribución que se encuentra más cercano. El valle de Las González está ubicado a 3500 msnm. El camino entre Jají y El Valle de las Las González toma entre 3 y 4 horas empleando vehículo rústico. La comunidad no puede ser considerada un pueblo o aldea, ya que las viviendas están muy dispersas en un área bastante amplia. Tal y como se ha mencionado, existen 50 viviendas en la comunidad dispersas en un área total estimada de 4,3 km2 (425 ha.). Entre la primera vivienda electrificada con energías renovables y la última vivienda del valle, hay una distancia de 7,1 kilómetros a lo largo del río de Las González que atraviesa toda la comunidad. En este caso las características de los sistemas híbridos son las que se muestran en el capitulo de Microrredes Rurales Híbridas de este libro. Los sistemas híbridos fueron instalados por Fundelec y los Aerogeneradores, así como los Sistemas Fotovoltaicos por Unerven.

Tabla 36 Electrificación en Las González

Sistemas	Objetos Sociales	
	Descripción	**Cantidad**
ABP-1500	Viviendas	6
SFV-600	Viviendas	5
SH- 20	Viviendas	15
SH- 30	Escuela / Telecomunicaciones	1
	Viviendas	24
Total		**51**

Figura 46 Tres (03) ABP-1500 en viviendas de la Comunidad de Las González

MICRO CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

El potencial de desarrollo de Micro-Centrales Hidroeléctricas (MHP, por sus siglas en inglés) en Venezuela es de aproximadamente 4.400 MW, lo que corresponde al 7% del potencial hidroeléctrico total del país. El 76% de este potencial permanece sin explotar en las cuencas de los ríos Orinoco y Caroní (estados Bolívar y Amazonas), 18% en la región andina (estados Mérida, Trujillo y Táchira) y 6% en la Sierra de Perijá (estado Zulia). La electrificación con MHP en Venezuela ha tenido como objetivos principales el ahorro de recursos de energía fósil que, de lo contrario, se habrían consumido, al tiempo que diversificaba la matriz energética y se evitaba la contaminación en ecosistemas frágiles. En el sur de Venezuela, la generación de electricidad a través de MHP se ha centrado en comunidades ubicadas en importantes cuencas fluviales como la del Caroní. Una premisa de diseño es la conservación de la cuenca del río Caroní, de la cual el 65% del consumo nacional de electricidad se genera a través de grandes centrales hidroeléctricas. El río Caroní, con un flujo promedio de 3.514 m^3 / s, representa el 75% del potencial hidroeléctrico de Venezuela, que se estima en alrededor de 63.000 MW.

La cuenca del río Caroní y sus afluentes se encuentran principalmente en la zona de "La Gran Sabana", que se encuentra dentro del parque nacional Canaima. Desde 1957, 6 comunidades indígenas han sido electrificadas con MHP: Kavanayén, Kamarata, Wonken, Arautamerú, La Ciudadela y Canaima y se han lanzado programas de desarrollo amigables con el medio ambiente, en esas zonas (Tabla 37). Los proyectos MHP cuentan con el respaldo de un sistema de generación diésel para cubrir parcialmente la demanda en caso de fallas prolongadas o períodos de sequía, generalmente de enero a marzo. La Figura 47 muestra la ubicación de las 6 comunidades y los proyectos de MHP del sur de Venezuela (La Gran Sabana).

Figura 47 Ubicación de las micro centrales hidroeléctricas (MHP) en La Gran Sabana (sur de Venezuela)

El modelo para la gestión institucional sostenible de los sistemas de electrificación rural basados en Tecnologías de Energía Renovable (RET, por sus siglas en inglés) es clave para evitar una alta tasa de falla. En estos proyectos, ha habido tres etapas del modelo de gestión y una política de electrificación a largo plazo que incluye una alineación progresiva de las instituciones involucradas. Cabe señalar que las seis comunidades electrificadas con MHP pertenecen al grupo étnico indígena Pemón, cuyas características sociales fueron consideradas en el diseño del modelo de gestión. En particular, se incluyeron las autoridades y el jefe indígenas, un anciano de la comunidad elegido por los otros ancianos Pemón.

En las primeras MHP (Kavanayén, Kamarata y Wonken), los sistemas de electrificación fueron desarrollados por misioneros católicos (Misiones religiosas Capuchinas) en 1957, con el apoyo institucional de la política de electrificación rural del gobierno nacional a través de la empresa eléctrica venezolana del momento o Compañía de Servicios Eléctricos (ESC, por sus siglas en inglés). Esto tuvo un impacto positivo, ya que fueron promovidas escuelas técnicas con maestros misioneros y financiados tanto por el gobierno como por las autoridades eclesiásticas. Estas escuelas proporcionaron alfabetización y educación en áreas como la agricultura, la artesanía y la construcción. Los misioneros religiosos diseñaron técnicamente

las primeras MHP y trabajaron junto con la población local en las obras civiles, mientras que la ESC proporcionó ingenieros eléctricos y mecánicos para la supervisión técnica. La gestión y mantenimiento del MHP fue realizada por las misiones religiosas, en un primer momento.

Desde 1984, la ESC se involucró directamente en la operación y mantenimiento de los primeros proyectos, a través de Programas Sociales Indígenas (ESC-Programas Sociales Indígenas, llamados Mayú). De hecho, la ESC desarrolló un programa especial para apoyar la gestión de las MHP, reemplazando las misiones religiosas. Además, la ESC (Edelca) implementó nuevos proyectos (Arautamerú, La Ciudadela y Canaima) junto con los gobiernos nacionales y municipales, así como con organizaciones comunitarias y programas sociales indígenas.

En el año 2005, los programas sociales indígenas hicieron que las organizaciones comunitarias fueran completamente operativas y fueron capacitadas para asumir la gestión de los proyectos, en colaboración con la ESC (Edelca) y el gobierno nacional a través de una Autoridad Autónoma para la Electrificación Rural (ESC + AARE, por sus siglas en inglés). Los programas sociales indígenas-ESC se transformaron en programas sociales indígenas con un alcance nacional. Los gobiernos nacional y municipales todavía están involucrados en la gestión de las MHP en La Gran Sabana. Hoy en día, en las 6 comunidades existe un modelo de gestión compartida, donde la ESC es responsable del mantenimiento de los equipos y los usuarios pagan una tarifa proporcional al consumo (todas las casas tienen medidores de consumo) y son responsables del uso racional y eficiente de la energía para extender los proyectos. Los usuarios recibieron capacitación sobre el uso racional y eficiente de la energía a través de talleres promovidos por la ESC. Además, según el Ministerio de Energía Eléctrica de Venezuela (MPPEE, por sus siglas en castellano), de 2006 a 2012, la compañía eléctrica nacional distribuyó 156.845.182 bombillas de bajo consumo gratis para las personas que viven en comunidades pobres, rurales e indígenas. Los jefes indígenas y las organizaciones comunitarias actúan como representantes ante la ESC y otras instituciones públicas de Venezuela.

Tabla 37 Descripción de los proyectos de MHP en La Gran Sabana (sur de Venezuela)

Comunidad	Año de instalación	Viviendas	Población	Tipo de turbina	Cantidad de Turbinas y Capacidad (kW)
Kavanayen	1957	300	1200	Francis	110 (1 x 110)
Kamarata	1962	145	800	Francis	60 (1 x 60)
Wonken	1984	180	600	Banki-Edelca (I)	58 (1 x 58)
Arautamerú	1988	300	1200	Banki-Edelca (II)	150 (6 x 25)
La Ciudadela	1994	120	350	Banki-Edelca (III)	120 (2 x 60)
Canaima	1994	280	1000	Banki-Edelca (III)	400 (1 x 400)

En estas comunidades, el proceso de desarrollo comenzó casi al mismo tiempo que los proyectos de electrificación rural con MHP, a finales de la década de los 50´s del siglo pasado. Al principio, estos pequeños asentamientos, dispersos en grandes áreas, se concentraron alrededor de los centros de población que estaban siendo electrificados. Luego, la adquisición de nuevas técnicas agrícolas y el uso de electricidad para riego, iluminación, educación y salud, entre otros, permitieron un crecimiento progresivo en el número de casas. Gracias a la electrificación, actualmente no existen diferencias sociales o políticas significativas entre estas comunidades y cualquier otra comunidad rural en Venezuela.

Los siguientes apartados están organizados para explicar cada una de las seis comunidades de la siguiente manera: (i) en el primer párrafo, una presentación general de la comunidad y el proyecto MHP correspondiente; (ii) en el segundo párrafo, una descripción del diseño del proyecto y su desempeño, considerando los registros históricos almacenados en la biblioteca de la Corporación Venezolana de Guayana (CVG), ubicada en Puerto Ordáz, Estado Bolívar (sur de Venezuela).

Micro-central de Kavanayén

La comunidad de Kavanayén se encuentra a 55,7 km de la carretera troncal de La Gran Sabana, a una altitud de 1.200 m.s.n.m. en un territorio con un ecosistema altamente frágil. El pueblo más cercano es Luepa (La Ciudadela),

ubicado a 40,8 km, y la siguiente ciudad electrificada a través de la red nacional está a 210 km. La comunidad creció alrededor de una misión capuchina establecida en 1940 y actualmente tiene 1.200 habitantes y 300 casas distribuidas en un área de 215 ha. El 100% de las casas han obtenido electricidad y agua desde 1957 del río Apacairo, que es un afluente del río Caroní (Figura 48-A). Actualmente, en la comunidad hay una escuela misionera, una escuela secundaria, un centro de salud, varias posadas turísticas, restaurantes, operadores turísticos y el centro de operaciones MHP (Figura 48-B). Además, hay un centro de monitoreo para todos las MHP de la región, y se mantiene comunicación con la sede regional del ESC en Ciudad Guayana, ubicada 350 km al norte.

La MHP de Kavanayén fue concebida por misioneros capuchinos y se puso en funcionamiento a través de la colaboración con el gobierno de Venezuela. Los ingenieros venezolanos realizaron los levantamientos topográficos, las instrucciones de diseño y construcción, mientras que el trabajo físico fue realizado por la población indígena y los misioneros. La MHP ha trabajado continuamente durante 60 años, generando alrededor de 210.818 kWh / año, lo que significa un factor de capacidad del 22% (tasa entre la generación real y potencial). En 1994, la turbina original fue reemplazada por un sistema turbogenerador de 125 kW por Corpoelec (actual ESC en Venezuela).

Figura 48 (A) Líneas eléctricas y de agua de Apacairo; (B) Micro central hidroeléctrica de Kavanayen

Micro-central de Kamarata

Kamarata está ubicada a 70 km de Kavanayén y solo se puede llegar por aire. La comunidad está ubicada en el área occidental del Parque Nacional Canaima en el estado de Bolívar, cerca del Auyán-Tepui (Salto Ángel), que es el destino turístico más importante del sur de Venezuela. Tiene 1.500 habitantes distribuidos en 12 asentamientos pequeños y dispersos, donde las personas se dedican principalmente al turismo y la agricultura. Al igual que Kavanayén, fue fundada por misioneros capuchinos que se establecieron en el valle de Kamarata en 1954. Estos misioneros concibieron el proyecto de MHP que comenzó a operar en 1962, en un barranco del río Tapere (Figura 49). En el asentamiento principal, hay 145 casas electrificadas y 800 personas (100% de la población), una escuela misionera, una escuela primaria, una escuela secundaria, una clínica, un operador turístico, posadas y restaurantes.

Las casas dispersas fuera del asentamiento principal se electrifican mediante módulos solares fotovoltaicos.

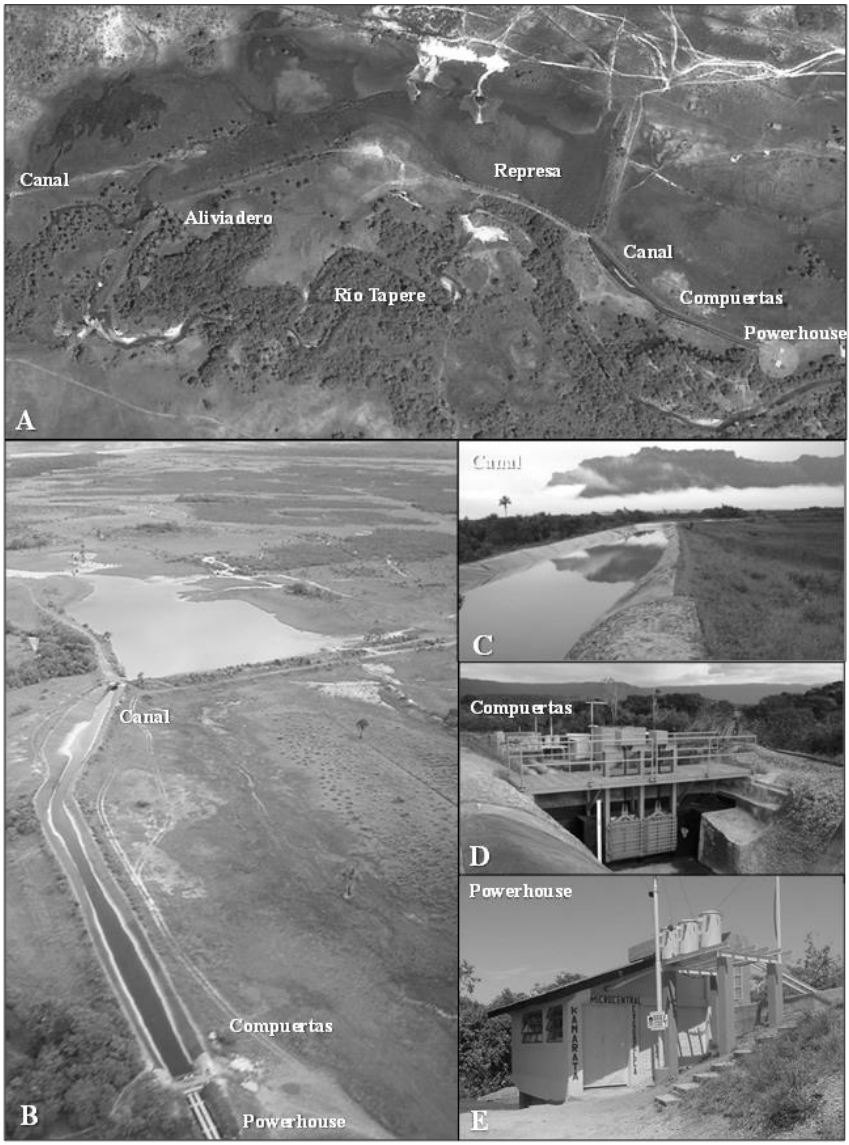


Figura 49 Partes de la micro central hidroeléctrica de Kamarata (A) Vista Satelital; (B) Vista Aérea; (C) Canal; (D) Compuertas; (E) Powerhouse

El proyecto MHP de Kamarata fue concebido por misioneros capuchinos y se puso en funcionamiento con el apoyo de ingenieros de la compañía eléctrica de Caracas. La MHP ha funcionado durante 55 años, durante los cuales ha habido algunos períodos de indisponibilidad debido a las largas estaciones secas relacionadas con la "Oscilación del Sur de El Niño" (ENSO, por sus siglas en inglés). Este fenómeno se está intensificando por el calentamiento global y el cambio climático. En los últimos años, la MHP ha generado alrededor de 50.289 kWh / año, lo que implica un factor de capacidad del 9,6%. Este bajo rendimiento ha sido causado por el bajo suministro de agua como consecuencia de la rotura de la presa, lo que provoca una pérdida de agua de casi el 45% y una capacidad de generación que apenas alcanza los 27 kW. La ruptura de la presa también ha llevado a la entrada de sedimentos en el embalse, reduciendo la capacidad de generación debido a la proliferación de plantas acuáticas. Además, en varias ocasiones, las fuertes lluvias de agosto y septiembre han causado graves daños al canal de la pista de carreras adyacente a la MHP. Además, dada su longitud y vida útil prolongada, el canal tiene fugas que aumentan durante los períodos lluviosos. Por lo tanto, el flujo desigual del canal es insuficiente para la generación de electricidad de enero a marzo. En las horas de mayor demanda, las casas más alejadas de la red de distribución tienen fluctuaciones de voltaje intensificadas por las pérdidas significativas en las líneas deterioradas. En condiciones normales de funcionamiento, la generación eléctrica anual promedio podría alcanzar hasta 120.000 kWh / año y el factor de capacidad sería de alrededor del 22.8%.

Micro-central de Wonken

La comunidad de Wonken se encuentra a 65 km de la carretera troncal de La Gran Sabana, desde Sierra Lema hasta la frontera con Brasil. El acceso a Wonken solo es posible en vehículos con tracción en las cuatro ruedas. La comunidad creció en los alrededores de un centro misionero católico establecido en 1959. En general, la forma, el carácter y el tamaño de los asentamientos han cambiado significativamente durante el siglo pasado, especialmente desde la electrificación. Los 150 habitantes iniciales en casas dispersas comenzaron a establecerse alrededor de la misión para tener acceso a las escuelas y actividades productivas. Hoy en día, 600 personas viven en Wonken, beneficiándose del servicio de electricidad.

En la década de 1970, los misioneros construyeron una MHP inicial junto con la población indígena. La maquinaria, así como algunas obras civiles, aún permanecen. Posteriormente, en 1984, se instaló la primera unidad Banki. La turbina Banki fue diseñada y construida en su totalidad por ingenieros venezolanos de EDELCA en los talleres metalmecánicos del complejo hidroeléctrico Caroní, en el norte del estado de Bolívar. Las principales ventajas de la turbina Banki-Edelca son la reducción de peso, costo y mantenimiento, gracias a mejoras técnicas. En particular, la turbina Banki-Edelca, basada en las primeras máquinas instaladas por los misioneros, proporcionó una experiencia útil para la fabricación de las seis turbinas Banki-Edelca para la MHP de Arautamerú. Después de 30 años de operación, la MHP de Wonken ha demostrado altos niveles de confiabilidad y rendimiento. En los últimos años, la MHP ha generado alrededor de 174.838 kWh / año, lo que implica un factor de capacidad del 34,4%.

Micro-central de Arautamerú

La MHP de Arautamerú se instaló en 1988 y se encuentra a 3,5 km de la carretera principal y suministra electricidad a dos asentamientos: San Francisco de Yuruaní y San Ignacio de Yuruaní. San Francisco de Yuruaní tiene 1.650 habitantes, 150 casas y está a 3,9 km de la MHP. Su proximidad al Roraima lo convierte en el punto de encuentro para todas las expediciones turísticas al Tepuy. Su principal actividad productiva es el turismo. Las posadas se han establecido gracias al acceso a la electricidad. San Ignacio de Yuruaní tiene 460 habitantes y 82 casas y está a 4,6 km de la MHP. San Ignacio de Yuruaní creció alrededor del edificio de un centro de operaciones de la compañía eléctrica EDELCA, aunque la principal actividad económica es el turismo.

La MHP de Arautamerú fue diseñada por la compañía eléctrica EDELCA en base a las experiencias de las MHP desarrollados previamente en Kavanayén, Kamarata y Wonken (Figura 50-A). Las turbinas de Arautamerú fueron de las primeras diseñadas por EDELCA después del proyecto Wonken. Las unidades de Arautamerú están totalmente adaptadas al entorno al que sirven, sin causar un impacto visual negativo, utilizando materiales de construcción locales obtenidos de los alrededores de la comunidad (Figura 50-B, Figura 50-C). Sobre la base de estas experiencias, se desarrolló una metodología nacional para el diseño de turbinas, que eran técnica y económicamente

competitivas a nivel internacional. De hecho, el desarrollo de turbinas Banki-Edelca fue la primera iniciativa de este tipo en América Latina. La MHP de Arautamerú ha funcionado durante más de 30 años, durante los cuales no ha habido períodos prolongados de indisponibilidad. El racionamiento de la electricidad generalmente ha ocurrido durante sequías excepcionalmente largas, que nunca duraron más de un mes. Las posadas y restaurantes tienen sus propios generadores, para garantizar el servicio las 24 horas. La demanda de electricidad de San Francisco ha crecido mucho más rápido que la capacidad de la MHP. En este sentido, desde el comienzo de las operaciones en 1988, se han realizado modificaciones técnicas en cuatro de las seis turbinas. Sin embargo, en las horas pico de demanda, la red de distribución es muy susceptible a fallas e inestabilidad debido a las fluctuaciones de voltaje derivadas de las descargas atmosféricas. En los últimos años, la MHP ha generado alrededor de 572.968 kWh / año, lo que implica un factor de capacidad del 43,6%. San Ignacio y San Francisco representan alrededor del 20% y el 80% de la carga, respectivamente.

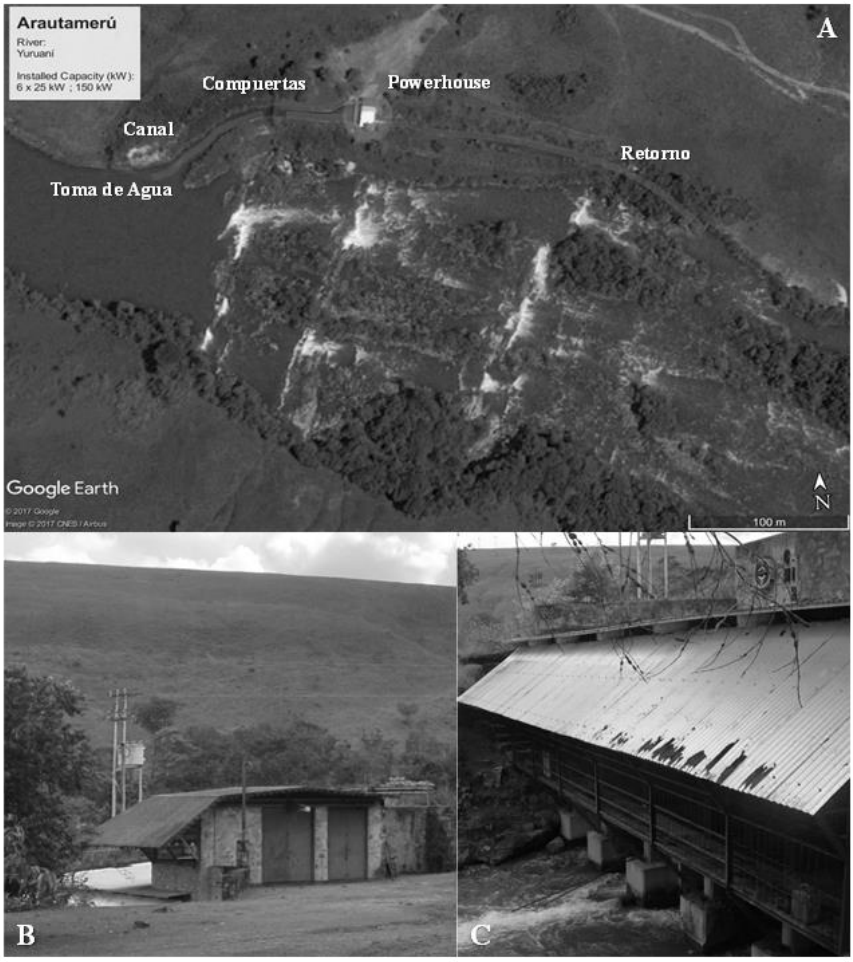


Figura 50 (A) Imagen satelital de la microcentral hidroeléctrica de Arautamerú (B) Powerhouse (C) Drenaje

Micro-central de La Ciudadela

La MHP de La Ciudadela se encuentra a orillas del río Aponguao, muy cerca de la carretera troncal de La Gran Sabana, al pie de Sierra Lema, que es la barrera de entrada natural a La Gran Sabana. El proyecto entró en funcionamiento en 1994, electrificando el campamento de trabajadores y el helipuerto de EDELCA, así como la sede y los cuarteles de un batallón del ejército venezolano en la zona fronteriza de Luepa. Actualmente, 580 personas, así como una oficina del Instituto Nacional de Parques (Inparques)

y un centro turístico, se benefician de la electricidad.

