



CEC  
CCA  
CCE

# Transición de comunidades remotas a energías renovables



## Citar como

CCA (2026), *Transición de comunidades remotas a energías renovables*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 101 pp.

La presente publicación fue elaborada por Rob Jordan, David Martínez Biro, María Teresa Aguirrezabala Cárpano y Rebecca Meadows para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. La información que contiene es responsabilidad de sus realizadores y no necesariamente refleja los puntos de vista de la CCA o de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos o México.

Se permite la reproducción —total o parcial— de este documento sin previa autorización, siempre y cuando se haga con absoluta precisión, su uso tenga fines educativos y no lucrativos, y se cite debidamente la fuente, con el correspondiente crédito a la Comisión para la Cooperación Ambiental. La CCA apreciará que se le envíe una copia de toda publicación o material que utilice este trabajo como fuente.

A menos que se indique lo contrario, el presente documento está protegido mediante licencia de tipo “Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada”, de Creative Commons.



© Comisión para la Cooperación Ambiental, 2026

ISBN: 978-2-89700-427-9

Available in English  
ISBN: 978-2-89700-426-2

Disponible en français  
ISBN: 978-2-89700-428-6

Depósito legal: Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2026  
Depósito legal: Library and Archives Canada, 2026

## Créditos fotográficos

La mayoría de las fotografías de este informe fueron tomadas por el equipo de la CCA y por *Dare to Know, LLC* durante las visitas de campo a las comunidades incluidas en este estudio. Agradecemos también las imágenes compartidas por:

Índice, Lista de cuadros y Lista de gráficas: BNA  
Página 19: Northern Energy Capital  
Página 34: Northern Energy Capital  
Página 35: Northern Energy Capital  
Página 36: Northern Energy Capital  
Página 37: Northern Energy Capital  
Página 38: Northern Energy Capital  
Página 41: Sunstone Electric  
Página 42: Sunstone Electric  
Página 43: Sunstone Electric  
Página 44: Sunstone Electric  
Página 45: Sunstone Electric  
Página 51: Laboratorio Nacional de Energía Renovable  
Página 88: BNA  
Página 90: Sunstone Electric  
Página 92: Sunstone Electric

## Detalles de la publicación

Categoría del documento: publicación de proyecto  
Fecha de publicación: Marzo, 2026  
Idioma original: inglés  
Procedimientos de revisión y aseguramiento de la calidad:  
Revisión final de las Partes: Octubre, 2025  
QA 413  
Proyecto: Plan Operativo 2022 / Transición de comunidades remotas a energías renovables

## Si desea más información sobre esta y otras publicaciones de la CCA, diríjase a

**Comisión para la Cooperación Ambiental**  
1001 Robert-Bourassa Boulevard, bureau  
1620 Montreal, Quebec, Canada H3B 4L4  
Tel.: (514) 350-4300 fax: (438) 701-1434  
Correo-e: [info@cec.org](mailto:info@cec.org) / [www.cec.org](http://www.cec.org)

# Índice

Sinopsis	9
Resumen ejecutivo	10
Prefacio	11
Agradecimientos	12
<b>1 Introducción</b>	<b>14</b>
<b>2 Estudios de caso de Canadá</b>	<b>17</b>
Contexto	17
Con arraigo en su visión y el impulso de la comunidad: la transición energética de Bingwi Neyaashi Anishinaabek	20
Aprovechando el río, fortaleciendo a la comunidad: el proyecto hidroeléctrico Innavik en Inukjuak	26
Honrando el pasado, energizando el futuro: el legado energético de la Primera Nación Kwanlin Dün	31
<b>3 Estudios de caso de Estados Unidos</b>	<b>37</b>
Contexto	37
El poder de lo colectivo: la transición energética colaborativa de Shungnak y Kobuk en el distrito de Nortwest Arctic	39
Desatar el potencial de la microrred de Borrego Springs: una historia de superación de desafíos	45
Sobrevivientes solares: la luz después de la tormenta de Toro Negro	52
<b>4 Estudios de caso de México</b>	<b>58</b>
Contexto	58
Estrategias federales para ampliar la energía no conectada a la red	60
Llueva o truene: superando los desafíos climáticos con energía solar en Yolochochio-Zongolica	69

Acortando distancias: resiliencia energética en San José de Natora	75
Iluminando el Camino: acceso a la energía y cooperación en Magdalena Aguilar	80
<b>5 Temas comunes en la transición hacia la energía renovable de comunidades remotas e indígenas de América del Norte</b>	<b>85</b>
Bibliografía	91
<b>Anexo. Políticas que apoyan los proyectos de electrificación rural</b>	<b>97</b>
Canadá	97
Estados Unidos	98
México	99

# Lista de cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Localización de las comunidades seleccionadas por país	15
<b>Cuadro 2.</b> Resumen del proyecto de calefacción por biomasa de Bingwi Neyaashi Anishinaabek	22
<b>Cuadro 3.</b> Resultados de las entrevistas sobre el sistema de calefacción por biomasa de Bingwi Neyaashi Anishinaabek por fase de desarrollo del proyecto	23
<b>Cuadro 4.</b> Resumen del proyecto hidroeléctrico Innavik	27
<b>Cuadro 5.</b> Resultados de las entrevistas por fase de desarrollo del proyecto hidroeléctrico de Innavik	28
<b>Cuadro 6.</b> Resumen del proyecto de energía eólica Haeckel Hill-Thay T'äw	32
<b>Cuadro 7.</b> Resultados de las entrevistas sobre el proyecto de energía eólica Haeckel Hill-Thay T'äw por fase de desarrollo del proyecto	33
<b>Cuadro 8.</b> Resumen del proyecto de energía de Shungnak y Kobuk	43
<b>Cuadro 9.</b> Resultados de las entrevistas relacionadas con los sistemas implementados en Shungnak y Kobuk por fase de desarrollo del proyecto	44
<b>Cuadro 10.</b> Resumen del proyecto energético de Borrego Springs	46
<b>Cuadro 11.</b> Resultados de las entrevistas relacionadas con el proyecto de Borrego Springs por fase del proyecto	47
<b>Cuadro 12.</b> Resumen del proyecto de paneles solares de Toro Negro	54
<b>Cuadro 13.</b> Resultados de las entrevistas relacionadas con el sistema de paneles solares en Toro Negro por fase de desarrollo del proyecto	55
<b>Cuadro 14.</b> Supuestos para determinar la capacidad fotovoltaica y el SAEB para cada tipo de inmueble en el marco del FSUE	64

<b>Cuadro 15.</b> Sistema instalado para cada proyecto de energía comunitaria en México en el marco del programa FSUE	65
<b>Cuadro 16.</b> Sistema fotovoltaico individual y costo del sistema de baterías por tipo de inmueble en el marco del programa FSUE	66
<b>Cuadro 17.</b> Resumen del proyecto de paneles solares de Yolochochio-Zongolica	73
<b>Cuadro 18.</b> Resultados de las entrevistas sobre el sistema de paneles solares en Yolochochio-Zongolica por fase de desarrollo del proyecto	74
<b>Cuadro 19.</b> Resumen del proyecto de San José de Natora	78
<b>Cuadro 20.</b> Resultados de las entrevistas en San José de Natora por fase de desarrollo del proyecto	79
<b>Cuadro 21.</b> Resumen del proyecto de Magdalena Aguilar	83
<b>Cuadro 22.</b> Resultados de las entrevistas en Magdalena Aguilar por fase de desarrollo del proyecto	84
<b>Cuadro 23.</b> Tipologías de las escalas de los sistemas de energía renovable en las comunidades estudiadas	86