Las turbinas de La Ciudadela son versiones más sofisticadas de las turbinas Banki-Edelca, con un sello totalmente hermético que no se había logrado previamente en las versiones comerciales disponibles de las turbinas Banki. En los últimos años, la MHP ha generado alrededor de 436.668 kWh / año, lo que implica un factor de capacidad del 32.6%. El río Aponguao es uno de los más abundantes en La Gran Sabana y, por lo tanto, menos susceptible a las sequías durante las estaciones secas.

Micro-central de Canaima

Canaima está a 75 km de Kavanayén y 165 km de la carretera troncal de La Gran Sabana, y solo se puede acceder por vía aérea. Canaima se encuentra en La Gran Sabana (Parque Nacional Canaima) y es uno de los destinos turísticos más importantes de Venezuela, especialmente para los extranjeros. Tiene 1.000 habitantes y las personas se dedican principalmente al turismo. La comunidad cuenta con un aeropuerto, un helipuerto y servicios de hotel. La MHP de Canaima comenzó a funcionar en 1994 y se encuentra a orillas del río Carrao (Figura 51-A).

La MHP fue diseñada para minimizar su impacto visual (Figura 51-B). La turbina es una Banki-Edelca con una capacidad de 400 kW que tiene varios avances operativos en comparación con las versiones anteriores, para reducir el desgaste prematuro y las fugas innecesarias. En los últimos años, la MHP ha generado aproximadamente 1.678.073 kWh / año, lo que implica un factor de capacidad del 47,9%. Además, se implementó un sistema que permite monitorear algunos aspectos desde Ciudad Guayana, como el voltaje, la potencia y la temperatura de los equipos.

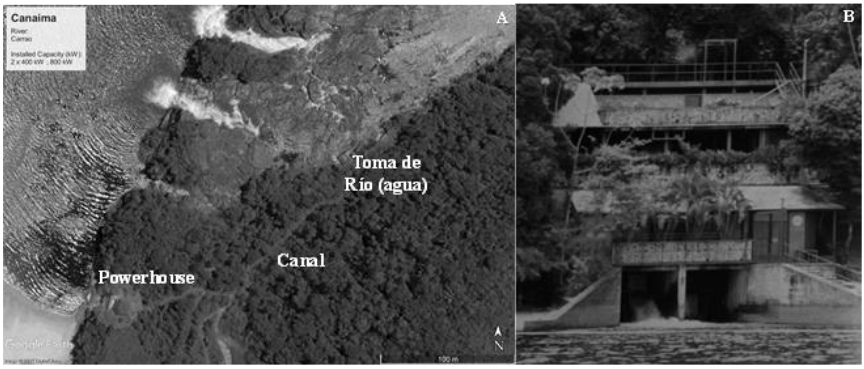


Figura 51 (A) Imagen satelital de la micro central hidroeléctrica de Canaima (B) Powerhouse

Discusión sobre la sostenibilidad de las micro centrales hidroeléctricas en Venezuela

Las siguientes secciones de discusión están relacionadas con cada una de las valoraciones de los proyectos de micro centrales hidroeléctricas correspondientes a la sostenibilidad a largo plazo en las cuatro dimensiones consideradas para la evaluación. Además, se discuten las implicaciones de política energética que los resultados pueden tener sobre el acceso a la energía eléctrica dentro y fuera de Venezuela.

Dimensión ambiental

A partir del análisis de los proyectos de electrificación, se estima que la tecnología MHP produce 3,19 GWh / año de energía. Considerando un factor de emisión de 0.607 kg_CO_2 / kWh, para un sistema de generación basado en generadores diésel comunitarios, la mitigación anual de los proyectos de MHP es 1.963 GTon_CO_2 / año. Si se consideraran generadores diéseles domésticos en cada casa, la mitigación de emisiones sería de 4.181 GTon_CO_2 / año. Sin embargo, se debe prestar atención al impacto negativo del cambio climático, que prolonga las estaciones secas más largas durante el fenómeno ENOS y los períodos de sequía, al tiempo que afecta negativamente el desempeño de las MHP. De hecho, la revisión de los informes históricos mostró que las sequías tienden a ser cada vez más largas, por lo que el consumo de diésel y las emisiones pueden aumentar en el futuro. En este sentido, las mejoras técnicas aún son necesarias para minimizar el uso

de generadores de respaldo diésel o para utilizar respaldos solares fotovoltaicos que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero a cero.

En cuanto al impacto en los ecosistemas locales, las turbinas desarrolladas por EDELCA (Wonken, Canaima, Ciudadela y Arautamerú) están equipadas con un mecanismo de alivio constante, que elimina la necesidad de otros mecanismos de regulación de presión que están restringidos debido a su impacto en el paisaje natural y tienen un impacto muy limitado en la fauna y flora del río. Aunque se causó una deforestación a corto plazo y muy local, todas las tierras deforestadas se reponen con las semillas de especies nativas, lo que garantiza la subsistencia de la flora y fauna nativas, conservando los elementos del ecosistema original. Además, las MHP desarrolladas por EDELCA están construidas de acuerdo con el estilo arquitectónico de las casas de la zona (Arautamerú, Wonken y Canaima). Los sistemas hidráulicos, como los sistemas de enfriamiento, se instalan en circuitos cerrados, para evitar derrames de aceite que puedan contaminar el agua y empeorar sus niveles de calidad. Además, la generación de hidroelectricidad reduce el uso de plantas diésel que requieren combustibles no renovables.

Considerando todos estos aspectos, la dimensión ambiental de la sostenibilidad para los casos estudiados es positiva.

Dimensión Técnica

Con respecto a la adecuación, los electrodomésticos y el número de horas de uso se determinan a partir de encuestas, estimando así un consumo promedio de 4.38 kWh / día por hogar, que es 40% más alto que el consumo promedio en las comunidades rurales conectadas a la red nacional en Venezuela. Además, el valor estimado corresponde a alrededor de 1.600 kWh / año, que es más de siete veces el umbral mínimo propuesto por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, el desempeño de las MHP en términos de suministro de electricidad ha sido suficiente para cubrir la demanda básica y, además, para permitir un cambio en la calidad de vida de los usuarios durante la vida útil de los proyectos.

Con respecto a la confiabilidad, todas las plantas de energía micro hidroeléctrica han estado operando continuamente durante largos períodos, que van desde 23 años en el caso de Canaima hasta 60 años en el de

Kavanayén. Sin embargo, ha habido fallas en todos los proyectos durante su vida útil, siendo la sobrecarga de las redes de distribución (38%) y los períodos secos (31%) las principales causas, mientras que los rayos (23%) y las fallas en la línea de distribución (8%) son menos frecuentes. A continuación, se proporciona una revisión detallada de cada causa de falla:

- *Sobrecarga eléctrica:* hoy en día, en cuatro MHP, la demanda máxima de las comunidades ya ha alcanzado a la capacidad instalada; por ejemplo, en Arautamerú después de 19 años (2007) y en La Ciudadela después de 13 años (2007). Esas comunidades están muy cerca de la carretera principal que cruza La Gran Sabana, por lo que el comercio de artesanías y la construcción de restaurantes y posadas ha llevado a un rápido aumento en la demanda de electricidad. Por el contrario, Kavanayén y Wonken han estado trabajando por debajo de la capacidad máxima durante un período más largo, 57 y 33 años respectivamente. Esto se debe a que fueron diseñados con una gran capacidad excedente (así como Kamarata), ya que son poblaciones particularmente aisladas y solo se puede acceder por aire, río o vehículos con tracción en las cuatro ruedas. Aunque en horas de alta demanda, las casas más lejanas tienen fluctuaciones de voltaje que han acortado la vida útil de algunos electrodomésticos, la mayoría de los habitantes confirman que el servicio de electricidad es estable.

- *Temporada seca:* todas las MHP son susceptibles a variaciones de flujo en las cuencas de los ríos donde se han ubicado, incluso causando interrupciones en el suministro de electricidad durante las sequías. Los más afectados son Kavanayén y Wonken, porque están en ríos de bajo caudal y no usan represas (como en Kamarata). En estos casos, se han instalado generadores diésel como respaldo, lo que garantiza el suministro continuo de electricidad durante todo el año.

- *Descargas atmosféricas sobre la red de distribución:* los rayos impactan en el sistema de distribución eléctrica, causando interrupciones en el servicio de electricidad. Debido a la baja densidad de población, la mayoría de los servicios de distribución de agua, telecomunicaciones y electricidad son aéreos, lo que los hace vulnerables a los eventos climáticos. Por otro lado, la red de distribución también se ha deteriorado debido a los altos niveles de humedad.

Por lo tanto, es recomendable que se realicen diseños iniciales con una gran capacidad de reserva, cuando sea posible, para reducir las fallas. Sin embargo, a pesar de la existencia de fallas, casi todos los usuarios están satisfechos y el 93.8% de la población encuestada calificó el servicio eléctrico de MHP como bueno, muy bueno o excelente. En las comunidades que tienen un mayor riesgo en períodos de sequía, la calidad del servicio sigue siendo satisfactoria debido al respaldo diésel. Por lo tanto, la adición de un respaldo diésel garantiza un mejor servicio y el éxito del proyecto. En resumen, las fallas existentes no representan un desafío que no se puede resolver. Considerando la satisfacción de los usuarios y el tiempo operativo, la dimensión técnica de la sostenibilidad es positiva.

Dimensión Socioeconómica

En términos de educación, los proyectos de MHP han permitido que las condiciones en las escuelas primarias y secundarias sean tan buenas como las de cualquier otra comunidad rural electrificada a través de la red eléctrica nacional. En particular, 43,8% de las casas tienen computadoras de escritorio y 50% tienen computadoras portátiles "Canaima" entregadas a los niños por el gobierno nacional, bajo el programa "Canaima Educativo". En los últimos años, las comunidades con MHP han alcanzado acceso a Internet a través de programas de la ESC (Corpoelec) y la compañía nacional de telecomunicaciones (CANTV). Por lo tanto, los niños pueden descargar actualizaciones educativas en su computadora portátil desde el hogar o la escuela. Además, debido a las mejoras en electricidad y educación, la tasa de asistencia ha aumentado significativa y actualmente es más alta que el promedio nacional. La disponibilidad de electricidad en clase hace que la asistencia a la educación formal sea atractiva para niños y padres. La asistencia escolar en educación básica (de 7 a 12 años) es de 87.0%, y en educación secundaria (de 13 a 17 años) es de 73,3%, mientras que las tasas nacionales en comunidades indígenas rurales son de 46,6% y 8,3%, respectivamente. Además, la tasa de deserción en el nivel secundario es mucho más baja. Con respecto al acceso a la universidad, a nivel nacional solo el 1,2% de la población indígena rural tiene educación universitaria, mientras que en las comunidades con MHP esta tasa es del 14,7%. Finalmente, la tasa de alfabetización es del 92,6%, lo que supera el promedio nacional del 68,6% en las comunidades rurales indígenas.

Con respecto al impacto de las MHP en la salud, el 75% de las casas en las comunidades electrificadas han podido instalar refrigeradores o congeladores. Estas instalaciones son muy importantes para la conservación de alimentos en una dieta basada en peces de río, considerando los altos niveles de humedad y que las temperaturas en La Gran Sabana oscilan entre 18 y 23ºC. Los refrigeradores y congeladores permiten la conservación adecuada de los alimentos, reduciendo en particular la mortalidad infantil. Además, la iluminación eléctrica reemplaza las lámparas de queroseno, que emiten gases y partículas que pueden causar asma y enfermedades infecciosas como la tuberculosis, así como aumentar el riesgo de cáncer. Además, las comunidades tienen centros de salud primaria electrificados. En Kavanayén, Kamarata y Arautemerú existen redes de distribución de agua potable, ya que las estaciones de bombeo han sido electrificadas.

En cuanto a la productividad, el 30% de la energía de MHP se utiliza con fines productivos, según el registro histórico de generación y las encuestas de demanda realizadas en las comunidades. Las comunidades de Kavanayén, Kamarata, Arautamerú y La Ciudadela se dedican principalmente al turismo y el alojamiento, por lo que la electrificación ha sido fundamental para proporcionar servicios de mayor calidad a los turistas. En particular, el ecoturismo ha aumentado con actividades de bajo impacto ambiental que permiten a la población salvaguardar su entorno natural y cultural. En Canaima, el suministro de electricidad ha permitido el establecimiento de pequeñas empresas con internet o servicios de lavandería (administrados por mujeres) que han elevado significativamente los niveles de ingresos de la comunidad. Las pequeñas empresas que venden alimentos, agua y refrescos han proliferado, y muchas posadas ofrecen servicios de internet y wi-fi, facilitando el pago con tarjetas de crédito y débito. Además, la ESC ha llevado a cabo trabajos de reparación en las carreteras que conectan pueblos como Kavanayén y Wonken con las comunidades cercanas, promoviendo oportunidades para la comercialización de productos locales y un acceso más fácil para los turistas. Además, la incorporación de técnicas para la conservación y gestión de los recursos naturales ha traído un aumento en la productividad de la tierra. La cría de ganado también fue introducida y muy bien recibida por los nativos, ya que representa una fuente variada de alimentos cuyo excedente se vende ocasionalmente. De hecho, desde el comienzo de las misiones católicas, la población indígena ha aprendido a mejorar su capacidad de siembra en conucos, una pequeña parcela de tierra

dedicada a frutas menores, casi sin riego. En Kamarata, destacan proyectos de organizaciones no gubernamentales como un centro agroproductivo para sembrar verduras, legumbres y plantas, que generalmente no se cosechan en conucos. En San Ignacio de Yuruaní, se construyó una gran granja, utilizando riego con bombas eléctricas, y la población obtiene ganancias de la venta de productos agrícolas. La refrigeración también ha ayudado a los pescadores locales a aumentar sus ganancias, ya que pueden almacenar pescado por períodos más largos antes de que se venda a restaurantes y posadas. La mejora en los niveles de ingresos garantiza recursos económicos para el mantenimiento y la autogestión.

Figura 52 Centro de salud en San Francisco de Yuruaní y antena de telecomunicaciones para internet

Dimensión Institucional

En cuanto a la alineación institucional, el programa Mayú ("trabajo conjunto" en lengua pemón) reunió los esfuerzos de EDELCA, el Gobierno Nacional, el Gobierno del estado de Bolívar, el Municipio de La Gran Sabana y las Organizaciones Comunitarias. Se han lanzado varias iniciativas paralelas que promueven y fortalecen el desarrollo integral de la población haciendo un uso eficiente de la electricidad respetando el medio ambiente local. Por ejemplo, en Arautamerú, los centros comunitarios han sido instruidos con talleres y cursos de capacitación sobre el manejo, el uso productivo y sostenible de los recursos naturales. A través de esta capacitación, se han

incorporado tecnologías amigables con el medio ambiente para fortalecer los procesos productivos tradicionales de la población indígena. Las entrevistas y encuestas han demostrado que la satisfacción de los usuarios está directamente relacionada con el modelo de gestión implementado. Por lo tanto, la dimensión institucional, a través de la alineación apropiada de las instituciones involucradas en la electrificación rural, es el tema clave para la sostenibilidad de los proyectos en términos de mejorar el impacto y los resultados de las dimensiones ambiental, técnica y socioeconómica.

Desde la perspectiva de la dimensión ambiental, la alineación institucional entre compañías eléctricas, gobiernos locales, comunidades indígenas, misiones religiosas y otros agentes ha sido motivada por la necesaria y estratégica conservación de la cuenca del río Caroní. Este río tiene una importancia estratégica a nivel nacional y regional, dada su riqueza en biodiversidad, el potencial para el turismo y el suministro de más del 60% de la electricidad venezolana, a través de las grandes centrales hidroeléctricas del sur del país. En consecuencia, los promotores de electrificación han trabajado juntos para promover el desarrollo sostenible en las comunidades indígenas.

En términos de la dimensión técnica, la alineación institucional se ha canalizado para mejorar progresivamente la tecnología de las MHP, de modo que se adapte mejor a las condiciones locales. Esto minimiza las emisiones de CO_2 y el impacto en los ecosistemas locales, mientras se maximiza la confiabilidad. En este sentido, el hito más exitoso es el desarrollo de turbinas adaptadas a las características regionales. A partir de la experiencia de los dos primeros proyectos, EDELCA desarrolló las turbinas Banki-Edelca, que posteriormente se mejoraron continuamente hasta la tercera generación para los proyectos. La alineación institucional permitió a las Misiones Religiosas y las Organizaciones Comunitarias proporcionar el conocimiento técnico de experiencias anteriores, así como los requisitos sociales y ambientales. EDELCA pudo proporcionar recursos técnicos para el desarrollo y la mejora de turbinas y los gobiernos nacional, local y regional podrían proporcionar un mercado nacional para esta tecnología, asegurando así que el esfuerzo no se invierta en un solo proyecto sino en una sucesión de proyectos dentro de un programa de electrificación rural amplio. Esto se ve corroborado por el bajo impacto visual y la no intervención en ecosistemas frágiles, particularmente en los proyectos posteriores, así como por una gran mayoría de usuarios satisfechos con el servicio eléctrico.

En términos de la dimensión socioeconómica, la alineación institucional ha resultado en el uso de electricidad para responder a las necesidades específicas de la población. Por lo tanto, el acceso a nuevas tecnologías y materiales (como las computadoras portátiles) ha mejorado los niveles de educación. La mejora de las condiciones de salud (como los alimentos refrigerados) no solo ayuda a la población local, sino que también atrae a nuevos turistas e ingresos posteriores. Además, se han lanzado algunos programas para aumentar los ingresos mediante la implementación de nuevas técnicas agrícolas y de fabricación o la mejora de los productos turísticos (como wi-fi) que tienen un impacto positivo en los ingresos de la comunidad. Todo esto lleva a las diferencias observadas entre los casos investigados y otras comunidades indígenas electrificadas a través de la red nacional, donde la falta de coordinación entre las instituciones ha limitado el desarrollo integral de la población. Históricamente, en Venezuela, la tarifa eléctrica ha sido muy baja e incluso más baja en los últimos 20 años. Según el consumo diario promedio en las comunidades indígenas visitadas, la carga mensual de la factura de electricidad apenas alcanza el 2% de los ingresos familiares.

A lo largo de los años, se ha observado un reordenamiento gradual de las partes interesadas, que afecta la organización del modelo de gestión. En cualquier caso, los proyectos de electrificación se han mantenido exitosos y los cambios han tratado de garantizar su operación y mantenimiento a lo largo del tiempo. Por lo tanto, la dimensión institucional de la sostenibilidad en los casos investigados es positiva. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que algunos usuarios mencionan un deterioro en el servicio de electricidad desde 2014, coincidiendo con una crisis nacional y las dificultades de los gobiernos nacionales y regionales que apoyan el programa. Esto refuerza la idea de la necesidad de una alineación institucional adecuada para lograr la sostenibilidad global de los proyectos de MHP.

Lecciones aprendidas en los proyectos con micro centrales hidroeléctricas en Venezuela

Aunque las micro centrales hidroeléctricas (MHP) generalmente se consideran una opción adecuada para la electrificación rural en comunidades remotas, faltan evaluaciones empíricas de sostenibilidad para evaluar el desempeño a largo plazo de los proyectos. En este capítulo, se evalúa la sostenibilidad de 6 MHP en comunidades indígenas ubicadas en La Gran

Sabana (estado Bolívar, Venezuela) después de 20 a 60 años de operación continua. Los misioneros capuchinos iniciaron tres proyectos (Kavanayén, Kamarata y Wonken), mientras que los otros tres (Arautamerú, La Ciudadela y Canaima) fueron desarrollados por la compañía eléctrica venezolana EDELCA, basada en turbinas Banki. Para la evaluación, se consideran cuatro dimensiones de sostenibilidad: ambiental, técnica, socioeconómica e institucional. Los criterios e indicadores se definen para cada dimensión para evaluar diferentes aspectos del impacto de los proyectos de MHP, que se evalúan utilizando información de bases de datos de registros históricos, encuestas de usuarios, visitas técnicas y entrevistas estructuradas con técnicos, ingenieros y beneficiarios.

Los resultados muestran la relevancia de la dimensión institucional y una política de electrificación sostenible a largo plazo, a través de una alineación adecuada entre las instituciones involucradas en la electrificación rural, en el fortalecimiento de la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos de electrificación revisados. Por lo tanto, la colaboración entre las instituciones nacionales, regionales y locales ha llevado a la mejora progresiva de MHP con el fin de minimizar el impacto en los ecosistemas y mitigar las emisiones. Esto incluso podría mejorarse invirtiendo en sistemas de respaldo basados en tecnologías renovables (RET), para reforzar la dimensión ambiental de la sostenibilidad. Además, los esfuerzos de las partes interesadas han favorecido el desarrollo y la mejora de las turbinas adaptadas, respondiendo a las necesidades locales de manera adecuada y confiable y consolidando la dimensión técnica de la sostenibilidad. Finalmente, el lanzamiento de programas paralelos para hacer un uso racional y eficiente de la electricidad ha ayudado a apoyar la educación, la salud y las condiciones productivas de la población, mejorando la dimensión socioeconómica de la sostenibilidad. Los cambios sucesivos en la alineación institucional son una evidencia de la importancia de la dimensión institucional a lo largo de la vida útil de los proyectos. En este capítulo se identificaron cuestiones clave que los tomadores de decisiones deben tener en cuenta en futuros proyectos de electrificación rural. La experiencia venezolana proporciona elementos para la promoción y el desarrollo de más y mejores programas de electrificación rural basados en MHP, considerando la experiencia adquirida y las lecciones aprendidas de proyectos con datos históricos a largo plazo, en entornos con características y limitaciones similares en los países en desarrollo de América del Sur, Asia o África.

SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS DOMÉSTICOS

Este capítulo se centra en los sistemas solares fotovoltaicos instalados por el programa "Sembrando Luz", lanzado en 2005 y desarrollado por la Fundación para el Desarrollo del Servicio de Electricidad (Fundelec). Entre 2005 y 2013, el programa benefició a casi 142.000 personas distribuidas en 900 comunidades rurales, lo que representa el 7% de las nuevas conexiones eléctricas rurales en Venezuela, durante ese período. El programa implementó sistemas solares fotovoltaicos en tres fases bien diferenciadas. La primera de ellas se refiere a la electrificación de infraestructuras comunitarias como escuelas, ambulatorios, puestos policías, militares, casas comunales, comedores rurales, entre otros. En la segunda fase se avanzó en la electrificación directa de las viviendas rurales casa por casa, en comunidades indígenas y fronterizas, principalmente. Paralelamente a ambas fases, se fueron instalando sistemas fotovoltaicos para la energización de plantas de desalinización y potabilización de agua a partir de fuentes subterráneas en zonas rurales aisladas del país. El programa ha sido particularmente importante entre la población indígena en Venezuela, que es una pequeña minoría ubicada generalmente en asentamientos rurales dispersos con bajo acceso a servicios de educación, salud e información, que influyen negativamente en su desarrollo socioeconómico. De hecho, la población indígena en las zonas rurales de Venezuela se ha establecido históricamente en asentamientos dispersos, que viven en pequeñas chozas ("ranchos"), como consecuencia de su estilo de vida seminómada. En promedio, hay 6 personas por vivienda rural sin electrificar en Venezuela, con necesidades energéticas muy limitadas, de acuerdo con sus costumbres y hábitos tradicionales. Por lo tanto, la electrificación fuera de la red basada en energía solar fotovoltaica es particularmente relevante y resulta ser suficiente para esta población particular.

Tabla 38 Total de sistemas Fotovoltaicos instalados en infraestructuras y viviendas

Tipo de Sistema	Cantidad Instalada	Capacidad (kWp)
SFV-300	445	133,5
SFV-600	1726	1035,6
SFV-1200	810	972
SFV-3840	40	153,6
Total	**3021**	**2294,7**

Sistemas Solares Fotovoltaicos Domésticos Comunitarios

A partir del año 2005 se inició el programa con la instalación de 938 sistemas fotovoltaicos domésticos comunitarios, con una capacidad de generación pico de 1.200 Wp y de 3840 Wp (SFV-1200 y SFV-3840). Estos sistemas fueron utilizados para la electrificación de escuelas, comedores, ambulatorios, casas comunales, centros comunitarios de acceso a internet y telecomunicaciones, puestos fronterizos y otros objetivos sociales, en comunidades aisladas, indígenas y fronterizas del país. Estos SFV beneficiaron en esta primera etapa a más de 500 comunidades y cerca de 130 mil habitantes (Tabla 39), quienes aún en la actualidad cuentan con un servicio eléctrico confiable y continuo en infraestructuras de educación, salud, y desarrollo social.

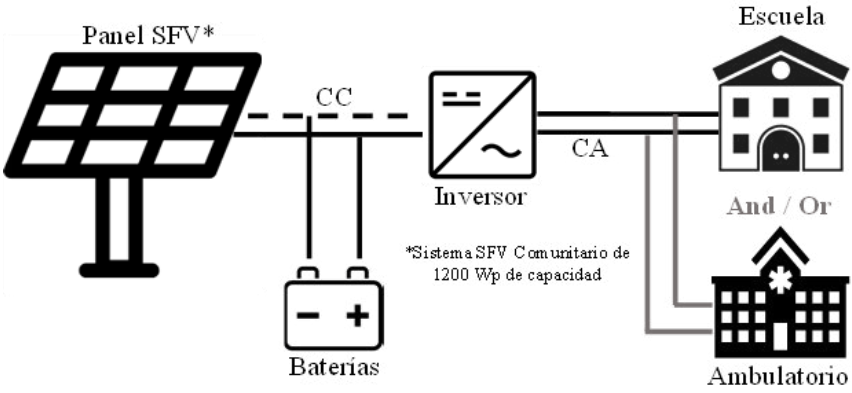


Figura 53 Arquitectura de los sistemas solares fotovoltaicos domésticos comunitarios instalados en Venezuela por el programa "Sembrando Luz"

Figura 54 Sistema solar fotovoltaico doméstico comunitario instalado por el programa "Sembrando Luz" en la comunidad rural indígena Pemón de San Rafael de Kamoirán, en La Gran Sabana, Estado Bolivar.

Sistemas Solares Fotovoltaicos Domésticos Individuales

La segunda fase en la electrificación rural sostenible de Venezuela se ha basado en la implantación de Sistemas Solares Fotovoltaicos Domésticos Individuales de una capacidad pico de 300 Wp y 600 Wp (SFV-300 y SFV-600). En esta segunda fase, en su primer despliegue, se atendieron unos 10 mil habitantes, distribuidos en más de 100 comunidades. Esta fase sigue en desarrollo actualmente.

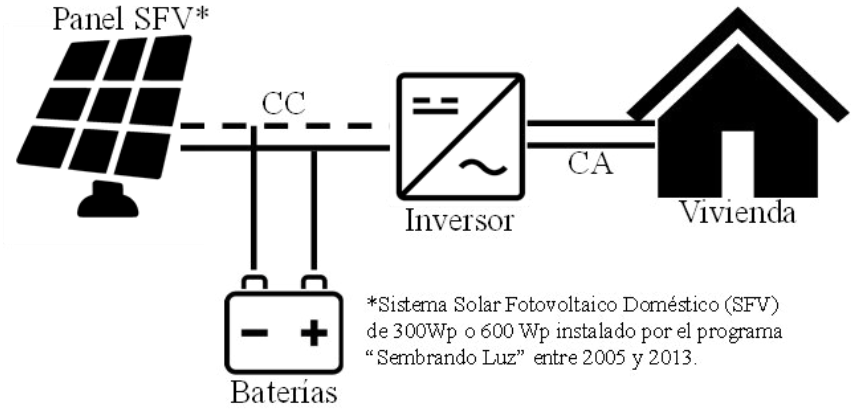


Figura 55 Arquitectura de los sistemas solares fotovoltaicos domésticos individuales instalados en Venezuela por el programa "Sembrando Luz"

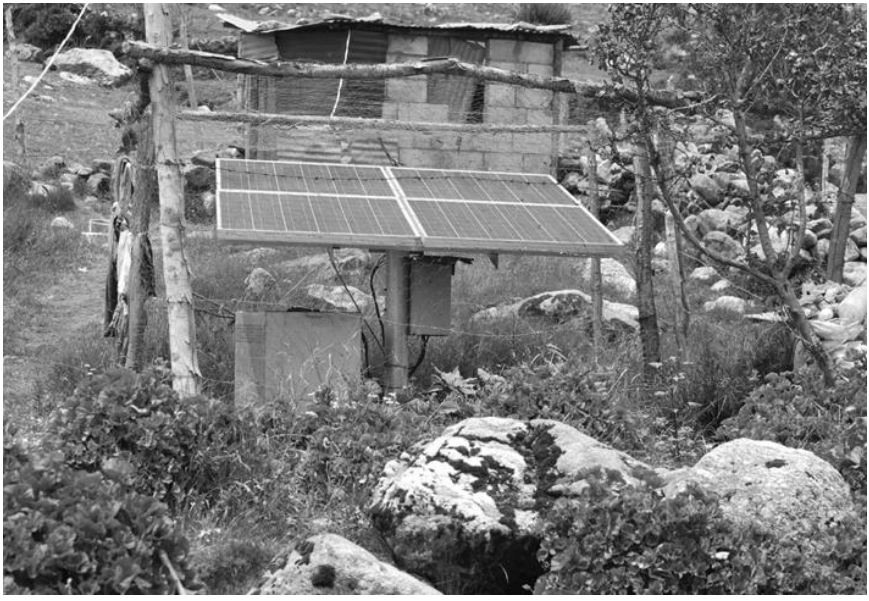


Figura 56 Sistema solar fotovoltaico doméstico individual en la comunidad de "Las González", Estado Mérida.

Figura 57 Sistema solar fotovoltaico doméstico individual en la comunidad de "San Isidro", Estado Mérida.

Tabla 39 Sistemas Fotovoltaicos Domésticos instalados, por año, en infraestructuras comunitarias (objetos sociales) y viviendas individuales

Objeto Social	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Total
Viviendas	0	0	0	0	576	619	632	72	53	1.899
Escuelas	11	35	359	49	2	14	78	16	6	564
Ambulatorios	1	19	107	13	7	9	30	8	0	194
Casas Comunales	1	5	61	7	0	3	14	2	0	93
Comedores	0	7	45	8	0	3	4	1	0	68
Puesto Militar	0	0	11	3	10	1	10	18	6	53
Uso Compartido	0	0	35	105	43	28	28	47	0	286
Equipos de Reserva en Comunidades	4	2	46	4	8	11	19	22	0	116
Total Objeto Social	17	68	664	189	646	688	815	186	65	3273
Población Beneficiada Anualmente	1893	13327	80050	32116	26504	14419	10660	22954	390	202313
Población Beneficiada Acumulada	1893	15220	95270	127386	153890	168309	178969	201923	202313	

Sistemas de Potabilización y Desalinización de Agua

Su finalidad es mejorar las condiciones de acceso al servicio de agua potable y hasta el 2013 se habían instalado 162 sistemas de potabilización y 54 sistemas desalinizadores de agua alimentados por sistemas SFV-1200, en comunidades rurales aisladas, indígenas y fronterizas del país. La tecnología utilizada, hasta ahora, tiene capacidad de potabilizar 800 litros por hora (lts/hr) y puede extraer agua en pozos con una profundidad máxima de 18 metros. Esta producción está limitada a 8.000 litros diarios ya que la bomba de succión de agua es energizada por el panel solar fotovoltaico que permite, en promedio, unas diez horas diarias de trabajo al sistema, en conjunto. En lo concerniente a las plantas desalinizadoras, pueden producir entre 140 y 180 litros por hora (140-180 lts / hr) en función de la salinidad del agua de entrada. Esta unidad tiene los mismos condicionantes de la potabilizadora, en cuanto a la bomba de succión y su alimentación del módulo solar fotovoltaico.

Tabla 40 Sistemas de bombeo, potabilización y desalinización de agua instalados

Tipo de Sistema	Cantidad Instalada	Capacidad (kWp)
Bombeo	78	81,9
Potabilizadoras	162	194,4
Desalinizadoras	54	64,8
Total	**294**	**341,1**

El programa tiene como objetivo llegar a 1 millón de personas en aldeas rurales pobladas entre 200-800 personas. Además, existe en Venezuela un programa de plantas de tratamiento de agua con moto-generadores diésel. Si bien el programa de plantas de desalinización energizadas con sistemas diésel se limita al área estrictamente costera, un sistema basado en módulos solares fotovoltaicos va desde las áreas costeras (regiones naturales de Costa, Delta y Falcón) a las regiones naturales de Llanos, Guayana, Maracaibo y Andes. En las áreas rurales de las regiones del norte de Zulia, Falcón y la región de la costa, 1 kWp de capacidad instalada puede producir hasta 5,2 kWh / kWp, diariamente. Estas son las áreas con la menor precipitación y la mayor escasez de agua superficial, donde se observa que el promedio anual de precipitación en estas áreas rurales es inferior a 400 mm. Por lo tanto, es allí donde el uso de energía solar fotovoltaica para el aprovechamiento del agua subterránea es relevante. Por otro lado, el área central de la región natural de los Llanos y la mayor parte de la región del Delta del Orinoco, tienen una buena productividad solar entre 4,4 y 4,0 kWh / kWp, respectivamente. Esta

condición es también favorable para el uso de energía solar fotovoltaica en la producción de agua desalinizada y potable a partir de reservas subterráneas.

Figura 58 (A) Módulo solar fotovoltaico de 1200 Wp y tanque de almacenamiento de agua y (B) Baterías y planta de tratamiento de agua, en la comunidad rural de Santa Cruz e Mapaurí en La Gran Sabana (Estado Bolívar)

Descripción técnico-económica de los elementos de los sistemas solares fotovoltaicos en Venezuela

En la tabla 41, se muestran los elementos que componen los sistemas solares fotovoltaicos instalados en Venezuela con su descripción y técnica y costos específicos. En este sentido, vemos que los costos de inversión van desde 812 $ por un sistema de 300 Wp hasta 11468 $ por un sistema de 3840 Wp. Hay que destacar que la ser estos costos suficientes para abastecer de energía a las instalaciones asociadas a los mismos, la comparación no se puede hacer directamente con lo que serían los costos de un instalación eléctrica con conexión a la red. En este ultimo caso, habría que tener en cuenta el costo de extender líneas de distribución por más de 20 kilómetros, lo que al final viene a ser mucho más costoso y más aún si se considera la dificultad de acceso en las zonas rurales más apartadas de Venezuela.

Tabla 41 Datos técnico-económicos de todas las arquitecturas solares fotovoltaicas instaladas en Venezuela por el programa "Sembrando Luz"

Tipo de Sistema	Módulos Solares			Baterías			Regulador / Inversor			Costos	
	Modelo	Capacidad (Wp)	Costo ($)	Modelo	Capacidad (A-h)	Costo ($)	Modelo	Cantidad	Costo ($)	Total ($)	Especifico ($/Wp)
300 Wp	Isofoton IS-170/12	2 x 170	326	Hoppecke 6 OPzS 300	2 x 300	353	Victron Energy Phoenix Inverter 24V 375VA	1	133	**812**	**2,4**
600 Wp	Numen DSM 160/12	4 x 160	651	Hoppecke 6 OPzS 300	4 x 300	705	Victron Energy Phoenix Inverter 24V 750VA	1	388,5	**1745**	**2,7**
1200 Wp	Isofotón I-150S/12	8 x 150	1176	Hoppecke 7 OPzS 490	12 x 490	2767	Steca Solarix PI 1100 W	1	829,038	**4772**	**4**
3840 Wp	Isofoton IS-170/12	24 x 170	4150	Hoppecke 7 OPzS 490	24 x 490	5534	Steca Solarix PI SET 3300 W	1	1783,95	**11468**	**2,8**

La importancia de las Baterías (Sistema de Almacenamiento de Energía)

En Venezuela, la mayor cantidad de fallas e indisponibilidad de los sistemas solares fotovoltaicos instalados se debe a las baterías. Esto es consecuencia de una dificultad para ejecutar oportunamente los mantenimientos a las baterías, lo que conduce a una disminución en su capacidad de almacenamiento de energía y una reducción de la vida útil. Todas las baterías utilizadas en Venezuela para sistemas basados en energías renovables son del

tipo batería ventilada de plomo-ácido, placa tubular y de ciclo profundo. Son económicas en comparación con las tecnologías más nuevas por lo que las baterías de plomo-ácido se usan ampliamente en todo tipo de aplicaciones a nivel mundial. Las ventas de baterías de plomo-ácido podrían representar entre el 40 y el 45% del valor de las baterías vendidas en todo el mundo (excluyendo China y Rusia), lo que equivale a un valor de mercado de fabricación de aproximadamente $ 15 mil millones. Los diseños de plomo-ácido de gran formato se usan ampliamente para el almacenamiento en fuentes de alimentación de respaldo en torres de teléfonos celulares, configuraciones de alta disponibilidad como hospitales y sistemas fuera de red (off-grid) con energías renovables. Para estos roles, pueden usarse versiones modificadas de la celda estándar para mejorar los tiempos de almacenamiento y reducir los requisitos de mantenimiento.

Figura 59 Sistema de almacenamiento de energía en baterías de plomo-acido con una capacidad de 12 x 490 A-h con baterías 7 OPzS del fabricante Tudor para un SFV de 1200 Wp

La *capacidad* de una batería (Capacity, en inglés), medida en amperios-hora (A-h), se define como la cantidad de energía que se puede extraer a partir de un estado completamente cargado. Pero la capacidad de una batería depende de la velocidad a la que se extrae energía de ella. Cuanto mayor es la corriente de

descarga, mayor es la velocidad de descarga y menor es la capacidad. Se puede crear una curva de capacidad midiendo la capacidad de una batería a varias corrientes de descarga constantes diferentes. Por otro lado, hay una cantidad fija de energía que puede pasar por una batería antes de que sea necesario reemplazarla, que además está relacionado con los ciclos de descarga hasta fallar. A este factor se le denomina *rendimiento de por vida* (lifetime trhoughput, en inglés) que es la cantidad total de energía que puede circular a través de la batería antes de que necesite reemplazo. Este factor es el que se utiliza para calcular la vida útil del banco de baterías y el costo de desgaste de la batería. Por otro lado, la vida útil de una batería se define a partir de la cantidad de *ciclos de descarga hasta fallar* (Cycles to failure, en inglés).

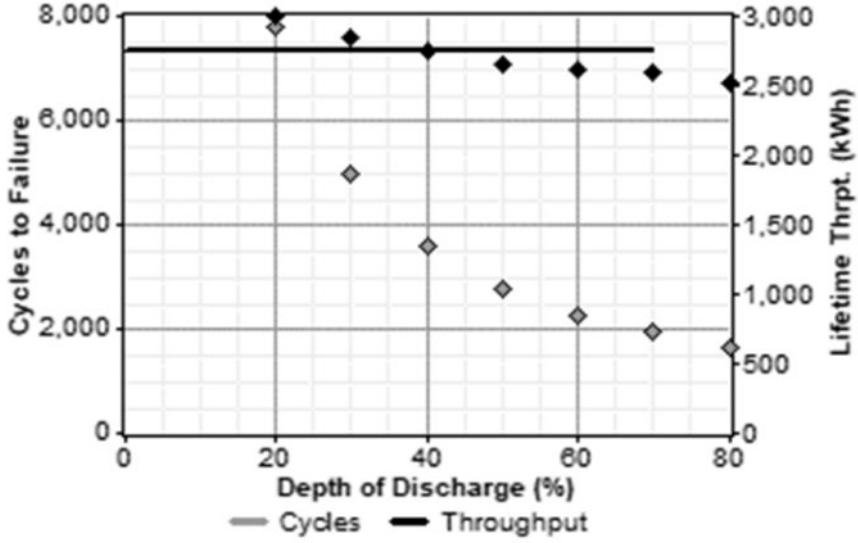


Figura 60 Curva de vida útil de una batería Hoppecke 8 OPzS de 800 A-h de capacidad, típicamente utilizada en Venezuela para algunos de los sistemas solares fotovoltaicos.

La curva de vida útil de la batería se muestra en la figura 60. El conjunto de puntos resultante se traza como diamantes negros en la curva de por vida, luego se calcula el valor sugerido del rendimiento de por vida promediando los valores del rendimiento de por vida en el rango permitido de profundidad de descarga (línea). Este rango permitido está determinado por el estado mínimo de carga, si el estado mínimo de carga es del 40%, entonces la batería

solo experimentará profundidades de descarga entre 0% y 60%. La línea negra horizontal en el gráfico muestra el valor del rendimiento de por vida promediado. La profundidad de descarga es definida por el regulador del sistema fotovoltaico y determinará la vida útil de las baterías.

Lecciones aprendidas en el programa "Sembrando Luz"

Con respecto al diseño del programa, los resultados finales muestran consistencia entre los resultados y los objetivos concebidos de acuerdo con las indicaciones del marco legal venezolano, lo que se demuestra especialmente por las mejoras en las condiciones de educación y salud. En este sentido, la alineación institucional ha sido positiva, entre 2005 y 2013. Con respecto a la dimensión ambiental, se puede observar cómo se ha priorizado la instalación de instalaciones basadas en RET en comunidades ubicadas en ecosistemas frágiles. La priorización ha sido efectiva, ya que los sistemas de electrificación implementados han promovido un cambio tecnológico, incentivando a los usuarios a dejar de utilizar generadores diésel domésticos. Para lograr este cambio, el diseño adecuado de las instalaciones basadas en RET ha sido fundamental, tanto por exceder los umbrales mínimos estimados globalmente como por su adecuación a los requisitos de energía de la población local, como se demostró con las encuestas que se realizaron a los usuarios. Finalmente, las fases del programa cuando se trata de comunidades y casas con diferentes necesidades responden a un diseño con el objetivo de priorizar la educación y la salud y luego proporcionar mayores niveles de acceso a la energía, mejorando así la equidad energética en las áreas más pobres. Esto ha sido posible gracias a un diseño, específicamente venezolano, que basa la sostenibilidad económica en el ahorro de combustibles fósiles.

En cuanto a los resultados intermedios de la implementación del programa "Sembrando Luz", se han encontrado grandes necesidades de mejora. Los dos elementos que requieren mayor atención para garantizar la sostenibilidad a mediano y largo plazo son: el modelo de gestión y la alineación institucional. Como se mencionó anteriormente, ambos elementos están directamente vinculados a otros objetivos y resultados del programa. Por lo tanto, su mejora tendrá un impacto muy positivo en otros indicadores y criterios que

deben mejorarse. Las tarifas de electricidad que se cobran a los usuarios de sistemas fotovoltaicos, aunque son asequibles, no son económicamente sostenibles a largo plazo, ya que las comunidades dependen de subsidios gubernamentales para las actividades de mantenimiento. Aunque a corto plazo los sistemas de electrificación han estado operativos (en promedio durante 5 años), este modelo debe mejorarse para garantizar la sostenibilidad a mediano y largo plazo. Sin embargo, la asequibilidad y sostenibilidad financiera a mediano y largo plazo son igualmente importantes en el marco del conjunto propuesto de dimensiones para la evaluación del desarrollo sostenible en los programas de electrificación rural, que han sido poco considerados en Venezuela. La implementación en fases progresivas ha sido positiva, ya que el cambio tecnológico se ha introducido gradualmente, lo cual es fundamental en las comunidades ubicadas en ecosistemas frágiles.

Con respecto a los resultados finales de la implementación del programa, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es probablemente el resultado positivo más notable. La satisfacción de los usuarios finales está motivada por que los beneficiarios pueden cumplir con sus requisitos de energía, promoviendo así la equidad energética, que es el resultado final directamente relacionado con el objetivo del programa. Sin embargo, hay elementos importantes para mejorar en términos de resultados finales. Por ejemplo, la confiabilidad de las instalaciones basadas en RET está influenciada por el desarrollo apropiado de las actividades de mantenimiento, además de la adecuación del sistema. En este sentido, la confiabilidad está relacionada con el modelo de gestión y la alineación institucional, que solo muestran resultados satisfactorios en los resultados intermedios de la implementación del programa. Simultáneamente, la dimensión socioeconómica es la más compleja, ya que las mejoras sociales significativas son evidentes, mientras que los aspectos económicos aún deben mejorarse en la mayoría de las comunidades beneficiadas. De hecho, se ha observado un desarrollo desigual de la productividad, directamente relacionado con el estado socioeconómico previo de cada comunidad rural. Este aspecto debería haberse considerado en el diseño del programa o, de lo contrario, durante la implementación para lo cual las limitaciones en la alineación institucional han sido una desventaja. De hecho, donde ocurrió la participación coordinada de varias instituciones, se otorgaron microcréditos a los usuarios finales para mejorar los niveles de productividad de forma positiva. Del mismo modo, la

sostenibilidad económica del programa “Sembrando Luz” se ve amenazada por estas fallas en la alineación institucional, ya que los beneficios del ahorro de combustibles fósiles no tienen un impacto en la mejora del mantenimiento del sistema. Finalmente, los resultados muestran cómo expandir el acceso a la electrificación se está volviendo cada vez más complicado, ya que las casas restantes sin electricidad están progresivamente más dispersas. En tales áreas, solo se pueden utilizar instalaciones basadas en RET, por lo que se debe aumentar la participación de tecnologías renovables en la matriz energética venezolana.

Por lo general, la implementación de un programa de electrificación rural utilizando proyectos fuera de la red basados en RET se considera cuando los costos iniciales son más bajos que la extensión de la red. Sin embargo, a través de una comparación de los resultados obtenidos de la aplicación de metodología propuesta en el programa "Sembrando Luz", en Venezuela, se obtienen algunos resultados intermedios útiles para comparar las cuatro dimensiones de la sostenibilidad entre ambas estrategias en Venezuela: ambiental, institucional (financiera) y técnica. y socioeconómica.

Los aspectos ambientales y financieros corresponden a las dimensiones ambientales e institucionales. Para comparar el programa Sembrando Luz y la extensión de la red en términos de ambas dimensiones, se analizan dos factores clave: el costo de la energía (COE, $ / kWh, por sus siglas en inglés) y los factores de emisión (Kg CO2-eq / kWhe), que son ampliamente utilizados en todo el mundo al comparar proyectos de electrificación rural. Ambos indicadores se calculan a partir de simulaciones de software. Se obtiene un factor de emisión de 0,006 y 0,267 Kg CO2-eq / kWhe para Microrredes Rurales Híbridas bajo operación normal y una condición de falla (N-1). El COE también se determina a partir de los resultados de software: 1,605, 0,273 y 3,336 $ / kWh para Sistemas Solares Fotovoltaicos y Microrredes y Aerogeneradores de Baja Potencia (ABP), respectivamente. Las estimaciones de COE incluyen los costos de oportunidad de consumo de combustible, ya que Venezuela es un país que exporta productos refinados y cada unidad energética ahorrada puede ser exportada en forma de combustibles fósiles. Cabe destacar que la condición de productor de petróleo de Venezuela permite una amplia generación basada en combustible a bajo costo, utilizando productos refinados nacionales de las refinerías

venezolanas. Sin embargo, su alto costo de oportunidad hace que la electrificación rural basada en RET sea económicamente viable en Venezuela.