## Lista de gráficas

<b>Gráfica 1.</b> Proceso para las solicitudes al FSUE	61
<b>Gráfica 2.</b> Dispositivos y electrodomésticos típicos usados por las comunidades mexicanas tras la electrificación	63
<b>Gráfica 3.</b> Tipologías de proyectos de energía renovable por costo y capacidad instalada en los estudios de caso	87

# Siglas, acrónimos y abreviaturas

<b>AVEC</b>	Cooperativa Eléctrica de Alaska ( <i>Alaska Village Electric Cooperative</i> )
<b>BNA</b>	Bingwi Neyaashi Anishinaabek, comunidad
<b>CCA</b>	Comisión para la Cooperación Ambiental
<b>CFE</b>	Comisión Federal de Electricidad
<b>CNLP</b>	Chu Níikwän Sociedad Limitada ( <i>Chu Níikwän Limited Partnership</i> )
<b>CO<sub>2</sub>e</b>	Dióxido de carbono equivalente
<b>DOE</b>	Departamento de Energía de Estados Unidos ( <i>US Department of Energy</i> )
<b>FCPR</b>	Fundación Comunitaria de Puerto Rico
<b>FSUE</b>	Fondo de Servicio Universal Eléctrico
<b>IPP</b>	Productor de energía independiente ( <i>Independent Power Producer</i> )
<b>IRENA</b>	Agencia Internacional de Energía Renovable ( <i>International Renewable Energy Agency</i> )
<b>KDFN</b>	Primera Nación Kwanlin Dün
<b>KEQC</b>	Comisión de Calidad Ambiental de Kativik ( <i>Kativik Environmental Quality Commission</i> )
<b>kw</b>	Kilovatio



<b>kWh</b>	Kilovatio-hora
<b>MW</b>	Megavatio
<b>NAB</b>	Distrito de Northwest Arctic ( <i>Northwest Arctic Borough</i> )
<b>O&amp;M</b>	Operaciones y mantenimiento
<b>PCE</b>	Programa Igualación de Costos de Energía ( <i>Power Cost Equalization program</i> )
<b>SAEB</b>	Sistema de almacenamiento de energía eléctrica en baterías
<b>SDG&amp;E</b>	San Diego Gas & Electric
<b>SENER</b>	Secretaría de Energía
<b>USDA</b>	Departamento de Agricultura de Estados Unidos ( <i>US Department of Agriculture</i> )
<b>W</b>	Vatio

# Sinopsis

Las comunidades remotas e indígenas de América del Norte enfrentan retos únicos debido a su aislamiento geográfico, climas rigurosos e infraestructura limitada. Para obtener electricidad, por ejemplo, dependen a menudo de generadores a base de diésel costosos y perjudiciales para el medio ambiente. Este informe, en el que se analizan nueve estudios de caso de comunidades remotas de Canadá, Estados Unidos y México, destaca transiciones exitosas hacia el uso de energías renovables, muchas de las cuales fueron impulsadas por la propia comunidad. Mediante entrevistas, visitas a campo y un proceso estructurado de participación con los habitantes de estas comunidades, el estudio hace hincapié en la autodeterminación, el empoderamiento económico, la sustentabilidad ambiental y la innovación tecnológica como temas centrales. La diversidad de proyectos renovables aquí presentados incluye sistemas hidroeléctricos, turbinas eólicas, microrredes solares y calefacción por biomasa, demostrando cómo cada comunidad aprovecha sus recursos locales y fortalezas culturales. Entre las principales conclusiones cabe citar la necesidad de una participación comunitaria temprana, las asociaciones estratégicas, los mecanismos de financiamiento flexibles y los sólidos esfuerzos de capacitación. Los retos comunes, como la complejidad logística, las barreras financieras y las limitaciones tecnológicas, se superaron mediante los enfoques adaptados y estructuras de gobernanza sólidas. Diferentes cuadros y gráficas a lo largo del informe presentan los resúmenes detallados de los proyectos, las percepciones de la comunidad y las fases críticas de la implementación de energías renovables. En general, los hallazgos ofrecen una valiosa orientación a responsables de políticas públicas, profesionales que trabajan con el tema de la energía y financiadores que busquen apoyar transiciones energéticas sustentables y resilientes en comunidades remotas e indígenas.