El factor de emisión se determina a partir de la matriz energética del noroeste de Venezuela, donde la participación de los combustibles fósiles es casi el 50% del total de la electricidad generada. Aunque en general la generación hidroeléctrica es de alrededor del 65% en Venezuela, en la región noroeste de Venezuela solo el 50% de la electricidad proviene de la fuente hidroeléctrica, debido a la distancia de 1.100 km de las grandes centrales hidroeléctricas. En esta región, la generación termoeléctrica representa el 50% del suministro, por lo que el factor de emisión es significativamente alto y las tecnologías basadas en RET se convierten comparativamente en una opción de emisiones extremadamente bajas que implica una reducción global neta de las emisiones de gases de efecto invernadero en la región. Además, las centrales termoeléctricas de los estados nor-occidentales funcionan con diésel proveniente de refinerías venezolanas ubicadas en los estados de Falcón y Zulia. Tanto los problemas ambientales como financieros (institucionales) están influenciados por esta situación particular en la que el COE de la extensión de la red convencional es casi tan alto como el de una Microrred Rural Híbrida. En consecuencia, la electrificación rural basada en RET en países productores de petróleo, como Venezuela, alcanza niveles competitivos al considerar el costo de oportunidad causado al consumir combustible en lugar de venderlo al mercado internacional.

Con respecto a la dimensión técnica, la confiabilidad es un tema clave para comparar proyectos basados en RET y la extensión de red convencional; y particularmente el tiempo medio entre fallas (MTBF, por sus siglas en inglés) y el tiempo medio para reparar (MTTR, por sus siglas en inglés). Cabe señalar que las redes de distribución rural son generalmente largas y mal mantenidas, por lo que las frecuencias y tasa de fallas son altas y el MTTR muy prolongado. En los proyectos basados en RET, estos valores pueden variar entre las áreas rurales, pero según las encuestas realizadas en casas electrificadas y el tamaño de los proyectos, tanto MTBF como MTTR son más bajos que para las comunidades vecinas electrificadas a través de la extensión de la red. Con respecto a la dimensión socioeconómica, el impacto en la educación y la salud es mayor en las comunidades basadas en RET que en las de extensión de red convencionales. Esto se debe a que las

comunidades electrificadas RET generalmente tienen una línea de base de desarrollo más baja que las de extensión de la red. De hecho, los asentamientos rurales alcanzados a través de tecnologías basadas en RET tienen menos de 40 (o incluso 20) casas y corresponden a comunidades indígenas o fronterizas donde no se extendieron los usos de electricidad previamente. En contraste, las comunidades beneficiadas con la red generalmente tienen más de 40 casas, y la mayoría de ellas tenían sistemas diésel domésticos previamente.

SISTEMAS EÓLICOS DOMÉSTICOS

Las tecnologías de energías renovables (RET, por sus siglas en inglés) más extendidas para la electrificación rural fuera de la red son la energía solar fotovoltaica (FV), eólica e hidroeléctrica. Aunque los parques eólicos se usan más que la energía solar fotovoltaica y otras RET en proyectos conectados a la red, la energía solar fotovoltaica es mucho más predominante en los sistemas fuera de la red. Sin embargo, algunos inversores públicos y privados aún no se sienten totalmente cómodos con las pequeñas turbinas eólicas (SWT), principalmente debido a la falta de conciencia de los factores topográficos y climáticos que influyen directamente en su rendimiento, eficiencia y producción anual de energía (AEP, por sus siglas en inglés). Además, muchos promotores de proyectos SWT simplifican la evaluación del viento con mediciones a corto plazo, extrapolaciones indirectas y estimaciones promedio mensuales o anuales, porque las mediciones anuales a largo plazo en el sitio a menudo son poco prácticas, lentas y prohibitivas debido a su alto costo, excesivamente alto para proyectos fuera de la red. Por lo tanto, las estimaciones de AEP se basan en la potencia de salida promedio, que puede ser extremadamente inexacta.

Para aumentar el uso de pequeños proyectos con energía eólica doméstica, se deben analizar los proyectos reales de electrificación rural con SWT, determinando los factores que pueden contribuir a superar las barreras técnicas en áreas tropicales remotas. Se ha publicado muy poca investigación sobre evaluaciones *in situ* de proyectos de electrificación rural. Se han realizado algunas evaluaciones en diferentes países, aunque solo a escala regional en China, India, Nueva Zelanda o en Brasil. Por el contrario, se han dedicado menos estudios al análisis específico de aerogeneradores a pequeña escala varios años después de su implementación en condiciones climáticas extremas en latitudes tropicales (temperaturas altas o bajas permanentes durante todo el año, que son similares en todos los países tropicales, ya que básicamente depende de la altitud y no tanto de la estacionalidad). En este contexto, el objetivo de este capítulo es comprender el suministro de electricidad con SWT fuera de la red en condiciones climáticas extremas dentro de Venezuela.

Esta investigación se enfoca en el desempeño técnico y la evaluación de aceptación de los usuarios finales de los sistemas SWT instalados en dos comunidades rurales de Venezuela donde la altitud y las condiciones climáticas son completamente diferentes: La Macolla, con un clima desértico cálido, en la costa del Caribe y Los Conejos , con un clima de invierno seco, en las montañas andinas a 3.500 msnm El objetivo específico es identificar cómo estas condiciones influyen en el perfil de carga diaria y la generación de electricidad de SWT, de acuerdo con la variabilidad horaria y estacional del recurso eólico. El rendimiento técnico se evalúa a través de un software especializado, que incluye un análisis de la demanda de electricidad y el recurso eólico a partir de series de tiempo modeladas por hora. La aceptación de los usuarios se examina mediante visitas técnicas, donde se realizan encuestas y entrevistas semiestructuradas con los beneficiarios. Los resultados pueden ser útiles para la mejora de los proyectos SWT en Venezuela, donde se necesitan 1.159 sistemas para casas rurales fuera de la red, así como en todos los países tropicales en desarrollo.

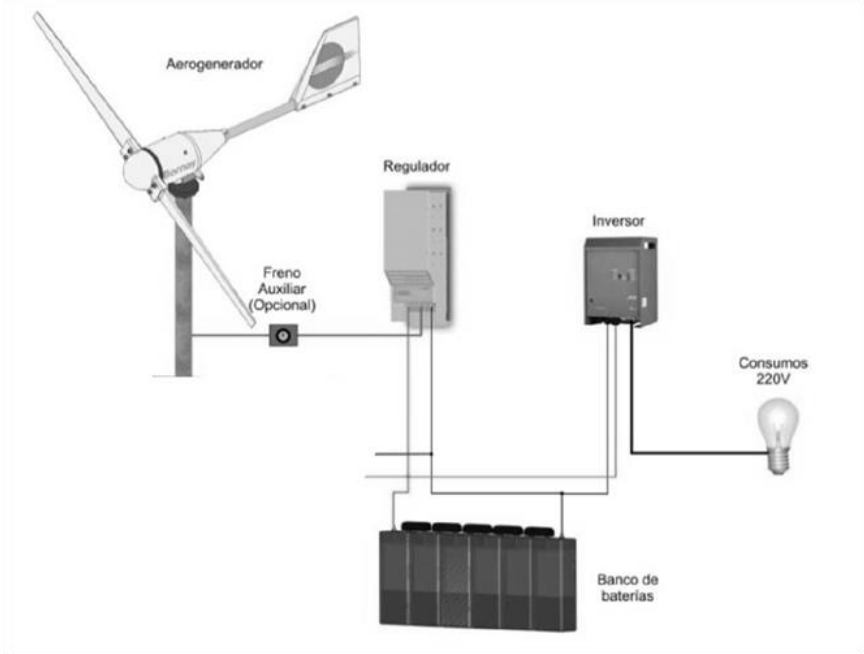


Figura 61 Configuración típica de un sistema eólico doméstico en Venezuela

A pesar de su condición tropical, Venezuela no es uniformemente cálida

debido a la variabilidad de su orografía. Hay climas glaciales en los Andes, a casi 5.000 m.s.n.m., pero también climas desérticos, selváticos, cálidos y muy estables en otras zonas del territorio. Por lo tanto, dependiendo del área, el territorio muestra una amplia variabilidad climática y una disponibilidad de recursos eólicos muy variable. Este capítulo describe dos proyectos de electrificación utilizados como ejemplo en esta investigación. Uno está en una comunidad de tierras altas de invierno seco en los Andes tropicales (Los Conejos, Mérida) y el otro en una comunidad desértica caliente en la costa del Caribe (La Macolla, Falcón). Ambos casos se eligen para representar condiciones climáticas extremas completamente diferentes a fin de obtener resultados que podrían extrapolarse a condiciones similares en otras zonas tropicales ubicadas a una altitud similar. Además, tenga en cuenta que ambas comunidades estaban parcialmente electrificadas a través de generadores diésel domésticos previamente, pero esta investigación se centra en el proyecto de electrificación del gobierno posterior basado en RET, y particularmente pequeñas turbinas eólicas (SWT, por sus siglas en inglés).

Comunidades con sistemas eólicos domésticos en Venezuela

La Macolla es una comunidad de 11 casas repartidas en un área total estimada de 1 km² (95 ha.), en la costa noreste de la península de Paraguaná (Estado Falcón). La comunidad está ubicada a 0 m.s.n.m. La distancia máxima entre casas es de alrededor de 1.5 km. La comunidad está a 26 km del pueblo más cercano electrificado a través de la red de distribución (Jadacaquiva). Las casas han sido electrificadas a través de diferentes RET fuera de la red. En particular, las 4 casas electrificadas con aerogeneradores domésticos (SWT) de 1.5 kW están ubicadas en el borde más alejado del centro de la comunidad. La temperatura media anual en La Macolla es de 26,7ºC; 27,7ºC en el mes más cálido (septiembre) y 25,7ºC en el más frío (diciembre). La Macolla tiene un clima desértico cálido, escasas precipitaciones y vegetación árida o semiárida.

Por otro lado***, Los Conejos*** es una comunidad de 50 casas dispersas a lo largo del valle "Las González" (Los Andes, Mérida), en un área total estimada de 4,3 km². La distancia máxima entre casas es de alrededor de 7,1 km. La comunidad se encuentra en las tierras altas andinas a unos 3.500 m.s.n.m., a 17 km (un viaje de 3 a 4 horas) desde la ciudad más cercana a la red eléctrica.

En Los Conejos, las casas han sido electrificadas a través de diferentes tecnologías fuera de la red (RET). Las casas ubicadas en el extremo noreste de la comunidad, debido a su distancia del centro, fueron electrificadas con SWT de 1,5 kW. Los Conejos tiene un clima de tierras altas de invierno seco. La temperatura media anual es de 5,4ºC, 6,2ºC en el mes más caluroso (abril) y 4,7ºC en el mes más frío (diciembre). En la figura 62, se muestra la ubicación de cada una de las dos comunidades donde se han instalado sistemas eólicos domésticos en Venezuela.

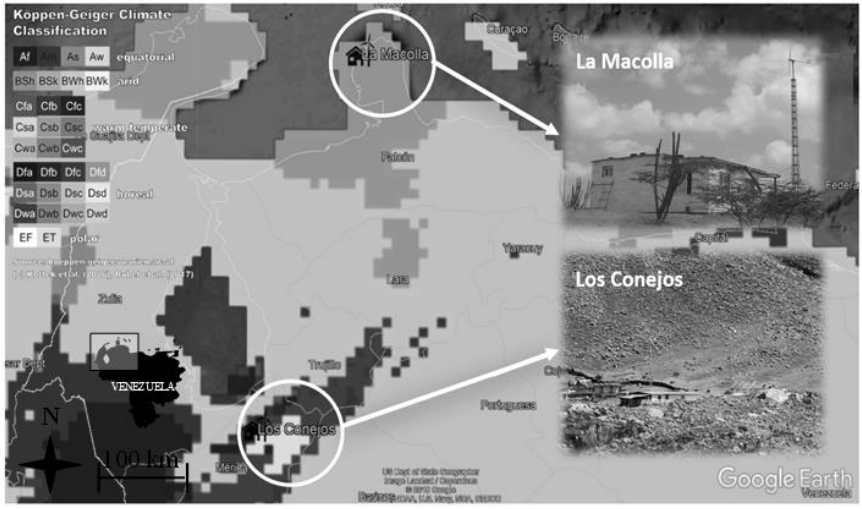


Figura 62 Variedad climática en Venezuela y ubicación de los dos casos estudiados: La Macolla (0 m.s.n.m., costa del Caribe) y Los Conejos (3.500 m.s.n.m., tierras altas andinas). Mapa tomado de la clasificación climática de Köppen-Geiger (Rubel y Kottek, 2010)

Diseño de los sistemas eólicos domésticos de Venezuela

La demanda de las casas se estimó en base a datos históricos de censos nacionales realizados por el Instituto Nacional de Estadística de Venezuela (INE) en casas rurales previamente electrificadas. Además, el Ministerio de Electricidad realizó diversas encuestas en zonas rurales del país para estimar el consumo promedio diario (kWh/día). Por lo tanto, se generó una lista típica de electrodomésticos rurales y su uso (Tabla 42).

Tabla 42 El procedimiento de estimación del consumo promedio diario se basa en encuestas de Fundelec en casas rurales en toda Venezuela y el resultado es de 2 kWh / d

Electrodomésticos	Cantidad	Horas de uso	Consumo diario (Wh)
Televisor	1	5	400
Bombillos Fluorescentes	5	5	275
Dispositivos Electrónicos	1	5	125
Nevera	1	24	1200
Consumo diario promedio total (Wh)			**2000 (2 kWh)**

Se estimó un consumo diario por casa de 2 kWh / día y 600 W de demanda máxima. Esto equivale al uso de: 1 televisor, 5 bombillas fluorescentes, 1 refrigerador (<438 kWh / año) y otros dispositivos electrónicos de hasta 50 W. Además, fueron considerados un crecimiento anual del consumo del 4,5% y una vida útil del proyecto de hasta 25 años. Por lo tanto, a largo plazo, se espera que el consumo de electricidad alcance hasta 6 kWh / día. Esta carga puede ser soportada por los sistemas SWT instalados en las dos comunidades, de acuerdo con las condiciones de diseño.

En 2011 se realizaron valoraciones de consumo para determinar un sistema SWT estándar que se implementará en futuros proyectos independientes venezolanos y que se fabricará íntegramente en una fábrica nacional propiedad de la petrolera estatal PDVSA llamada UNERVEN. En particular, la compañía eléctrica nacional consideró que un SWT de 1,5 kW sería suficiente para satisfacer la demanda esperada, que es el consumo mínimo establecido para proyectos de electrificación rural en Venezuela. Esta fue una estimación preliminar basada en factores de capacidad regulares del 15-20%. La Tabla 43 resume el equipo del sistema eólico doméstico instalado en cada casa, que incluye un rectificador, la torre de soporte para el SWT, un inversor y una batería para el almacenamiento de energía.

Tabla 43. Sistema eólico doméstico de aerogeneradores de baja potencia en Venezuela

Description	Quantity
Aerogenerador de Baja Potencia (1.5 kW)	1
Rectificador	1
Torre (13 m)	1
Inversor (24/3000/70-16)	1
Baterías 1080 Ah	12

La arquitectura de la estrategia de control es la que se muestra en la Figura 63. Primero, el rectificador convierte la corriente alterna trifásica (CA) generada en corriente continua (CC) adecuada para el almacenamiento en las baterías. El rectificador también controla el estado de carga de las baterías (SOC, por sus siglas en inglés). Cuando las baterías se descargan y la disponibilidad de recursos es suficiente, el regulador hace que el sistema las cargue. En contraste, cuando el SOC está por encima del 80%, el regulador permite el suministro de energía a la carga desde las baterías (junto con SWT, si hay viento); mientras que en el caso de carga completa (SOC = 100%) se obliga al SWT a reducir la velocidad (freno electromagnético o mecánico). El sistema está diseñado alrededor de una capacidad de almacenamiento de baterías de 12x1080 Ah, el doble del tamaño de la mayoría de los proyectos rurales fuera de la red en Venezuela, lo que permite una autonomía de 4 días a la máxima demanda. Esta decisión de diseño muestra que los diseñadores esperaban un recurso eólico altamente impredecible. También se incluye un freno manual en el SWT por razones de seguridad, para detenerlo por completo o reducir el giro a unas pocas revoluciones en caso de ráfagas de viento peligrosas para el funcionamiento mecánico estable del sistema.

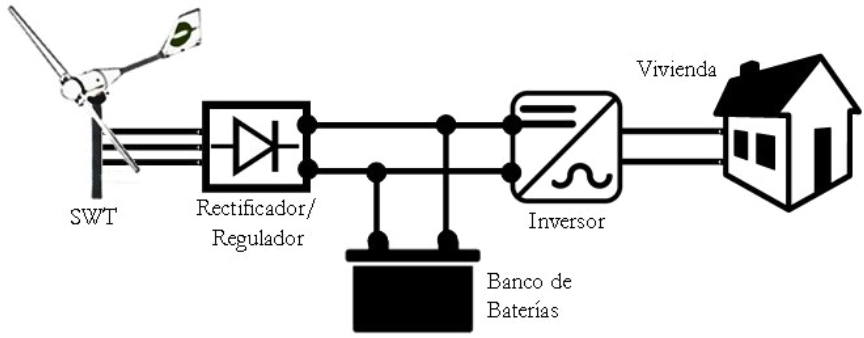


Figura 63 Diseño de sistemas eólicos domésticos con SWT de 1.5 kW para electrificación de casas rurales en Venezuela

Operación y mantenimiento de los sistemas eólicos domésticos en Venezuela

El mantenimiento general de los sistemas está planificado cada 6 meses por el personal técnico del promotor del proyecto, en este caso Fundelec (Fundación para el Desarrollo del Sistema Eléctrico de Venezuela). Consiste en la revisión y ajuste de tornillos, un examen del aislamiento de los cables

eléctricos y el estado manual y mecánico del sistema de freno de seguridad. Durante la revisión, se verifican las 3 partes móviles de la turbina eólica, todas ellas provistas de rodamientos que requieren revisiones periódicas y posiblemente una lubricación adicional. La SWT también tiene un amortiguador hidráulico cuya orientación con respecto a la dirección del viento se verifica y puede reemplazarse en caso de fugas de aceite. Las hélices (también llamadas "palas") de fibra de vidrio / carbono tienen una cinta protectora de poliuretano abrasivo en el borde de ataque, que también se reemplaza en caso de rotura total o parcial.

Al mismo tiempo, se realizan talleres para capacitar a los usuarios para que sean capaces de detectar evidencia visible de fallas y notificar de inmediato al personal técnico de Fundelec. En este sentido, los usuarios se convierten en operadores domésticos de sus propios sistemas, y se les indica que usen los frenos manuales de la SWT en caso de turbulencia del viento, ruido mecánico irregular o fuertes ráfagas de viento. Además, los usuarios están capacitados en el uso racional y eficiente de la energía. Se proporciona una lista de dispositivos que se pueden usar y el uso energético diario máximo. No se cobran tarifas a los usuarios. La electrificación está completamente subsidiada por el gobierno venezolano con el objetivo de proporcionar acceso universal a todos los ciudadanos y ahorrar combustibles de producción nacional (diésel y gasolina) para venderlos en el mercado internacional en lugar de para el consumo local. El costo de mantenimiento anual de las SWT en Venezuela es de 49,5 $. Teniendo en cuenta los costos de mantenimiento de las baterías y el inversor, se estima un costo anual de operación y mantenimiento de $ 133,5.

Evaluación de los sistemas eólicos domésticos de Venezuela

La evaluación de las SWT para la electrificación rural se organiza en dos partes: el desempeño técnico y la aceptación social de esta tecnología por parte de los usuarios finales.

Desempeño técnico

Para llevar a cabo la evaluación del desempeño técnico de los proyectos SWT, es necesario analizar en detalle los datos sobre la demanda de electricidad y su variabilidad, la disponibilidad de recursos eólicos, la curva de potencia real

(certificada) de la SWT y la Producción Anual de Energía (AEP) en ambas comunidades. Por lo tanto, se ha de realizar una encuesta de carga para determinar el consumo de energía por hora de los usuarios, obteniendo así un perfil de carga diaria estándar para cada hogar. Con respecto a la disponibilidad de viento, se utilizan datos sintéticos de alguna empresa de suministro de datos eólicos para el análisis de recursos eólicos en todas las ubicaciones de las SWT y se compara con los perfiles de demanda previamente obtenidos. Las SWT ensambladas en Venezuela que se han estudiado, tienen como nombre comercial ABP 1500, y son desarrolladas por Petróleos de Venezuela (PDVSA Industrial), y sus costos se muestran en la Tabla 44. Con esta información, se calcula matemáticamente el rendimiento técnico para un período de 25 años, teniendo en cuenta el AEP y el perfil de carga. Se define el costo nivelado de energía (LCOE, por sus siglas en inglés) como el costo promedio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema. Para calcular el LCOE, se calcula la relación entre el costo anualizado de producción de electricidad y la producción total de electricidad útil. Además, se ha de estudiar el perfil de carga, la velocidad del viento por hora, la producción de electricidad y su impacto en el SOC de las baterías.

Las encuestas para el censo de carga eléctrica han sido ampliamente utilizadas por las compañías de servicios eléctricos (ESC), en todo el mundo, con resultados exitosos en la predicción del comportamiento de la carga. En este caso, hemos utilizamos el procedimiento estándar del Ministerio de Electricidad de Venezuela para recopilar información sobre electrodomésticos, uso diario, hábitos por hora y variables estacionales. Se realizaron entrevistas con los habitantes de cada una de las casas de las comunidades estudiadas. Según el Ministerio de Electricidad de Venezuela, las variaciones estacionales de los perfiles de carga doméstica en este país dependen de las horas de luz y la temperatura. Luego, se calculó el patrón de carga estacional típico de cada vivienda, considerando el impacto de las horas de luz en el consumo de energía de iluminación y el impacto de la temperatura en los sistemas de refrigeración (congeladores, refrigeradores, etc.). Finalmente, se obtuvieron los perfiles de carga diaria de cada cliente de prueba y sus patrones durante diferentes meses, de acuerdo con las horas de luz y la temperatura.