# Resumen ejecutivo

Las comunidades remotas e indígenas de América del Norte se enfrentan a algunos de los retos energéticos y climáticos más difíciles del subcontinente, pero también lideran algunas de las soluciones energéticas más importantes. Este informe incluye nueve comunidades de Canadá, Estados Unidos y México que vienen trazando su propio camino hacia la independencia energética mediante sistemas locales de energías renovables.

- **Canadá:** Instalación hidroeléctrica de Innavik (Inukjuak, Quebec), Proyecto de energía eólica Haeckel Hill-Thay T'aw (Whitehorse, Yukón) y Proyecto de calefacción por biomasa de Bingwi Neyaashi Anishinaabek (Lago Nipigon, Ontario).
- **México:** Sistemas solares en Yoloxochio-Zongolica (Veracruz), San José de Natorá-Sahuaripa (Sonora) y Magdalena Aguilar-Llera (Tamaulipas).
- **Estados Unidos:** Paneles solares y baterías de almacenamiento de energía de Shungnak y Kobuk (Alaska), microrred solar de Borrego Springs (California) y microrred solar de Toro Negro (Puerto Rico).

Los estudios de caso incluidos en este informe no son meros ejemplos de instalación de nuevas tecnologías, sino historias de autodeterminación, de comunidades que construyen proyectos que reflejan sus valores, prioridades y objetivos a largo plazo. Ya se trate de un proyecto hidroeléctrico gestionado por los inuit en el norte de Quebec, de turbinas eólicas propiedad del gobierno de una Primera Nación en el Yukón o de microrredes y sistemas solares aislados en zonas remotas de Alaska y México, cada proyecto demuestra lo que es posible cuando el desarrollo energético se arraiga en un lugar y lo dirigen quienes viven allí.

En conjunto, estos proyectos permitieron reducir el consumo de diésel y las emisiones de carbono, crearon puestos de trabajo locales y, lo más importante, dejaron el control de los sistemas energéticos en manos de las comunidades a las que sirven. Las transiciones, no siempre fáciles, han dejado lecciones que saltan a la vista: el éxito depende de colaboraciones confiables, financiamiento flexible y un apoyo técnico que crezca con el proyecto.

Para contribuir a orientar futuros esfuerzos, este documento también describe cómo las comunidades avanzan a través de los diferentes niveles de la transición energética, desde la planificación inicial hasta las operaciones a largo plazo. Es una herramienta para financiadores, gobiernos y profesionales de la energía que quieran trabajar con las comunidades tomándolas en cuenta.

Estas nueve comunidades ofrecen algo más que inspiración: ofrecen orientación. Nos recuerdan que el progreso real en materia de equidad climática y energética no se reduce a megavatios y dólares. Se trata de relaciones de respeto e inversión sostenida en personas y lugares.

# Prefacio

Comunidades remotas e indígenas de América del Norte han enfrentado históricamente retos difíciles debido a su aislamiento geográfico, inseguridad energética y dependencia de combustibles fósiles costosos. Reconociendo la urgencia de abordar estos retos, la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) encargó este informe para documentar y analizar las transiciones exitosas de energía renovable en estas comunidades. Este trabajo se llevó a cabo con el fin de proporcionar información valiosa, lecciones prácticas y modelos replicables para los responsables de políticas, especialistas en energía, organismos de financiamiento y comunidades decididas a emprender trayectorias similares hacia la independencia y la resiliencia energéticas. Al destacar diversos proyectos de energía renovable diseñados para atender las necesidades y prioridades de la comunidad, este informe subraya la importancia de la autodeterminación, las estrategias culturalmente adaptadas y el desarrollo económico sustentable. Su objetivo es promover una comprensión más profunda de las complejidades y oportunidades asociadas con las transiciones energéticas en entornos remotos, apoyando en última instancia los esfuerzos más amplios hacia la resiliencia climática y el acceso equitativo a la energía en toda América del Norte.