Tabla 44. Costo de los elementos de un sistema eólico doméstico en Venezuela

Description	Costo [$]
SWT (1,5 kW)	3.652
Regulador	899
Torre y otras obras civiles	799
Inversor	4.773
Baterías (12 unidades)	4.560
Total	**14.683**

En general, las series de datos a largo plazo no están disponibles para proyectos de sistemas eólicos domésticos (SWT) y/o proyectos de electrificación rural. Las campañas de medición en el sitio a largo plazo a menudo son poco prácticas y prohibitivamente caras para proyectos domésticos de este tipo. Por lo tanto, se necesitan métodos indirectos para obtener una serie de datos confiable y a largo plazo para comprender mejor el rendimiento técnico que ha de esperarse de las pequeñas turbinas eólicas (SWT). Como no hay mediciones de viento disponibles en las comunidades de La Macolla y Los Conejos, el recurso eólico se estima utilizando datos modelados. En particular, los datos de "Virtual Met Masts" (VMM) se descargaron de UL - AWS Truepower Wind Navigator (UL-AWS Truepower, 2018). El VMM es un conjunto de datos por hora (valores de 8760) representativo de un año meteorológico típico (TMY), a este tipo de datos se lo denominará "TMY-VMM". El conjunto de datos se produce ejecutando un modelo numérico de predicción meteorológica de mesoescala, el Sistema de simulación atmosférica de mesoescala (MASS, por sus siglas en inglés), a una resolución de 10 km inicializada por reanálisis NCEP / NCAR para una muestra de 365 días a partir de 15 años (1997-2012). Las velocidades medias del viento del VMM-TMY se escalan al mapa de velocidad media del viento de 200 m desde la misma referencia de datos. Posteriormente, se descargan series de datos TMY-VMM en cada una de las ubicaciones SWT. Los conjuntos de datos se descargaron lo más cerca posible de la altura de la turbina (13 metros).

La curva de potencia del modelo de turbina eólica de 1,5 kW se obtiene de una prueba realizada en la ciudad de Soria (España) por el Centro de Investigación Energética, Ambiental y Tecnológica, CIEMAT. La prueba se ejecutó utilizando un sistema de almacenamiento y un perfil de carga

estrechamente ajustado a las condiciones de funcionamiento esperadas de la turbina eólica ABP 1500, en Venezuela. La curva de potencia obtenida de estas pruebas es la que se usa para la simulación de la SWT en las condiciones consideradas en este capítulo. La generación de electricidad de cada SWT se obtiene utilizando los conjuntos de datos por hora TMY-VMM descritos anteriormente. Por lo tanto, se obtienen datos por hora para la generación de electricidad de cada SWT. Otros datos de entrada incluyen el costo de inversión para cada componente del sistema y todas las restricciones, que son condiciones que los sistemas deben poder satisfacer durante las simulaciones o la operación real. Por ejemplo, el valor máximo permitido para la fracción de tiempo en que las SWT no produzcan nada de electricidad, que es la escasez de generación total dividida por la carga eléctrica anual total. Según datos oficiales del Ministerio de Electricidad de Venezuela, el número promedio más alto de interrupciones en los circuitos rurales es de 60 horas al año. Por lo tanto, la escasez máxima de capacidad anual (%) considerando el peor escenario, que es la interrupción durante las horas pico de carga, es de alrededor del 5%. Por lo tanto, las SWT deben tener un porcentaje de interrupciones anuales inferior al 5% para que su desempeño técnico sea igual o mejor que el de la red eléctrica rural de Venezuela.

Aceptación de los sistemas eólicos domésticos por parte de los usuarios venezolanos

Un enfoque basado en la perspectiva de los usuarios finales es muy importante para obtener una evaluación integral de sostenibilidad de los sistemas energéticos de cualquier tipo. El objetivo de este análisis es comprender el suministro de electricidad de SWT fuera de la red en áreas rurales remotas de Venezuela desde la perspectiva de los beneficiarios. Esto incluye su satisfacción, la evaluación de la calidad del servicio, la frecuencia de las fallas, la duración de las fallas y, por lo tanto, la aceptación de la tecnología, al tiempo que considera el impacto en la calidad de vida gracias a posibles mejoras en la educación, la salud y las mejoras productivas. Esto solo puede lograrse mediante visitas *in situ* y encuestas y entrevistas adecuadas. Los métodos de recolección de datos para la evaluación de la aceptación de los usuarios finales son las entrevistas y encuestas de hogares realizadas durante el trabajo de campo. Así, se realizan visitas de campo, encuestas y entrevistas en La Macolla y Los Conejos. La duración promedio de las encuestas es de alrededor de 15-20 minutos, demorando 2 días para llevarlas a cabo.

Las entrevistas se llevan a cabo en dos etapas: encuestas de carga y aceptación de la tecnología por parte de los usuarios finales. La primera parte utiliza encuestas de carga estándar desarrolladas por el Ministerio de Electricidad de Venezuela. La segunda parte se realiza mediante un cuestionario. El cuestionario está organizado en 5 secciones, centrándose en los principales aspectos que influyen en la sostenibilidad de los proyectos: (1) uso racional de la energía y el medio ambiente; (2) demanda y consumo de electricidad; (3) servicios básicos; (4) nivel educativo y actividades productivas, y (5) percepción de la calidad del servicio. Con respecto a la calidad del servicio, hay una pregunta cualitativa con 4 respuestas posibles: "excelente", "buena", "regular" o "mala". La frecuencia y duración de la falla considera tres niveles: 1, 2 o 3 (de menor a mayor). Además de los beneficios esperados en salud, productividad y educación, a las personas también se les pregunta sobre hallazgos inesperados durante el uso de SWT y finalmente tienen la libertad de hablar sobre lo que quieran.

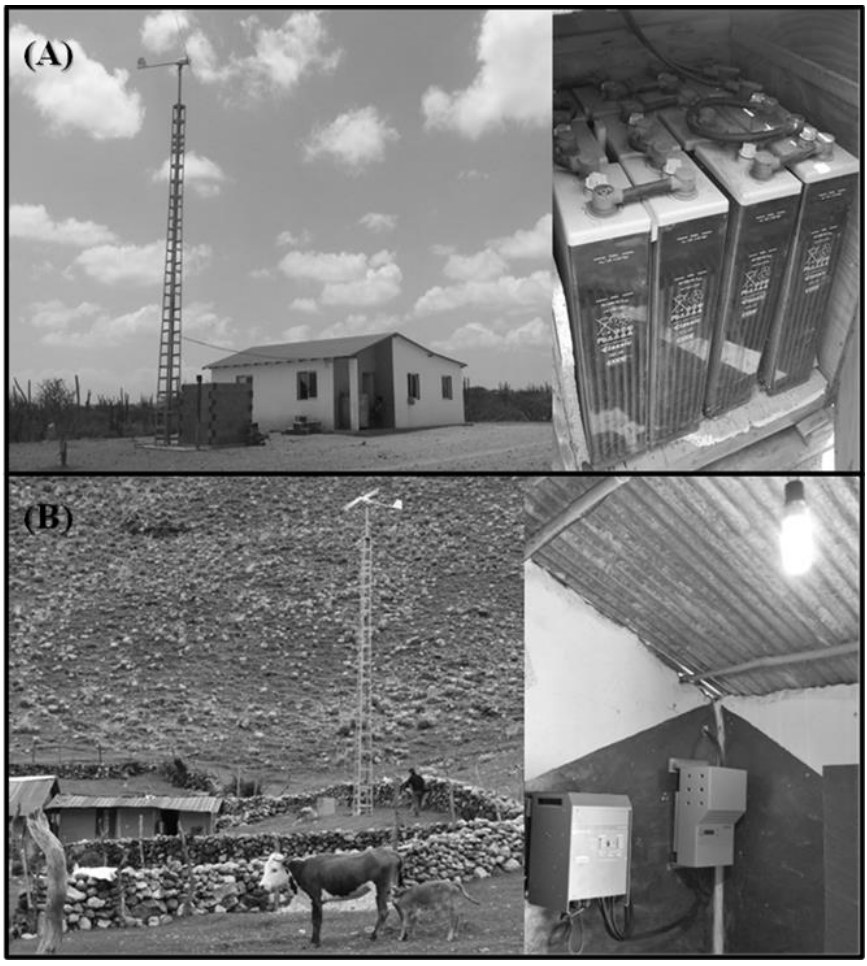


Figura 64. (A) Pequeña turbina eólica de 1,5 kW y banco de baterías en La Macolla (Falcón). (B) Pequeña turbina eólica de 1,5 kW, rectificador e inversor de corriente en Los Conejos (Mérida)

Evaluación de las experiencias con sistemas eólicos domésticos en Venezuela

En esta sección, se describen los resultados de los casos estudiados en Venezuela (Figura 64). Las comunidades están ubicadas en condiciones climáticas muy diferentes y extremas. Como se explicó anteriormente, las casas estudiadas se han electrificado con sistemas SWT de 1,5 kW: 4 en La Macolla (zona desértica caliente) y 4 en Los Conejos (tierras altas de invierno

seco).

Los resultados de ***La Macolla*** se describen a continuación. Los dos usos de energía predominantes son la iluminación y la refrigeración, que representan el 48.2% y el 25.3% del consumo total, respectivamente. A su vez, estos usos de electricidad dependen de las horas diarias de sol y de la temperatura promedio durante el año (Figura 65-A). Se necesita refrigeración para alimentos y bebidas debido al clima cálido del desierto y las temperaturas mensuales promedio de más de 25,7ºC, incluso en el mes más frío. Sin embargo, la iluminación es el factor dominante en el perfil de carga diaria y estacional. Los valores más altos de demanda se producen al amanecer, al mediodía y durante algunas horas entre el anochecer y la medianoche. Esto corresponde a las horas en que los habitantes están en casa y, por lo tanto, usan iluminación y electrodomésticos. Sin embargo, debido al uso de refrigeración durante el día, el factor de carga (tasa entre la carga promedio y pico) tiende a ser alto: el factor de carga promedio ponderado en La Macolla es 0,289, siendo el más bajo en La Macolla # 3 y el más alto en La Macolla # 2 (Figura 65).

Los resultados de ***Los Conejos*** se describen a continuación. El uso predominante de energía es la iluminación y, debido a las bajas temperaturas, no se utiliza refrigeración. Esto tiene un impacto importante en las necesidades de energía y el perfil de carga de las casas. Los resultados muestran que, en promedio, el consumo de iluminación es el 55,3% de la demanda total. El uso de electrodomésticos no tiene una variación estacional notable (Figura 65-B). Los valores de demanda más altos se producen al amanecer y durante algunas horas entre el anochecer y la medianoche. Esto es cuando los habitantes están mayormente en casa y, por lo tanto, se utilizan iluminación y electrodomésticos. El factor de carga tiende a ser bajo debido a la pequeña cantidad de electrodomésticos, además de la iluminación y la falta de refrigeración: el factor de carga promedio ponderado en Los Conejos es 0,156, siendo el más bajo en Los Conejos # 2 y el más alto en Los Conejos # 3 (Figura 65).

En resumen, los resultados muestran una relación directa entre la temperatura media anual y la demanda de electricidad. La demanda en ***La Macolla*** es 3 veces mayor que en ***Los Conejos***, porque la temperatura es más 20ºC más alta. Las necesidades de calefacción y cocina de la población

generalmente están cubiertas por gas natural o leña; el gas natural se usa principalmente en el caso de reemplazar la leña para cocinar y calentar, ya que es abundante en la mayoría de los países tropicales. La relación entre la demanda de electricidad y la temperatura media anual tiende a ser lo contrario de las zonas no tropicales (Europa, Estados Unidos o Rusia), donde cuanto mayor es la temperatura, mayor es la demanda.

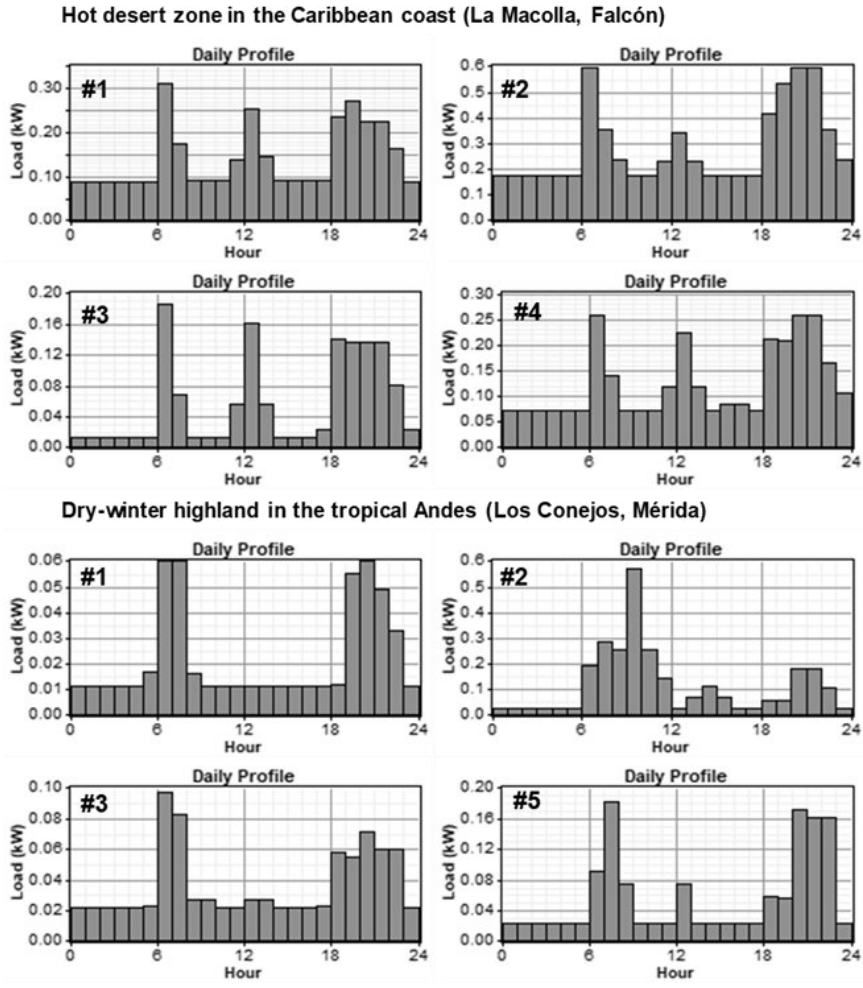


Figura 65 Perfiles de carga diaria de casas en La Macolla (Falcón) y Los Conejos (Mérida). Los números se refieren a cada una de las viviendas electrificadas con SWT en las correspondientes comunidades.

Debido a su ubicación en la ruta de los vientos alisios desde el Mar Caribe, la

velocidad promedio del viento en la comunidad de ***La Macolla*** varía de 7,1 a 8,8 m/s. La dirección predominante del viento es desde el ENE y E, con una probabilidad de ocurrencia de más del 65% (más de cinco veces mayor que la tercera dirección más probable, NNE). En las turbinas eólicas # 3 y #4, la velocidad media anual del viento es mayor que en la # 1 y #2. Por el contrario, en la #3 y # 4, las velocidades medias del viento son de 7,5 y 7,6 m / s, respectivamente, por lo que sus factores de capacidad son del 39,2% (bastante bueno, para este tipo de aplicaciones). Debido a su ubicación más abierta en la dirección del flujo de viento predominante (ENE-E), y su mayor elevación, la turbina eólica # 3 tiene el AEP más alto (5,556 kWh / año) y el factor de capacidad más alto del 42,3%.

Por otro lado, debido a su ubicación en un valle con una elevación de 3,500 m.s.n.m., la velocidad media anual del viento en la comunidad de ***Los Conejos*** varía de 1,4 a 6,0 m / s. La dirección del viento es predominante de N y NNE, con una probabilidad de ocurrencia de alrededor del 50% (más de tres veces mayor que la tercera dirección más probable, NNW). Por lo tanto, la velocidad media del viento en la turbina # 1 es entre un 12% y un 15% más alta que las otras, que además se encuentran a 50-100 m de altitud. Como resultado, las velocidades promedio del viento del # 2 al # 4 implican factores de capacidad entre 1,9% y 2,2%. En este sentido, la turbina eólica # 1 tiene el AEP más alto (398 kWh / año), aunque esto solo implica un factor de capacidad del 3%. Se evidenció que los diseñadores no tomaron en cuenta el bajo recurso eólico de esta región. Por lo tanto, las baterías sufren una descarga extrema profunda debido a que esta situación acorta su vida útil.

Con respecto a ***La Macolla***, tres de los 4 sistemas SWT no sufren interrupciones en el suministro de electricidad; la excepción es la # 2, donde se ha encontrado 1% de restricciones o recortes con respecto a la demanda anual. Esto se debe a la disminución estacional en la velocidad del viento durante los meses en que la demanda aumenta a su valor más alto, como se muestra en la Figura 66-A (octubre-diciembre). La mayor demanda, en los meses de octubre a diciembre, es causada por la reducción de las horas de sol. Los cortes de energía generalmente ocurren de 8 a.m. a 4 p.m., cuando se registran las velocidades de viento más bajas y las baterías están en el SOC más bajo, después de alimentar la carga de iluminación durante las horas nocturnas. En promedio, el rango de variación mensual de la demanda es del 5,3%. Aunque la SWT # 4 genera suficiente energía para su carga durante

todo el año, su ubicación detrás de una colina en la dirección predominante del viento provoca una reducción en el factor de capacidad, ya que la distribución de frecuencias de velocidad del viento tiene una mayor dispersión (menor k de weibull) Esto influye en la turbulencia del viento y, por lo tanto, en la AEP. Sin embargo, las 4 SWT tienen un factor de capacidad más alto que el promedio mundial para este tipo de tecnología, incluso más alto que el promedio de las turbinas eólicas de alta potencia. Finalmente, considerando que la carga real está cerca del valor de diseño estimado (2 kWh / día), el costo nivelado de energía (LCOE) en estas condiciones varía de 0,525 a 2.579 US $ / kWh.

Con respecto a ***Los Conejos***, el suministro de electricidad se interrumpe más del 20% del tiempo en todas las casas, excepto el # 1. Esto se debe a una velocidad media anual muy baja del viento, entre 2,8 y 3,3 m/s, causada por la ubicación de las casas y la orografía. A menos de 1 km de # 3 y # 4, en la cima de la montaña, la velocidad del viento es de más de 6 m/s. Por otro lado, el índice de claridad del área significa que la generación del sistema solar doméstico puede ser insuficiente o tener un costo más alto que los sistemas SWT instalados. Sin embargo, en general, como la velocidad media mensual del viento tiene una variación estacional similar a la demanda (Figura 66-B), el impacto de las interrupciones se reduce. La mayor demanda se debe al menor número de horas de sol, ya que el principal factor de demanda de estacionalidad es la iluminación: el rango de variación mensual es del 4,6% (Figura 66-B). La falta de energía o capacidad ocurre en cualquier mes del año y generalmente de 6 a.m. a 2 p.m., debido a que la velocidad del viento es baja y las baterías están en el SOC más bajo, después de alimentar la iluminación durante las horas nocturnas. Los factores de capacidad son muy bajos, de 1,9 a 3,0%, y la demanda está significativamente por debajo del valor de diseño, lo que significa costos de generación de electricidad extremadamente altos (4,1-6,3 US $ / kWh). Debido a su ubicación en un valle, la dispersión de la distribución de las frecuencias de la velocidad del viento es baja; pero, considerando los valores promedio de velocidad del viento, esto tiene muy poca relevancia en términos de AEP.

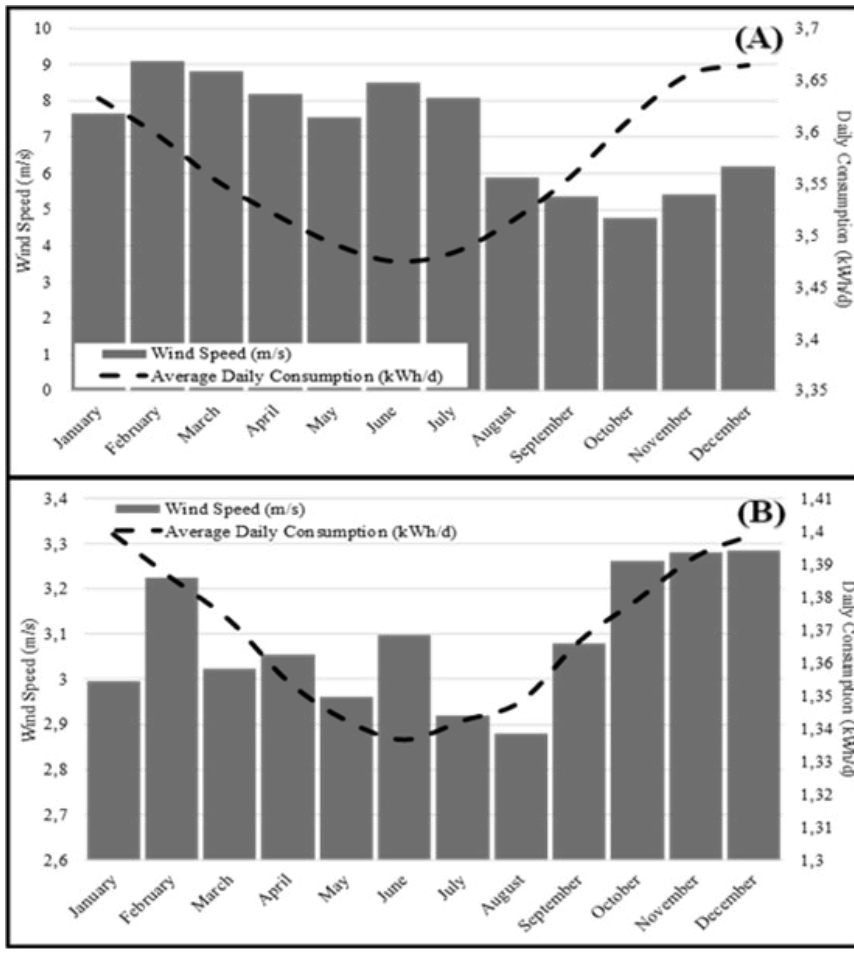


Figura 66 Promedio mensual de velocidad de viento y consumo eléctrico en (A) La Macolla (Falcón) y (B) Los Conejos (Mérida)

Por lo tanto, el clima es un factor determinante en la definición del perfil de carga, el uso de electricidad y la variabilidad estacional, que es un aspecto clave al diseñar nuevos proyectos de electrificación SWT. En la comunidad de clima cálido, hay dos variables de carga importantes (iluminación y refrigeración) que dependen de dos variables estacionales (temperatura y horas de luz solar), por lo que la variación estacional de la demanda es un 18% mayor que en la comunidad de clima frío (5,3% / 4,6 %). Este es un elemento decisivo, ya que la escasez de capacidad en la comunidad cálida solo ocurre en algunos períodos del año, mientras que en la fría es más probable

que ocurra en cualquier momento. Sin embargo, a nivel mundial, la escasez de capacidad será exclusivamente estacional si el sistema está bien diseñado y seguirá siendo estocástico si el sistema no está bien diseñado o si la velocidad media del viento es muy baja.

Aceptación de los sistemas eólicos domésticos entre los usuarios venezolanos

Con respecto a ***La Macolla***, los sistemas han sido aceptados y bien recibidos por los usuarios finales. Los 4 usuarios de SWT consideran que el servicio eléctrico es "excelente", mientras que 3 de ellos piensan que la confiabilidad ha sido la misma desde la instalación y 1 piensa que ha mejorado. Ninguno de ellos informó fallas desde la instalación. Los usuarios evitan averías apagando las SWT durante fuertes ráfagas de viento y llevando a cabo el mantenimiento programado, por lo que las SWT ha permanecido operativo sin fallas frecuentes o largas durante más de 4 años. En cuanto a las actividades productivas, el 82% de los adultos en edad de trabajar se dedican a la pesca y el 18% a la cría de cabras. La electricidad de SWT suministra energía al equipo de refrigeración necesario para mejorar la capacidad de almacenamiento de alimentos. En cuanto a la adecuación, solían tener un sistema solar fotovoltaico de 300 Wp que no podía suministrar el equipo de refrigeración. La refrigeración es muy importante en La Macolla, donde la temperatura promedio anual es de 26.7ºC y el promedio mínimo es de 25.7ºC. Teniendo en cuenta que la dieta de los habitantes se basa en mariscos y carne de cabra, la refrigeración es un elemento clave para la conservación de los alimentos y la protección de la salud. La refrigeración por debajo de 8ºC evita que la mayoría de los patógenos se multipliquen y, por lo tanto, los alimentos permanecen seguros para el consumo durante más tiempo. Además, todos los niños en edad escolar asisten a clases y el analfabetismo de adultos está por debajo del promedio rural en Venezuela. Todos los padres consideran que el acceso a la electricidad ha mejorado la calidad de la educación de sus hijos. Ninguno de los usuarios piensa que el sistema limita sus necesidades de energía o requisitos productivos. Finalmente, las encuestas, entrevistas y hallazgos de visitas muestran que la tecnología es aceptada por los usuarios finales, quienes la consideran útil, se sienten identificados con los sistemas y realizan el mantenimiento correspondiente.

Con respecto a ***Los Conejos***, los sistemas han sido aceptados y bien recibidos por los usuarios finales. Entre los cuatro usuarios de SWT, 3 consideran que el servicio eléctrico es "bueno" y el otro piensa que es "excelente". Sin embargo, 3 usuarios piensan que la fiabilidad ha disminuido desde la instalación y solo 1 afirma que sigue siendo la misma. Además, 3 usuarios informaron que las baterías tienden a descargarse por debajo del 80% del SOC con más frecuencia que al principio. Sin embargo, a medida que los usuarios realizan el mantenimiento programado, el SWT ha permanecido operativo sin fallas frecuentes o prolongadas durante más de 4 años. En cuanto a las actividades productivas, el 41% de los adultos en edad laboral se dedican a la agricultura, y el resto a la piscicultura. Debido a la baja temperatura promedio anual, no se necesita electricidad para refrigeradores, ventiladores u otros sistemas de aire acondicionado, excepto para la conservación de peces a largo plazo. Por otro lado, la iluminación eléctrica reemplaza las lámparas de queroseno y, en consecuencia, reduce las emisiones de partículas, monóxido de carbono (CO), óxidos nítricos (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2). Varios estudios han concluido que el queroseno para iluminación tiene un impacto negativo en la función pulmonar y aumenta la probabilidad de enfermedades como tuberculosis, asma y cáncer. Todos los niños en edad escolar asisten a clases y el analfabetismo de adultos es del 0%. Todos los padres consideran que el acceso a la electricidad ha mejorado la calidad de la educación de sus hijos. Ninguno de los usuarios piensa que el sistema limita sus necesidades de energía o requisitos productivos. Finalmente, las encuestas, entrevistas y hallazgos de visitas muestran que la tecnología es aceptada por los usuarios finales, quienes la consideran útil, se sienten identificados con los sistemas y realizan el mantenimiento correspondiente.

En todos los casos, los usuarios finales consideran que el acceso a la electricidad ha sido un elemento importante para mejorar la educación de sus hijos. Todos los niños asisten a escuelas locales electrificadas. En términos de salud, los usuarios finales reconocen que el reemplazo de las lámparas de queroseno y el uso de refrigeradores son favorables para las familias beneficiarias. La capacidad de almacenar alimentos refrigerados (La Macolla) es fundamental para prevenir enfermedades infecciosas, especialmente en niños y mujeres. En el caso de los niños en edad de lactancia, la refrigeración puede prevenir el contagio infeccioso de biberones y otros alimentos infantiles. La iluminación eléctrica en Los Conejos reduce efectivamente la

incidencia de asma y otras enfermedades respiratorias entre los niños, según los beneficiarios. Además, los usuarios consideran que SWT no limita sus actividades productivas o sus usos energéticos y, de hecho, ha contribuido a una mejora gracias a la conservación de los peces. La capacidad de almacenamiento permite a los pescadores (La Macolla) y a los piscicultores (Los Conejos) ser autosuficientes, no tener que pagar por el congelador no comunitario y vender sus productos directamente, obteniendo así mayores ingresos gracias a la reducción de intermediarios. Los resultados muestran que en las casas de la comunidad cálida (La Macolla), el consumo de electricidad es ligeramente mayor que el valor de diseño, pero las altas velocidades del viento permiten cubrirlo, por lo que se logra una satisfacción total. Por otro lado, aunque la velocidad del viento en la comunidad de clima frío (Los Conejos) es más baja, también lo es la demanda. Por lo tanto, la satisfacción con la tecnología no disminuye debido a la menor disponibilidad de recursos, sino que depende de la relación generación / carga. A pesar de las fallas debido a las frecuentes descargas de la batería, los usuarios de Los Conejos están satisfechos con el servicio. En este sentido, la adecuación es una función no solo de la producción de electricidad, sino también del suministro de electricidad para las necesidades definidas localmente. Esto también está relacionado con la menor variabilidad estacional de la carga a gran altura que al nivel del mar.

Lecciones aprendidas en los sistemas eólicos domésticos de Venezuela

Existe una necesidad mundial de abordar la electrificación rural utilizando tecnologías ecológicas como las SWT. Esta tecnología depende de la variabilidad del viento, que a su vez está vinculada a la climatología y la orografía. Por lo tanto, se requieren evaluaciones de desempeño técnico de proyectos SWT reales para la difusión de esta tecnología, reforzando así las estrategias de electrificación rural. Esto es particularmente relevante para las regiones tropicales, caracterizadas por condiciones climáticas extremas y con altos porcentajes de población sin acceso a la electricidad. Este capítulo muestra los resultados de la evaluación técnica y la aceptación de los usuarios finales de dos proyectos SWT en Venezuela, en lugares completamente diferentes: La Macolla (Falcón), con un clima desértico cálido, en la costa del Caribe y Los Conejos (Mérida), con un andino clima de invierno seco, a 3.500 msnm La aceptación de los usuarios finales se estudió a partir de encuestas

in situ y entrevistas semiestructuradas con los beneficiarios.

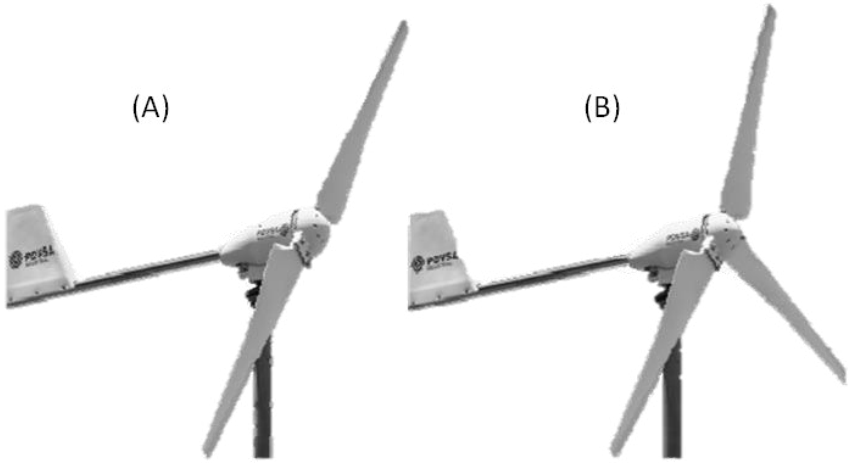


Figura 67 Aerogenerador de Baja Potencia ensamblado en Venezuela por la filial de PDVSA Industrial UNERVEN de 1500 W (A) y de 6000 W (B)

Con respecto a la demanda y los recursos eólicos disponibles para la generación de electricidad, en la zona desértica caliente junto a la costa, los costos de producción de energía de SWT están cerca de otros niveles de RET fuera de la red. Por el contrario, a valores de velocidad del viento más bajos en las tierras altas de invierno seco, la producción de energía tiende a ser más baja, por lo que los costos de producción son muy altos. Aunque en las zonas montañosas se pueden observar altas velocidades del viento a gran altura, las casas suelen ubicarse en valles protegidos del viento. Por lo tanto, aunque en estas áreas podrían explotarse grandes potenciales eólicos, los proyectos de electrificación deben concebirse donde la turbina eólica no esté necesariamente ubicada cerca de la casa, o en microrredes con turbinas ubicadas en las cimas de las montañas y con líneas de distribución para abastecer las casas. En las zonas costeras, la ubicación de las turbinas eólicas no es tan relevante para la producción anual de energía (AEP), pero hay que tener en cuenta factores como la turbulencia en el rendimiento de por vida de la turbina. En cuanto a la carga, la demanda eléctrica es mayor en climas cálidos que en climas fríos (La Macolla vs Los Conejos). Además, en las casas de clima cálido y aplicando el criterio de *caeteris paribus*, el factor de carga es mayor que en climas permanentemente fríos. Esto es causado por una base de carga de enfriamiento que no existe en climas fríos, donde la iluminación

es el factor predominante. En todos los casos, los usuarios están satisfechos con el servicio, por lo que se demuestra que la adecuación depende no solo de la producción sino también del suministro de electricidad para las necesidades definidas localmente. En resumen, la tecnología es bien aceptada y asimilada en todas las casas visitadas. Las pequeñas turbinas eólicas (SWT) se perciben como beneficiosas para la educación de los niños, las condiciones de salud, las oportunidades productivas y el entretenimiento en el hogar (radio, televisión, etc.), lo que se ha percibido como muy importante para las personas entrevistadas, ya que los hace sentir más cerca del resto de la población del país, región y el país.

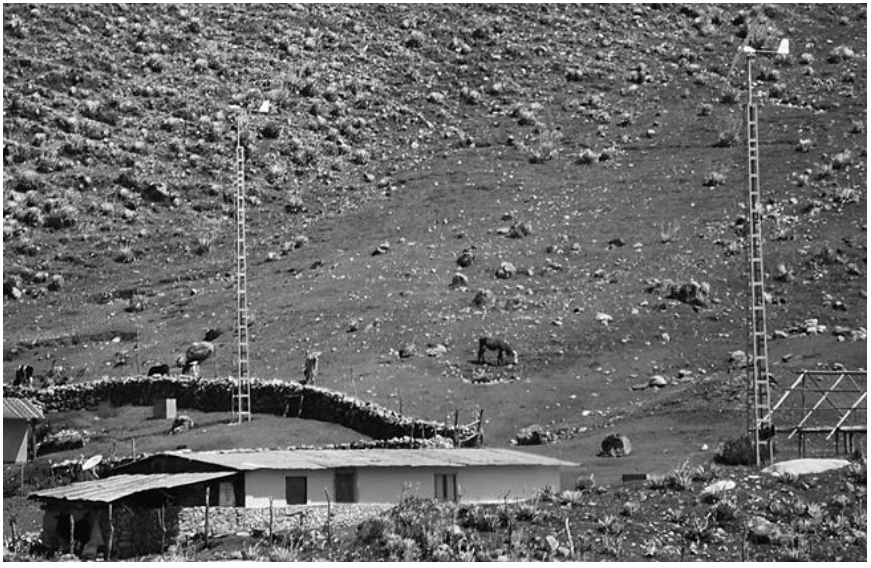


Figura 68 Dos aerogeneradores de baja potencia (ABP) o pequeñas turbinas eólicas (SWT) instaladas en la comunidad andina de Los Conejos (Mérida, Venezuela)

Los resultados confirman que, para lograr la electrificación rural completa, el uso de energía eólica a pequeña escala es muy valioso, considerando que las condiciones climáticas y, por lo tanto, la carga eléctrica varía fundamentalmente con la altitud, lo que influye en la temperatura y los regímenes del viento. Por lo tanto, las evaluaciones preliminares del potencial eólico deberían considerar, particularmente en las zonas montañosas, las variaciones del viento en distancias cortas. Aunque las áreas de montaña son mucho menos comunes que las sabanas dentro de la región intertropical, las tasas más bajas de claridad (que limitan las oportunidades de explotación

solar fotovoltaica) significan que aún las bajas velocidades viento y las tecnologías de pequeña eólica debe considerarse como una opción. Por lo tanto, las particularidades de las regiones costeras o de gran altitud en los trópicos, que tienen diferencias significativas en los recursos y la demanda, deben considerarse en las etapas de planificación de los programas de electrificación rural. Además, dadas las similitudes en las condiciones entre los países tropicales, se debe promover la cooperación técnica entre países y se deben intercambiar evaluaciones de proyectos como las incluidas en este libro de divulgación técnica. La diversidad climática de Venezuela puede servir como un laboratorio al aire libre para probar tecnologías eólicas pequeñas en varios regímenes de vientos y condiciones tropicales, para ser extrapolados a cualquier parte del mundo tropical.

Los resultados muestran que las áreas planas en la costa norte tienen una baja variabilidad del viento y altas velocidades del viento, mientras que en las áreas montañosas la implementación de SWT está limitada por la orografía. Sin embargo, la aceptación social de SWT en ambas comunidades sigue siendo alta, ya que la satisfacción de los usuarios está determinada por la relación entre la demanda de electricidad y la generación. En regiones tropicales con temperaturas constantes durante todo el año, el uso de electricidad está condicionado por el clima de una manera diferente a otras regiones del mundo. Por lo tanto, los umbrales para el acceso a la energía no son adecuados, incluso para latitudes similares, como Venezuela y otros países tropicales. Además, la satisfacción de los usuarios está vinculada a la sensación de propiedad derivada de la participación en el mantenimiento y la prevención de fallas, lo que facilita la corresponsabilidad. Esto ha sido decisivo para evitar fallas frecuentes y prolongadas desde la instalación hace más de 4 años.

El uso de SWT en Venezuela tiene sus limitaciones, relacionadas con el impacto de la variabilidad del viento y la orografía en el rendimiento técnico. Las áreas planas en la costa norte tienen una baja variabilidad de recursos y altas velocidades de viento, gracias a los vientos alisios. En contraste, se observa una mayor variabilidad en la región andina, y la ubicación de las comunidades rurales en los valles limita la disponibilidad de viento. Sin embargo, esta investigación muestra cómo los proyectos SWT aún pueden ser aceptados socialmente a pesar de las limitaciones tecnológicas. Como investigación futura, se deben evaluar nuevos estudios de casos en otras

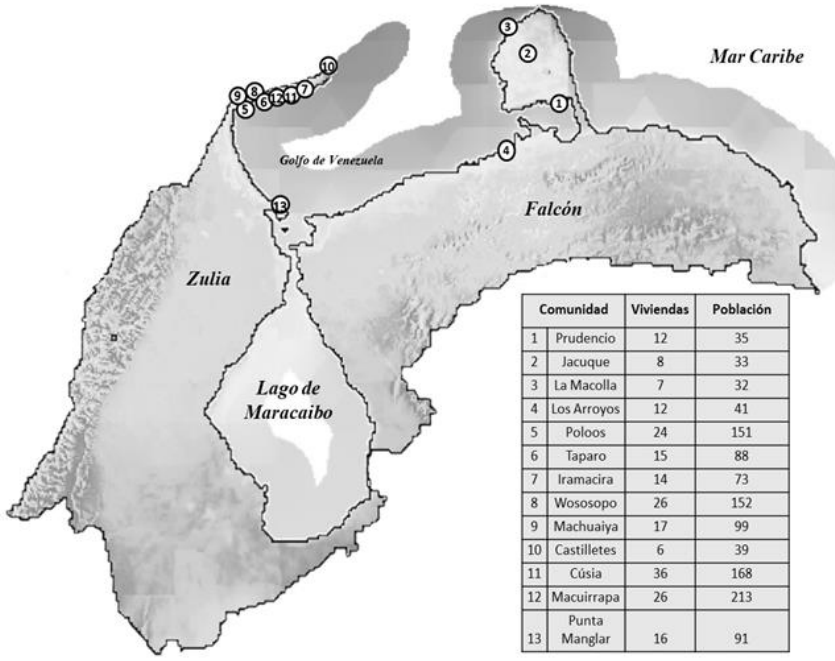
partes del mundo, realizando encuestas y entrevistas con una población más grande para identificar las conclusiones. Estos se pueden extrapolar a muchos otros contextos y regiones para reforzar futuros planes de electrificación rural basados en SWT.

MICRORREDES RURALES HÍBRIDAS

Los sistemas fuera de la red pueden proporcionar electricidad a través de sistemas domésticos independientes o microrredes (generadores que suministran electricidad a varios puntos de consumo a través de una red pequeña). Aunque los sistemas domésticos independientes se utilizan ampliamente, las microrredes pueden ser más rentables y confiables según la distribución de las casas. Cuando se depende de más de una fuente de energía renovable (RES), por ejemplo, eólica y solar, el concepto de microrred híbrido se usa comúnmente, y ambas RES conducen a un suministro más confiable. De hecho, las microrredes híbridas eólico-solares pueden proporcionar a los usuarios finales una calidad de servicio aún mejor que la de las tecnologías convencionales basadas en combustible. Sin embargo, la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos de microrred híbrida sigue siendo un problema. El diseño e implementación de microrredes híbridas es una de las estrategias de electrificación dentro del programa "Sembrando Luz", desarrollado por el gobierno venezolano. Hasta la fecha, se han instalado 18 microrredes; las primeras 13 en el noroeste de Venezuela, 4 en comunidades en el estado de Falcón y 9 en el estado de Zulia (Figura 69). En Falcón, las comunidades están compuestas de criollos, mientras que en Zulia la población pertenece al grupo étnico wayuú. La población indígena en Venezuela es una pequeña minoría, generalmente ubicada en asentamientos rurales dispersos con bajo acceso a servicios de educación, salud e información, lo que influye en su desarrollo socioeconómico. El plan de instalación de microrredes rurales híbridas de Venezuela inició en el año 2009 con el Sistema Híbrido de Jacuque en Paraguaná, Estado Falcón. Esta tecnología está integrada por un aerogenerador de 2 y/o 3 palas, paneles fotovoltaicos y electrógenos a diésel de respaldo. Para el control y sincronización de cada uno de los componentes se emplean inversores basados en algoritmos y sistemas de conversión con electrónica de potencia. La potencia máxima para consumir por vivienda no debe exceder los 450 VA, con un consumo de energía diaria que no debe superar los 2 kWh / día (60 kWh / mes). Fundelec, ha considerado adecuada esta tecnología para zonas con un potencial eólico mínimo, como el que se presenta en algunas comunidades aisladas ubicadas al norte de los estados Zulia, Falcón, Anzoátegui y Sucre, así como en algunos valles de los páramos andinos del estado Mérida. Estos sistemas han beneficiado a alrededor de 300 familias y 1500 personas. Se tiene prevista la instalación de 34 sistemas más.

Tabla 45 Descripción de 15 microrredes rurales híbridas de Venezuela. Además de las mostradas hay tres más ubicadas en el estado Sucre.

Estado	Comunidad	Aerogeneradores (kWp)	Placas Fotovoltaicas (Wp)	Grupo Electrógeno (kW)	Baterías (A-h)
Falcón	Prudencio	1x6	36 x 150	14	48 x 800
	Jacuque	1x3	20 x 150	9	24 x 1080
	La Macolla	1x6	36 x 150	14	48 x 800
	Los Arroyos	1x6	36 x 160	14	48 x 800
Zulia	Poloos	1x6	36 x 150	14	48 x 800
	Taparo	1x6	36 x 150	14	48 x 800
	Iramacira	1x6	36 x 160	14	48 x 800
	Wososopo	1x6 + 1x3	56 x 150	19	48 x 800
	Machuaiya	1x6	36 x 150	14	48 x 800
	Castilletes	1x6	36 x 150	14	48 x 800
	Cúsia	2x6	72 x 150	23	96 x 800
	Macuirrapa	1x6 + 1x3	56 x 150	19	48 x 1200
	Punta Manglar	1x6 + 1x3	56 x 150	19	48 x 800
Mérida	Las González(1)	1x6	36 x 150	14	48 x 800
	Las González(2)	1x6 + 1x3	56 x 150	19	48 x 800



	Comunidad	Viviendas	Población
1	Prudencio	12	35
2	Jacuque	8	33
3	La Macolla	7	32
4	Los Arroyos	12	41
5	Poloos	24	151
6	Taparo	15	88
7	Iramacira	14	73
8	Wososopo	26	152
9	Machuaiya	17	99
10	Castilletes	6	39
11	Cúsia	36	168
12	Macuirrapa	26	213
13	Punta Manglar	16	91

Figura 69 Ubicación de las 13 microrredes rurales híbridas en los estados Zulia y Falcón de Venezuela

Dimensionamiento y estandarización de diseño de microrredes en Venezuela

La estimación del consumo promedio diario fue realizada por Fundelec (Ministerio de Energía Eléctrica de Venezuela). La estimación se basó en datos históricos obtenidos durante los censos nacionales realizados por el Instituto Nacional de Estadística de Venezuela (INE), en casas rurales previamente electrificadas. Además, Fundelec realizó encuestas en zonas rurales para electrificarlas a fin de perfilar las casas y los habitantes. Por lo tanto, se generó una lista típica de electrodomésticos y su uso (Tabla 46). De esta manera, Fundelec estimó una demanda de energía de 2 kWh / día y una potencia máxima de 0,45 kW (≈ 0,6 kVA). Estos valores representan aproximadamente 730 kWh / año por hogar (182-122 kWh / año per cápita, dependiendo del número de residentes). Estas estimaciones exceden el umbral mínimo establecido por las Naciones Unidas (100 kWh / año per cápita). Además, se consideró una demanda de 3,8 kWh / día para las escuelas y centros de salud, y 5,1 kWh / día para las iglesias.

Tabla 46 El procedimiento de estimación del consumo promedio diario se basa en encuestas de Fundelec en casas rurales en toda Venezuela y el resultado es de 2 kWh / d

Electrodomésticos	Cantidad	Horas de uso	Consumo diario (Wh)
Televisor	1	5	400
Bombillos Fluorescentes	5	5	275
Dispositivos Electrónicos	1	5	125
Nevera	1	24	1200
Consumo diario promedio total (Wh)			**2000 (2 kWh)**

A continuación, se realizó una evaluación sociodemográfica de la distribución de asentamientos rurales no electrificados en Venezuela, basada en las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística (INE). En este sentido, el INE compiló datos sobre asentamientos rurales electrificados y no electrificados y el número de casas en ellos. A partir de estos datos, se estima que el 96.23% de las casas rurales no electrificadas se agrupan en asentamientos de 40 o menos casas. Entre ellos, el 72.81% corresponde a asentamientos de más de 3 casas, para ser electrificados a través de microrredes híbridas. Los resultados muestran la alta dispersión de las casas sin electricidad en Venezuela y que la mayoría de estas casas están habitadas por población indígena. De hecho, la población indígena en las zonas rurales de Venezuela se ha establecido históricamente en asentamientos dispersos y viven en pequeñas chozas ("ranchos"), como consecuencia de su estilo de vida seminómada. En promedio, hay 6 personas por casa, con necesidades energéticas muy pequeñas, de acuerdo con sus costumbres y hábitos tradicionales.

El diseño de las microrredes híbridas fue desarrollado por Fundelec utilizando software especializados. En las comunidades electrificadas con microrredes rurales híbridas no hay ríos ni otras fuentes de energía renovable (RES, por sus siglas en inglés) disponibles, excepto la solar y la eólica. En algunas comunidades, la velocidad del viento alcanza hasta 8-10 m / s, que es la categoría de viento más alta definida por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés). El potencial solar también es alto, oscila entre 5,5 y 6,7 kWh / m² / día en las comunidades electrificadas de Zulia y supera los 6,7 kWh / m² / día en las de Falcón, con una variación muy baja durante todo el año. Por lo tanto, las microrredes híbridas eólico-solares fueron el diseño estándar de microrredes considerado, de acuerdo con los diferentes niveles de carga, para todos los proyectos planificados en ambos estados (Zulia y Falcón). Teniendo en cuenta el consumo promedio diario de casas rurales comunes, se esperaba que las microrredes híbridas de eólico-solar-diésel-batería abastecieran la demanda de casas e infraestructuras comunitarias como escuelas, iglesias y centros de salud. Las microrredes se diseñaron en

configuraciones para hasta 10, 20, 30 y 40 casas, denominadas SH-10, SH-20, SH-30 y SH-40. La capacidad máxima se definió de acuerdo con los datos de la red de distribución rural del Ministerio de Electricidad de Venezuela. La Tabla 47 también resume los equipos de generación de energía eólica y fotovoltaica y los sistemas de respaldo y almacenamiento utilizados en cada configuración.

Tabla 47 Configuraciones de las microrredes híbridas en Venezuela según la carga

Configuración	Generación Solar		Generación Eólica		Almacenamiento en Baterías		Respaldo Diésel
	Cantidad	Capacidad	Cantidad	Capacidad	Cantidad	Capacidad	Capacidad
10 Viviendas (SH-10)	20 x 150 W	3 kW	1 x 3 kW	3 kW	24 x 1080 Ah	25920 Ah	9 kW
20 Viviendas (SH-20)	36 x 160 W	5.76 kW	1 x 6 kW	6 kW	48 x 800 Ah	38400 Ah	14 kW
30 Viviendas (SH-30)	56 x 150 W	8.4 kW	1 x 3 kW 1 x 6 kW	9 kW	48 x 1200 Ah	57600 Ah	19 kW
40 Viviendas (SH-40)	72 x 150 W	10.8 kW	2 x 6 kW	12 kW	96 x 800 Ah	76800 Ah	23 kW

Tecnologías eólicas y solares de las microrredes en Venezuela

Las comunidades rurales en Zulia y Falcón están ubicadas en territorios donde la temperatura media anual excede los 30 ºC, oscilando entre 28º y 34 ºC, en el transcurso del año. Zulia y Falcón tienen un clima cálido semiárido y cálido del desierto, respectivamente, caracterizado por una fuerte radiación solar, vientos alisios continuos, un clima seco durante todo el año y altas temperaturas constantes. Estos dos estados fueron los primeros en el país en beneficiarse de las microrredes híbridas eólico-solares para la electrificación de las comunidades rurales dentro del programa "Sembrando Luz". En cuanto a la tecnología eólica, se utilizaron aerogeneradores de generador síncrono de imanes permanentes. Las turbinas tienen un diámetro de 4 m con 2 y 3 palas, y capacidades de 3 y 6 kW respectivamente. La salida de corriente continua (CC), después de la fase de rectificación, es de 24 y 48 V, respectivamente. El rendimiento técnico de las pequeñas turbinas eólicas

(SWT, por sus siglas en inglés) se midió y certificó antes de la instalación y la curva de potencia se muestra en la Figura 70. Bajo las condiciones climáticas en el noroeste de Venezuela, las turbinas eólicas tienen una vida útil estimada de 15 años, suponiendo que se realice el mantenimiento preventivo apropiado, lo que representa un costo promedio anual de 33 $ / kW. Desde 2012, estas turbinas son fabricadas en Venezuela por una empresa pública nacional, lo que ha reducido significativamente los costos de la microrred híbrida.

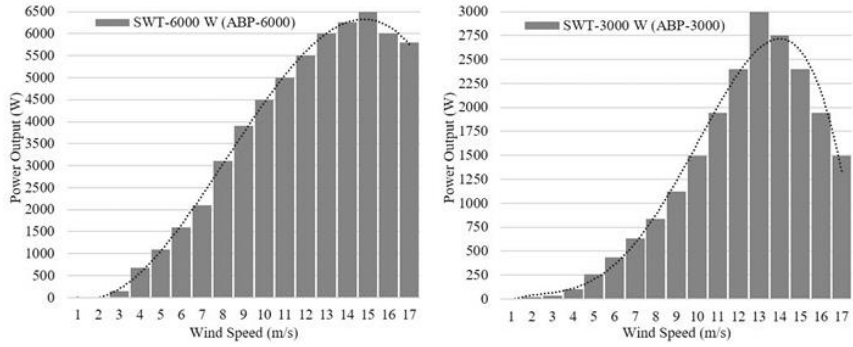


Figura 70 Curvas de potencia de los pequeños aerogeneradores instalados en las microrredes rurales híbridas de Venezuela modelo ABP-3000 y ABP-6000 ensamblados dentro del país

En cuanto a la tecnología solar fotovoltaica, se utilizaron paneles de 150 y 160 Wp de capacidad, hechos de silicio policristalino texturizado con una capa antirreflejante. Dado que la temperatura de trabajo del módulo puede superar los 45 ° C, las pérdidas equivalen a una reducción de potencia de alrededor del 10%. Además, se estima una pérdida de producción del 20% cuando se consideran factores ambientales como el polvo, la sombra o el clima. A lo largo de la fase de diseño, se supuso una vida útil de 25 años, con la aplicación del mantenimiento preventivo adecuado, lo que condujo a un costo anual de operación y mantenimiento (O&M) de 10 $ / kW. La Tabla 47 muestra los paneles fotovoltaicos instalados, dependiendo del número de casas enfocadas. Los paneles han sido fabricados en Venezuela desde 2012, por la misma compañía que produce las turbinas eólicas.

Tecnologías de respaldo diésel y almacenamiento de batería

Las microrredes híbridas se han diseñado con un respaldo de seguridad con generador diésel y un conjunto de baterías para el almacenamiento de energía. Este equipamiento es dimensionado de acuerdo con los recursos energéticos

disponibles, con base en las bases de datos regionales del noroeste de Venezuela, con el objetivo de equilibrar las fluctuaciones en la energía generada por las fuentes eólica y solar. Los sistemas de almacenamiento y respaldo evitan la necesidad de un costoso sobredimensionamiento de generadores eólicos-fotovoltaicos. Además, las baterías almacenan el exceso de electricidad para su uso posterior durante los períodos de menor disponibilidad de recursos energéticos. De esta manera, las horas de funcionamiento del respaldo diésel se minimizan y se procura maximizar la fracción de generación con energía renovable.

En cuanto al sistema de almacenamiento, se utilizaron baterías convencionales de plomo-ácido con líquido electrolítico, ya que eran la opción más barata y confiable. Esta es una tecnología robusta que también tiene una alta seguridad operativa, por lo que se ha utilizado comúnmente en aplicaciones solares y eólicas pequeñas en todo el mundo. La Tabla 47 muestra las baterías instaladas, dependiendo del número de casas alimentadas por la microrred. Las pérdidas de la conversión de energía, así como el estado de carga de la batería (SOC, por sus siglas en inglés) durante la carga y descarga se consideraron durante el diseño y dimensionamiento de la microrred.

Investigaciones previas recomiendan, a través de experimentos prolongados, un SOC superior al 50% como ideal para baterías de plomo-ácido; y un sistema híbrido bien controlado debería mantener dicho nivel de carga durante al menos el 90% del tiempo. Además, las baterías de plomo-ácido utilizadas para aplicaciones RET generalmente están limitadas a un SOC mínimo del 80%. Si se excede este valor, la batería sufre una descarga excesiva, que puede provocar daños permanentes en la batería, acortando su vida útil. Por lo tanto, estos sistemas fueron diseñados para mantener el estado de carga de la batería (SOC) en más del 80%. Además, el tamaño del sistema de almacenamiento se calculó de acuerdo con una autosuficiencia de microrred de 2 días, teniendo en cuenta la complementariedad de los sistemas de generación. El período de autosuficiencia se calcula de acuerdo con el consumo de carga completa (2 kWh / día por vivienda). La vida útil estimada y el costo anual de operación y mantenimiento fueron de 20 años y 2 $ / año / batería, respectivamente.

Con respecto al sistema de respaldo, se utilizaron generadores diésel de 9, 14, 19 y 23 kW para las configuraciones de 10, 20, 30 y 40 casas, respectivamente (Tabla 47). Estos generadores fueron dimensionados para suministrar la carga completa de la microrred durante fallas en la generación renovable y para cargar simultáneamente el conjunto de baterías. El diseño prevé que la energía proporcionada por los generadores diésel nunca superara el 10% de la energía anual de la microrred cuando funcionaba en condiciones normales.

Los costos de operación y mantenimiento se definieron de acuerdo con las horas de operación: 2 $ / h, incluidos los costos de combustible, mientras que la vida útil esperada fue de 15,000 h con tareas de mantenimiento apropiadas, es decir, una vida útil de 10-15 años. La optimización de las microrredes híbridas se logró minimizando el exceso de energía, mientras se maximiza la fracción de generación de energía renovable y se reduce el suministro del generador diésel a menos del 10%. Bajo tales supuestos, el costo por kWh producido se reduce significativamente.

Arquitectura de las microrredes y estrategia de control

Todas las configuraciones para las microrredes híbridas diseñadas utilizan arquitecturas mixtas CA / CC, ya que permiten la conexión directa entre los sistemas de generación dependiendo de la potencia de salida. A este respecto, el respaldo diésel está conectado a un bus de Corriente Alterna (CA), mientras que hay buses de Corriente Continua (CC) separados para los generadores basados en RET (módulos fotovoltaicos y turbinas eólicas) y el sistema de almacenamiento de baterías. Por lo tanto, estas microrredes tienen una arquitectura paralela mixta con inversores de potencia bidireccionales, que incluyen un maestro y varios esclavos, instalados entre los dos buses. El maestro es responsable de la gestión de la energía, controlando la producción de energía, la carga de la batería y el encendido y apagado del diésel. Los esclavos tienen una función similar, pero bajo el control del convertidor maestro. Con esta arquitectura, se pueden lograr importantes beneficios de control. La Figura 71 muestra un diseño de esta arquitectura mixta CA / CC.

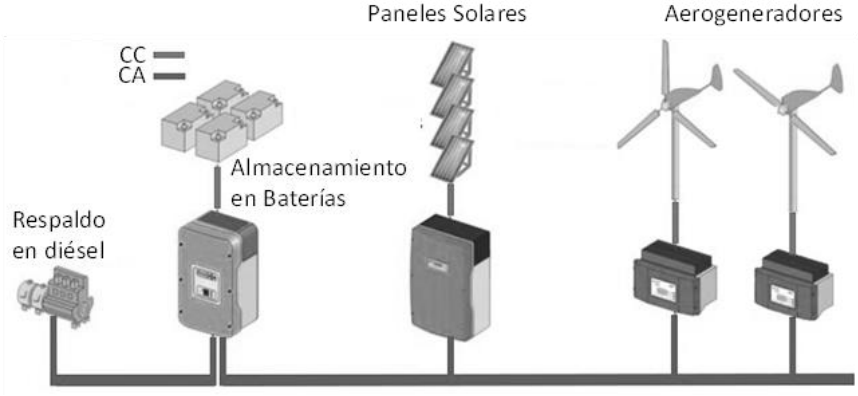


Figura 71 arquitectura mixta CA / CC en las microrredes rurales híbridas de Venezuela

La estrategia de control general prioriza a las fuentes basadas en RET, priorizando la energía fotovoltaica en lugar de la generación de viento, ya que las SWT son máquinas rotativas que requieren un mantenimiento más frecuente que los módulos fotovoltaicos. Además, la estrategia de control tiene tres objetivos esenciales: 1) cubrir de manera confiable y segura el suministro de electricidad a las cargas; 2) para minimizar el consumo de combustible y los costos de mantenimiento del sistema de respaldo, y 3) para optimizar la vida útil de las baterías y el generador diésel. Para hacerlo, se establecen algunos valores límite predefinidos en los reguladores de carga y los inversores de batería. Dependiendo del SOC, el inversor de batería genera una señal de arranque / parada para el generador diésel. Para garantizar una eficiencia óptima en el consumo de combustible, el generador diésel debe funcionar a plena potencia cuando los generadores o baterías basados en RET no pueden suministrar la demanda máxima (SOC> 80%). Por lo tanto, el inversor de batería regula la corriente del generador para garantizar que permanezca en su punto de funcionamiento óptimo, incluso contra cambios repentinos en la carga. El objetivo es que el generador diésel funcione siempre con la máxima eficiencia para consumir alrededor de 10-20% menos de combustible por kWh producido de lo que lo haría bajo un régimen al 50-75% de la capacidad nominal. Finalmente, el inversor de batería también monitorea el nivel de calentamiento y carga para minimizar la frecuencia de mantenimiento y extender significativamente la vida útil de la batería. La Figura 72 muestra ejemplos de las cuatro configuraciones de microrredes diferentes instaladas en el noroeste de Venezuela.

Modelo de gestión comunitaria de las microrredes

El modelo de gestión fue desarrollado por Fundelec teniendo en cuenta la estructura de los Consejos Comunales (CC). Fundelec actúa como la Autoridad Autónoma para la Electrificación Rural (AARE, por sus siglas en inglés), trabajando en colaboración con Corpoelec, la Compañía de Servicios Eléctricos (ESC, por sus siglas en inglés). Ambas instituciones públicas están adscritas al Ministerio de Electricidad de Venezuela, como la Entidad Reguladora del sector eléctrico (RE, por sus siglas en inglés). El RE es responsable de promover, financiar y apoyar proyectos para el desarrollo sostenible en las comunidades electrificadas por la AARE. En cada comunidad, el CC designa un operador comunitario (CO, por sus siglas en inglés). El CC fija y recauda las tarifas de electricidad, luego de la aprobación de la tarifa por parte de las asambleas de usuarios (UA, por sus siglas en inglés). Las tarifas de electricidad se utilizan para cubrir tareas de mantenimiento menores llevadas a cabo por el CO. El CO está capacitado por la AARE para asumir la responsabilidad de las siguientes actividades: mantenimiento de baterías y generadores diésel, recarga de combustible,

limpieza de paneles fotovoltaicos y alrededores de microrred, etc. Además, el CO está capacitado para optimizar el uso de combustible durante fallas en generadores de energía eólica o baterías. Finalmente, el CO debe notificar a la AARE en caso de averías importantes.

Figura 72 Ejemplos de microrredes híbridas de diferentes arquitecturas: (A) SH-40 en Cusia, (B) SH-30 en Wososopo, (C) SH-20 en La Macolla y (D) SH-10 en Jacuque

Discusión sobre la sostenibilidad de las microrredes rurales híbridas en Venezuela

Dimensión ambiental

La dimensión ambiental se evalúa considerando el posible impacto de las microrredes híbridas en el medio ambiente, los recursos naturales y los ecosistemas de las ubicaciones de la comunidad. Este impacto puede reflejarse a nivel local, regional y global. Por ejemplo, el uso de combustible o lámparas de queroseno tiene un efecto sobre la contaminación del aire dentro de las casas (impacto local), la deforestación (impacto regional) y la concentración atmosférica de emisiones de gases de efecto invernadero (impacto global). Se han definido 3 criterios para evaluar la dimensión de sostenibilidad ambiental:

- Impacto en los ecosistemas locales: en ninguna de las 13 comunidades visitadas se han producido residuos contaminantes. Del mismo modo, no se ha encontrado ningún impacto negativo en la flora o la fauna de los ecosistemas de la comunidad, ni siquiera aves muertas por el impacto con los álabes de la turbina. Se reporta un impacto negativo en solo una casa de Falcón, ubicada a menos de 15 m de la turbina eólica, con respecto al ruido de las aspas durante las ráfagas de viento. Por lo tanto, la evaluación para este criterio es positiva.

- Difusión y cambio tecnológicos: antes de la electrificación, la mayoría de las casas tenían generadores diésel individuales. Después de implementar las microrredes híbridas, el 89% de las casas han abandonado estos generadores y solo el 11% los conserva como respaldo. En general, 190 generadores diésel individuales han sido reemplazados como resultado de la conexión de alguna microrred híbrida, en Venezuela. Por lo tanto, la evaluación para este criterio es positiva.

- Mitigación de emisiones: incluso bajo la condición N-1 (falla de algún elemento de generación), las microrredes híbridas tienen un factor de emisión un 80% más bajo que los generadores diésel individuales, un 56% menos que la extensión de la red nacional y un 55% menos que la generación diésel comunitaria. Por lo tanto, la evaluación para este criterio es positiva.

Como resultado de la dimensión ambiental, los tres criterios analizados para la evaluación de la sostenibilidad de las microrredes híbridas son positivos.

Por lo tanto, estos sistemas de electrificación rural en Venezuela son ambientalmente sostenibles.

Dimensión técnica

La dimensión técnica está relacionada con aspectos específicos del funcionamiento de la microrred y podría definirse en términos de seguridad y calidad del suministro de energía. Esto a su vez depende de que el suministro esté disponible de manera regular y confiable y de calidad estándar, de acuerdo con el marco regulatorio nacional. Estos aspectos de la dimensión técnica se integran en otras dimensiones de sostenibilidad, como la ambiental o socioeconómica. En este sentido, la dimensión técnica está estrechamente vinculada al logro del acceso universal a la energía confiable y moderna, de acuerdo con el séptimo objetivo de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. Por lo tanto, se consideran 2 criterios para la evaluación de la sostenibilidad técnica: adecuación y fiabilidad. La adecuación de una tecnología se basa en una comparación con el umbral mínimo de electricidad requerido para satisfacer necesidades energéticas específicas. En cuanto a la confiabilidad, un suministro de energía debe estar disponible de manera regular y confiable para ser considerado adecuado.

- Adecuación: el consumo promedio ponderado por vivienda en las comunidades de Falcón y Zulia es de 1.775 kWh / día, lo que representa el 88.75% del valor considerado durante el diseño. Sin embargo, se puede observar cómo la demanda de energía solar fotovoltaica puede abastecer toda la demanda base, mientras que las turbinas eólicas se utilizan para cubrir las fluctuaciones diarias de la demanda. Además, estos valores de demanda de la comunidad representan entre el 34% y el 95% del consumo eléctrico típico de las casas rurales conectadas al sistema eléctrico del noroeste de Venezuela. En otras palabras, el diseño técnico de las microrredes híbridas venezolanas es consistente con el consumo real de los beneficiarios y la población rural en condiciones socioeconómicas similares. Por lo tanto, la evaluación para este criterio es positiva.

- Confiabilidad: el 76.1% de los usuarios finales considera que las microrredes híbridas tienen una baja tasa de fallas y el 64.8% percibe una corta duración de las fallas. Las fallas y su duración están directamente relacionadas con la calidad del mantenimiento y el tiempo de las reparaciones. Sin embargo, el factor fundamental es el dimensionado y los valores de diseño considerados para estos proyectos. De hecho, gracias al rendimiento altamente confiable del sistema, la consistencia de la capacidad de generación,

almacenamiento y respaldo de las microrredes híbridas con consumo promedio en comunidades electrificadas es favorable. El consumo promedio anual de las comunidades no excede en ningún caso el 63% de la capacidad de generación. Por lo tanto, la evaluación para este criterio es positiva.

Como resultado, en la dimensión técnica, los 2 criterios implementados para la evaluación de microrredes híbridas son positivos, por lo que esta tecnología puede considerarse técnicamente sostenible.

Dimensión socioeconómica

Esta es la dimensión más compleja de la sostenibilidad, ya que todos los criterios considerados para la evaluación están vinculados a otra dimensión. Como los criterios sociales y económicos están estrechamente relacionados, se propone una sola dimensión. En ambos aspectos, los criterios de evaluación deben estar relacionados con las características del desarrollo sostenible, establecidas en el informe Brundtland y analizadas en detalle por Munasinghe para el campo específico de la energía. En términos sociales, los criterios de evaluación incluyen los conceptos de empoderamiento comunitario, inclusión y gobernanza. Los aspectos clave para garantizar la sostenibilidad social de las microrredes híbridas son: la participación de los usuarios finales (empoderamiento), la promoción de la equidad en el acceso a la energía y los servicios básicos como la educación y la salud (inclusión) y la reducción de la vulnerabilidad social en términos de las tasas de deserción escolar, analfabetismo y enfermedades. La gobernanza está relacionada con el fortalecimiento de las instituciones involucradas y los valores sociales que se mejoran a través de la educación. En consecuencia, se consideran 3 criterios para la evaluación de la sostenibilidad social: educación, salud y participación comunitaria. Por otro lado, en términos económicos, se consideran 3 criterios: la asequibilidad y la sostenibilidad de las tarifas eléctricas, la mejora de la productividad y la reducción de la pobreza energética. Por lo tanto, se consideran tres aspectos clave respectivamente: equidad energética, crecimiento productivo y pobreza energética. La equidad está relacionada con la capacidad de pagar y tener acceso a un servicio eléctrico de calidad, con un suministro confiable que permite llevar a cabo actividades productivas. El crecimiento productivo está relacionado con la capacidad de aumentar los ingresos mediante el uso de electricidad. Con respecto a la pobreza energética, no se ha alcanzado un consenso sobre su naturaleza y definición. Sin embargo, los indicadores cuantitativos más comunes son: (1) Ingreso bajo, costo alto (LIHC, por sus siglas en inglés), (2) Estándar mínimo (MIS, por sus siglas en inglés) y (3) La regla del diez por ciento (TPR, por sus siglas en inglés). Por un lado, los indicadores LIHC y MIS son muy precisos en contextos locales, pero generalmente son

complejos de estimar a nivel regional o internacional. Por otro lado, el TPR es más fácil de estimar y considera pobre en energía a aquellas personas que tienen que gastar más del 10% de sus ingresos netos en servicios de energía adecuados. De hecho, gracias a la simplicidad, fácil comunicación y versatilidad del TPR, se ha convertido en el indicador más utilizado para la pobreza energética y es el indicador considerado en esta evaluación.

- Educación: en las comunidades indígenas Wayuú de Zulia, la tasa de educación básica y secundaria ha aumentado después de la instalación de microrredes. Entre los niños de 7 a 12 años (educación básica), la asistencia escolar es un 74,1% más alta que el promedio nacional para las comunidades indígenas rurales. Para edades comprendidas entre los 13 y los 17 años, la asistencia a la educación secundaria es un 66,7% más alta que el promedio nacional de este grupo social. Además, la tasa de analfabetismo es un 64% más baja que el promedio nacional indígena. Por otro lado, las comunidades no indígenas de Falcón no muestran mejoras significativas en las tasas de educación ya que esas comunidades ya estaban en un nivel promedio antes del acceso a la electricidad. En otras palabras, el impacto en la educación es mayor en las comunidades que anteriormente tenían bajos niveles educativos. Finalmente, el 55% de los encuestados en Falcón y Zulia cree que la electrificación ha tenido un impacto positivo en la calidad de la educación de niños y adolescentes. La educación también está relacionada con el acceso a la información y las telecomunicaciones. En este sentido, el 69.0% de las casas indígenas electrificadas en Zulia y el 78.6% en Falcón han adquirido un televisor desde la electrificación. Además, en el 42% de las casas en Falcón, un miembro de la familia tiene acceso regular a internet; Esta cifra es casi 10 veces mayor que en las aldeas cercanas (4,65%). Por lo tanto, la evaluación para este criterio es positiva.

- Salud: después de la electrificación, el 47,6% de las casas en Zulia y el 64,3% en Falcón pudieron instalar refrigeradores o congeladores, un paso muy importante teniendo en cuenta que la temperatura media anual supera los 30ºC. En las comunidades indígenas de Zulia, esto es 62% más alto que el promedio de la población Wayuú no electrificada. Teniendo en cuenta que muchas comunidades tienen una dieta basada en mariscos y carne de chivo, la refrigeración evita la mayoría de los patógenos, por lo que los alimentos se mantendrán seguros durante más tiempo. También permite la conservación de alimentos para niños menores de 5 años, reduciendo así la mortalidad infantil. Además, la iluminación eléctrica reemplaza las

lámparas de queroseno. Estos últimos producen gases y partículas que dañan los pulmones, lo que aumenta las tasas de enfermedades como la tuberculosis, el asma o el cáncer. Los factores anteriormente mencionados son determinantes en la prevención de enfermedades como la COVID-19. Por lo tanto, la evaluación para este criterio es positiva.

- Participación de la comunidad: El 65.5% de los beneficiarios considera que los operadores comunitarios (CO) están bien capacitados y han sido eficientes en el mantenimiento de microrredes híbridas. En general, los Consejos Comunales (CC) gestionan las microrredes de manera eficiente. La recaudación de tarifas de electricidad es efectiva, dada la aceptación de los CO entre los usuarios finales. Además, los beneficiarios se han apropiado de los sistemas de electrificación y aseguran el mantenimiento adecuado de los equipos después de 5 años de operación continua. En este sentido, el modelo de gestión participativa ha permitido mantener operativas las instalaciones basadas en RET durante ese tiempo. Sin embargo, la mayoría de los usuarios sugieren la necesidad de un cambio en el modelo de gestión para hacer que las microrredes híbridas sean más autosuficientes y autónomas del sector eléctrico nacional. Por lo tanto, la evaluación de este criterio muestra elementos de la dimensión social que necesitan mejoras.

- Asequibilidad y sostenibilidad de las tarifas de electricidad: los usuarios finales pagan entre $ 1 y $ 3 por casa por mes para cubrir costos menores de operación y mantenimiento. Esta tarifa se establece a través de Asambleas de usuarios (UA) y puede variar de acuerdo con los gastos de las actividades de mantenimiento cada mes. Sin embargo, el monto recaudado ni siquiera cubre el 10% de los costos anuales de operación y mantenimiento, O&M (incluidos los gastos asumidos por el gobierno y gratuitos para los beneficiarios), ni se recuperan los costos de capital. Por lo tanto, las tarifas actuales de electricidad son, por un lado, asequibles. Por otro lado, no permiten que las comunidades sean autosuficientes. En consecuencia, la sostenibilidad económica a mediano y largo plazo no está garantizada bajo este esquema. De hecho, el 68.5% de los usuarios finales considera que la tarifa debe ser fija y cubrir todos los gastos anuales de O&M. Por lo tanto, la evaluación de este criterio muestra elementos de la dimensión social que necesitan mejoras.

- Reducción de la pobreza energética: se estudia el costo financiero para las familias, considerando los ingresos mensuales promedio.

Primero, como el 89% de los beneficiarios han dejado de usar la generación individual diésel, las microrredes híbridas han reducido el costo de la electricidad en un 90% (principalmente costos de ahorro de combustible), lo que permite a las familias superar la pobreza energética. El costo financiero ahora está por debajo del umbral de pobreza energética, que generalmente se considera alrededor del 10% del presupuesto familiar mensual. Por lo tanto, este criterio muestra una reducción efectiva de la pobreza energética, que es positiva con respecto al diésel individual.

- Mejora en la productividad: se determinan las actividades productivas y el ingreso promedio por hogar y persona en cada comunidad. Según un estudio realizado por el Banco Central de Venezuela, el ingreso rural promedio per cápita en 2005 para las comunidades no electrificadas fue de $ 2,10 / día. Según las encuestas de usuarios finales, el ingreso promedio ponderado per cápita en las comunidades no indígenas es de $ 4,02 / día, mientras que para la población indígena este valor es de $ 0,99 / día. Por lo tanto, el 28,8% de los beneficiarios de la microrred híbrida ha aumentado sus ingresos después de la electrificación, con un crecimiento de ingresos promedio del 60,1%. El mayor aumento se observa en las comunidades pesqueras de Prudencio y La Macolla (Falcón), donde se han otorgado microcréditos gubernamentales para la adquisición de embarcaciones y motores fuera de borda. Entre las tres actividades principales en las comunidades objetivo (pesca, cría de cabras y artesanías), el ingreso promedio de las actividades pesqueras supera a las demás. Esto se debe al impacto de la electrificación, que ha llevado a un aumento de la pesca gracias a la capacidad de almacenamiento refrigerado. Por otro lado, con respecto a la cría de chivos, las mejoras solo han tenido un impacto en la conservación de los productos lácteos. Esta es una actividad marginal a nivel comunitario, que genera muy pocos ingresos en comparación con la venta directa de cabras, que no necesitan electricidad. Finalmente, con respecto a la fabricación de artesanías, aunque el número de horas de luz para la elaboración ha aumentado, el impacto no es significativo en términos de productividad. Tenga en cuenta que la línea de pobreza se considera en $ 1.90 por persona por día. La mayoría de la población indígena electrificada con microrredes híbridas permanece por debajo de este umbral; mientras que las familias no indígenas en su mayoría superan ese valor. La mejora en la productividad es desigual, ya que algunos aspectos de la población no fueron considerados durante el diseño del programa. Por lo tanto, la evaluación de este criterio muestra elementos de la

dimensión social que necesitan mejoras.

Como resultado de la dimensión socioeconómica, existe una clara diferencia entre los resultados sociales y económicos. En las comunidades indígenas Wayuú (Zulia), la mejora socioeconómica se centra en aspectos sociales, donde se han observado avances muy positivos en educación y salud. Por otro lado, en las comunidades no indígenas (Falcón), que ya tenían mejores niveles de educación y salud, la mejora es más significativa en los aspectos económicos y productivos. Luego, se puede inferir que habrá una mejora económica para la población wayuú a mediano y largo plazo, una vez que se consoliden sus condiciones sociales. En resumen, las microrredes híbridas promueven el desarrollo sostenible de la dimensión socioeconómica, aunque a tasas diferentes dependiendo de las condiciones previas de los beneficiarios. Por lo tanto, las microrredes híbridas son sostenibles en su dimensión socioeconómica.

Dimensión institucional

La dimensión institucional está directamente relacionada con el desempeño ambiental, técnico y socioeconómico. Al evaluar la sostenibilidad institucional se consideran los siguientes criterios: 1) alineamiento institucional y relación con las comunidades, definido como la capacidad de las instituciones para organizar sus funciones, facilitar el desempeño sostenible de los proyectos y establecer una relación positiva con las comunidades; 2) sostenibilidad económica del programa, que es la capacidad institucional para mantener el cumplimiento de los compromisos a medio y largo plazo en términos de sostenibilidad económica del proyecto, y 3) objetivos de desarrollo sostenible y cómo contribuye el programa a su logro.

- Alineamiento institucional y relación con las comunidades: el 74.4% de las comunidades indígenas (Zulia) y el 55.2% de las no indígenas (Falcón) consideran que las instituciones no han sido diligentes en llevar a cabo sus tareas de O&M asignadas, de acuerdo con el modelo de gestión. Por lo tanto, están dispuestos a pagar más por el servicio de electricidad a cambio de expandir su capacidad de gestión para las tareas de operación y mantenimiento y aumentar su autosuficiencia. Sin embargo, cuando la alineación institucional es efectiva, se pueden observar mejoras productivas. Por ejemplo, se otorgaron microcréditos en La Macolla y Prudencio (Falcón), lo que condujo a un aumento de la productividad y los ingresos. Otro aspecto positivo con respecto al alineamiento institucional se observa en las comunidades indígenas. Aquí, un claro aumento en la tasa de asistencia escolar es el resultado de una mayor disponibilidad de maestros, gracias a incentivos salariales y mejores condiciones

debido a la electricidad. Sin embargo, los ingresos per cápita no han aumentado para la población indígena, ni siquiera por encima de la línea de pobreza. Por lo tanto, este criterio muestra que la alineación institucional ha sido efectiva en la promoción del desarrollo social, mientras que para el desarrollo económico solo se ha confirmado una mejora parcial, especialmente para la población con algún nivel educativo previo.

- Sostenibilidad económica del programa: teniendo en cuenta el número total de viviendas electrificadas con microrredes híbridas y la proyección de ahorros en costos de oportunidad para el combustible durante un período de 20 años, la tasa interna de retorno (% IRR, por su siglas en inglés) de las configuraciones de las microrredes son: 6.2%, 8.2%, 11.2% y 13.0% para sistemas de hasta 10, 20, 30 y 40 casas, respectivamente. En ningún caso se supera el umbral del 15% establecido por la compañía petrolera estatal venezolana para tales programas. Para que el programa sea económicamente sostenible a nivel institucional, se debe establecer una tarifa adicional en las condiciones descritas en la evaluación del criterio SE-4 (Sección 3.3). Por lo tanto, este criterio muestra que se deben tomar medidas para garantizar, a través del apoyo económico, la sostenibilidad a mediano y largo plazo de dichos programas en Venezuela.

- Objetivos de desarrollo sostenible: la electrificación rural con microrredes híbridas tiene un impacto en 15 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos en la Agenda 2030 de la ONU. Todas las dimensiones de sostenibilidad evaluadas en las secciones anteriores tienen uno o más objetivos dentro de las metas del desarrollo sostenible, lo que demuestra el amplio impacto de la electrificación para alcanzar los objetivos institucionales nacionales y mundiales. Por lo tanto, este criterio muestra una dirección positiva del programa en cuanto al cumplimiento de estos objetivos, al menos a corto y mediano plazo. Por lo tanto, la evaluación para este criterio es positiva.

Como resultado de la evaluación de la dimensión institucional, se deben hacer algunas mejoras para consolidar el desarrollo económico del programa a mediano y largo plazo, en relación con el mantenimiento por parte de las instituciones responsables de tales tareas. Por lo tanto, la percepción de los beneficiarios de la sostenibilidad económica del programa mejorará si la AARE lleva a cabo las actividades de mantenimiento requeridas con prontitud. Por otro lado, los vínculos institucionales deberían fortalecerse

para promover el desarrollo de la productividad, no solo en comunidades con experiencia previa.

Lecciones aprendidas de las microrredes híbridas en Venezuela

Primero, la combinación de las tecnologías eólica y solar es positiva y permite que se brinde un servicio de electricidad continuo y confiable por hora, día, temporada y año. En este sentido, se puede observar que el diseño y el dimensionado de las microrredes híbridas en Venezuela han tenido un soporte básico de la carga en la generación solar fotovoltaica. Mientras tanto, la generación eólica tiene como objetivo cubrir las fluctuaciones diarias en los perfiles de demanda de las comunidades. En otras palabras, aunque en términos globales la generación fotovoltaica satisface la demanda de energía, en términos relativos el viento es necesario para evitar cortes de suministro causados por picos de demanda por hora o por día. Por lo tanto, la utilidad de las SWT se demuestra en regiones con suficientes recursos eólicos. Los resultados también muestran que, mientras las casas estén distribuidas adecuadamente, las microrredes híbridas son más adecuadas y confiables que los sistemas individuales (sistemas solares domésticos o turbinas eólicas domésticas). También se ha determinado, que los factores de emisión son aún más bajos que los de la extensión de la red nacional y los generadores diésel comunitarios o individuales, incluso en condiciones de falla del equipo (condición N-1). Por lo tanto, la combinación de tecnologías para el diseño y dimensionamiento de microrredes híbridas es fundamental para alcanzar altos niveles de adecuación y confiabilidad. Esto promueve un cambio tecnológico hacia sistemas de electrificación que contaminan menos que los generadores diésel, reduciendo así el impacto ambiental. En definitiva, las microrredes han promovido una mejora de la dimensión ambiental de la sostenibilidad en las comunidades beneficiarias.

En segundo lugar, la adecuación y la confiabilidad de las microrredes híbridas tienen un impacto en los usos de energía del usuario final, que a su vez determinan las mejoras en las dimensiones ambiental y socioeconómica. En este sentido, los niveles de acceso a la energía han permitido que la mayoría de las casas beneficiadas indígenas y no indígenas tengan televisores y refrigeradores, en porcentajes más altos que el promedio para comunidades similares no electrificadas de la región Zulia-Falcón. Teniendo en cuenta los niveles de pobreza en esas comunidades, los bajos costos de electricidad han sido un factor importante para lograr el cambio tecnológico. En consecuencia, se produce una mejora significativa de la dimensión ambiental mediante la sustitución de generadores diésel individuales utilizados anteriormente en las comunidades. Por lo tanto, se establece una relación

clara entre la adecuación del diseño de las microrredes híbridas (dimensión técnica) y la mitigación de emisiones (dimensión ambiental). Además, el acceso a las telecomunicaciones y refrigeradores tiene una repercusión positiva en las condiciones de educación y salud (dimensión socioeconómica). Esto muestra la relación entre las dimensiones de sostenibilidad ambiental, técnica y socioeconómica.

En tercer lugar, el acceso a la electricidad tiene un mayor impacto en los aspectos sociales de la dimensión socioeconómica en las comunidades con niveles de desarrollo más bajos (pueblos indígenas Wayuú de Zulia), mientras que tiene un mayor impacto en los aspectos económicos en las comunidades con niveles de desarrollo previo más altos (Falcón). Esto es particularmente relevante cuando se observan los criterios de educación y salud de la población Wayuú, así como los criterios de mejora de la productividad de las comunidades no indígenas. Esto demuestra cómo el impacto de la electrificación rural en la dimensión socioeconómica de las comunidades está directamente relacionado con su desarrollo social antes del acceso a la electricidad.

Finalmente, la población está comprometida con el mantenimiento de microrredes híbridas a través de la participación comunitaria. Por lo tanto, una alineación institucional adecuada es fundamental para las partes interesadas en la electrificación rural: la entidad reguladora, las comunidades y otras instituciones involucradas en el desarrollo rural. Esta alineación debe mejorarse progresivamente para garantizar la sostenibilidad económica de estos programas. Solo así se puede garantizar que las comunidades reciban tanto la electrificación como el apoyo institucional para sus necesidades socioeconómicas específicas, a fin de avanzar hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

COMENTARIO FINAL: Un futuro sostenible para Venezuela

Durante la etapa de Democracia Participativa (1999-2014), así como en los cuarenta años de Democracia Representativa (1958-1999), se ha repetido el esquema de dependencia petrolera dentro del sector eléctrico. Entre 2004 y 2014, se ha repetido lo sucedido entre 1973 y 1988, cuando los altos precios y la nacionalización llenaron las arcas públicas y fomentaron el crecimiento en la capacidad eléctrica y el aún mayor crecimiento en el consumo eléctrico. Lo mismo sucedió más tempranamente, entre 1947 y 1958, cuando producto de los acuerdos geopolíticos posteriores a la segunda guerra mundial, se construyeron refinerías que permitieron producir combustibles suficientes para incrementar la capacidad termoeléctrica y electrificar la mayor parte del país. Desde entonces, la historia del sector eléctrico en Venezuela gira en torno de la dependencia petrolera.

Las crisis terminales de los períodos previamente mencionados han impactado directamente en la calidad del servicio eléctrico debido a la dependencia de los ingresos petroleros. Sin embargo, ambas crisis se diferencian en la profundidad de sus causas. En el caso de la crisis eléctrica al final de la Democracia Representativa, la afectación alcanzó el nivel de distribución y comercialización de la electricidad; es decir, el mantenimiento de los sistemas de transmisión y generación era adecuado. Por otro lado, durante el período de DP, la dependencia petrolera y las bajas tarifas acentuaron la dependencia hasta el punto de que el mantenimiento fue financiado directamente por el fisco nacional y, en consecuencia, las fallas en el sistema se presentan no sólo en la distribución, sino también en la transmisión y, fundamentalmente, en la generación por indisponibilidad de las unidades termoeléctricas de gasoil. Esto evidencia que la dependencia petrolera del sector eléctrico ha ido creciendo y es ahora más profunda e insostenible.

Todas las tecnologías que empleen recursos fósiles nacionales como fuente primaria de energía para generar electricidad (carbón, coque, gas y/o gasoil) profundizarán el modelo de dependencia rentista del sector eléctrico venezolano. Si se considera la potencialidad en energías renovables del país, la transición a un sistema eléctrico basado en energías renovables alternativas (no hidroeléctricas) sería económicamente factible si se toman en cuenta los elevados costos de oportunidad por consumo doméstico de hidrocarburos nacionales, como el gasoil y otros derivados. En Venezuela, el uso de energías renovables para generar electricidad, más que un asunto medioambiental, es un tema de sostenibilidad económica del sistema eléctrico, en un país que ha sido cada vez más dependiente de la renta petrolera. Ninguno de los

gobiernos, desde 1958 hasta 2014, ha promovido cambios realmente sustanciales que promuevan la sostenibilidad del sector eléctrico nacional y la historia de esta industria nacional ha sido de una deriva cada vez más intensa hacia la dependencia de la renta petrolera. Para iniciar la transformación del sector eléctrico venezolano y reducir la dependencia de los combustibles domésticos, se ha de comenzar con el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables de la región noroccidental del país (Zulia-Falcón), partiendo de las siguientes premisas:

- A partir de datos satelitales y en consideración de las condiciones de interconexión eléctrica, se tiene que 35% del territorio del estado Zulia y el 20% del territorio del estado Falcón, presentan condiciones económicamente favorables para el aprovechamiento solar fotovoltaico. En cuanto a la energía eólica, las cifras estimadas son del 8% y 15% para Zulia y Falcón, respectivamente.

- La capacidad eléctrica instalada en la región noroccidental es la segunda en el país, sólo superada por las centrales hidroeléctricas del sur (estado Bolívar). Las centrales termoeléctricas de Zulia y Falcón consumen, para generación eléctrica, más de 7 millones de litros de gasoil al año, producido en las refinerías nacionales lo que representa un elevado costo de oportunidad para el país.

- El estado Zulia es el más poblado de Venezuela, concentra el 14% del total nacional y, juntamente con Falcón, suman una población de 4,7 millones de personas. Por tanto, la densidad poblacional de la región es más alta que en el 86% del territorio venezolano. Si se considera que el consumo eléctrico es cada vez más residencial, toda transformación del sector debe iniciarse por las zonas de mayor concentración poblacional, es decir, por el estado Zulia.

- En la región se presenta el mayor consumo eléctrico por hogar, en el país.

- Las capitales de los estados Zulia y Falcón se encuentran en el extremo occidental del país, al final del sistema troncal de transmisión en 765 kV, a más de 1.100 kilómetros del 70% de la capacidad eléctrica de generación del país (centrales hidroeléctricas del sur del país). Por tanto, instalar capacidad de generación alternativa en este punto mejoraría la estabilidad del sistema interconectado nacional.

ACERCA DEL AUTOR

Alejandro López-González es Ingeniero Electricista por La Universidad del Zulia (Maracaibo, Venezuela) y Doctor en Sostenibilidad-Cum Laude- por la Universidad Politécnica de Catalunya (Barcelona, España). Premio Extraordinario de la Universidad Politécnica de Cataluña por su tesis doctoral defendida durante el período 2018/2019. López-González tiene maestrías en Generación Eléctrica a partir de fuentes renovables de energía por la Universidad Pública de Navarra (Pamplona, España) e Ingeniería Energética por la Universidad Politécnica de Madrid (Madrid, España). Ha trabajado como Ingeniero de Estudios del Sistema Eléctrico en Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA) y como auditor de Sistemas de Generación Eléctrica en el Ministerio de Energía Eléctrica de Venezuela. Ha sido profesor asociado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica e imparte docencia en la Escuela Superior de Ingenierías Industrial, Aeroespacial y Audiovisual de Terrassa (España) en asignaturas de diseño de sistemas solares y eólicos, automatización industrial y sistemas eléctricos e instrumentos. Su actividad de investigación, en el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales de la UPC (IOC-UPC), se centra, por un lado, en el diseño de métodos para la optimización de microrredes híbridas y métodos de evaluación de la sostenibilidad en sistemas energéticos en países en desarrollo. Ha participado en numerosos proyectos de investigación y cooperación al desarrollo en Venezuela y es autor o coautor de numerosos artículos publicados en revistas científicas internacionales de referencia en el Journal Citations Report (EP, RSER, Energy, entre otras). Es profesor invitado en el área de postgrado en el Centro Socioeconómico de Petróleo y las Energías Alternativas (CESPE-LUZ) de La Universidad del Zulia (Maracaibo, Venezuela) y en La Universidad "José Martí" de Sancti Spiritus -UNISS- (Sancti Spiritus, Cuba). E-mail ae.lopez.gonzalez@gmail.com

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

REN21. Renewables 2016: Global Status Report. Paris: 2016.

SEforAll. SUSTAINABLE ENERGY FOR ALL STRATEGIC FRAMEWORK FOR RESULTS | 2016-21. Vienna: 2016.

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.

UN. Energía Sostenible para Todos: un Programa Mundial de Acción. vol. A/67/175. New York: 2012.

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.

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.

Bloomberg. 3Q 2017 Frontier Power Market Outlook. NY: 2017.

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.

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.

IEA. Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity. Paris: 2017.

Venkataramanan G, Marnay C. A larger role for microgrids. IEEE Power Energy Mag 2008:78–82.

NASA. POWER Data Access Viewer. Predict Worldw Energy Resour 2018.

https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ (accessed November 7, 2018).

IRENA. Renewable capacity statistics 2016. Abu Dhabi: 2017.

IRENA. 2016 a Record Year for Renewables, Latest IRENA Data Reveals. Renew Energy Capacit Stat 2017 2017. http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=A&mnu=cat&PriMenuID=16&CatID=84&News_ID=1486 (accessed April 26, 2017).

United Nations. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. 2015. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.

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.

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).

MINEM. Plan Nacional De Electrificacion Rural (Pner) Periodo 2013 - 2022. Lima: 2012.

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.

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.

Peredo Echazú R, Jiménez Rivera H, Gonzáles Flores JM. Plan de Universalización Bolivia con Energía 2010-2025 2010:1–28.

MEER. FERUM – Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. Fondo Electrif Rural Urbano y Marg 2017. http://www.energia.gob.ec/ferum/ (accessed January 23, 2017).

Tech4CDM. La Electrificación Rural en ECUADOR. Quito: 2009.

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.

Kyte R. Learning from the success stories. Sustainable energy for all is possible through sharing good examples. World Energy Focus 2017:3–4.

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.

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.

Urmee T, Harries D, Holtorf H-G. Success and Sustainability Criteria and Issues for SHS Programmes. Photovoltaics Rural Electrif. Dev. Ctries. A Road Map, Cham: Springer International Publishing; 2016, p. 79–107. doi:10.1007/978-3-319-03789-9_4.

Mason M. Rural electrification: a review of World Bank and USAID financed projects. Washington, D.C.: 1990.

Zomers A. The challenge of rural electrification. Energy Sustain Dev 2003;7:69–76. doi:10.1016/S0973-0826(08)60349-X.

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.

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.

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.

Merino M. Fundamentos de evaluación de políticas públicas. Madrid: 2010. doi:10.1073/pnas.0703993104.

Santos SP, Amado CAF, Rosado JR. Formative evaluation of electricity distribution utilities using data envelopment analysis. J Oper Res Soc 2011;62:1298–319.

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.

Wholey JS. Formative and Summative Evaluation: Related Issues in Performance Measurement. Evalutation Pract 1996;17:145–9. doi:10.1177/109821409601700206.

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.

Eleanor C. Differing perspectives of evaluation. New Dir Progr Eval 1978;2:1–18.

Khodayar ME. Rural electri fi cation and expansion planning of o ff -grid microgrids. Electr J 2017;30:68–74. doi:10.1016/j.tej.2017.04.004.

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.

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.

Brundtland GH. Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. Med Confl Surviv 1987;4:300. doi:10.1080/07488008808408783.

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).

Brown KG, Brown KG, Gerhardt MW, Gerhardt MW. Formative Evaluation: an Integrative Practice Model and Case Study. Pers Psychol 2002;55:951–83.

Ilskog E. Rural electrification sustainability indicators:-Manual for field workers 2008.