# Agradecimientos

Este informe fue posible gracias a la colaboración y generosidad de las comunidades, organizaciones y personas que compartieron su tiempo, experiencias y puntos de vista a lo largo de las entrevistas y el proceso de investigación.

Agradecemos especialmente los aportes del comité directivo del proyecto y de las instituciones aliadas, cuya experiencia y comentarios reforzaron la orientación y el enfoque de este documento. Entre ellos figuran representantes de:

- Ministerio de Recursos Naturales de Canadá (*Natural Resources Canada, NRCan*)
- Relaciones Corona-Indígenas y Asuntos del Norte de Canadá (*Crown-Indigenous Relations and Northern Affairs Canada, CIRNAC*)
- Secretaría de Energía (SENER) de México
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de México
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*US Environmental Protection Agency, US EPA*)

Estamos muy agradecidos **con las personas líderes de la comunidad, residentes y socios de los proyectos** en los nueve lugares estudiados, que generosamente compartieron sus historias y abrieron sus puertas a nuestro equipo:

- **Bingwi Neyaashi Anishinaabek (Ontario, Canadá):** a los líderes de la comunidad, el personal administrativo, los representantes del aserradero de Papasay y TBT Engineering Limited por compartir su visión a largo plazo y su liderazgo en energía generada con biomasa.
- **Inukjuak (Quebec, Canadá):** a Pituvik Landholding Corporation, el equipo de la instalación hidroeléctrica de Innavik e Innergex Renewable Energy Inc., por su colaboración y transparencia.
- **Whitehorse (Yukón, Canadá):** a Northern Energy Capital, Chu Níikwän LP, Eagle Hill Energy LP, Yukon Energy Corporation y los líderes de la Primera Nación Kwanlin Dün por su conocimiento sobre la gobernanza de las energías renovables.
- **Shungnak y Kobuk (Alaska, Estados Unidos):** a los líderes regionales locales y a Ingemar Mathiasson por su compromiso con la resiliencia energética y la coordinación intercomunitaria.
- **Borrego Springs (California, Estados Unidos):** a San Diego Gas & Electric y a los habitantes de la comunidad local por sus reflexiones sobre la implementación de microrredes y su impacto en la comunidad.

- **Toro Negro (Puerto Rico, Estados Unidos):** a las personas líderes de la comunidad, a la Comunidad Toro Negro, a la Fundación Comunitaria de Puerto Rico y a Somos Solar por dar ejemplo de soberanía energética en acción.
- **Yoloxochio-Zongolica (Veracruz, México):** a los líderes y residentes locales por su perseverancia y apertura a la hora de afrontar los retos de los sistemas solares sin conexión a la red.
- **San José de Natora (Sonora, México):** a los habitantes, educadores y autoridades locales por compartir sus experiencias sobre el acceso a la energía y el mantenimiento del sistema.
- **Magdaleno Aguilar (Tamaulipas, México):** a los residentes por su compromiso y sus reflexiones sobre la electrificación solar rural.

Un agradecimiento especial a todos los que participaron en las entrevistas, compartieron sus fotos o guiaron las visitas a los proyectos energéticos. Sus voces, conocimientos y experiencias han dado forma y vida a este informe.

Reconocemos asimismo las contribuciones de los investigadores de Dare to Know, LLC, y el apoyo de los socios del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (*National Renewable Energy Laboratory, NREL*) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (*International Renewable Energy Agency, IRENA*).

Este informe se presenta con un espíritu de respeto y reciprocidad. Cualquier error u omisión es responsabilidad de los autores, y agradecemos la continuación del diálogo con todas las comunidades participantes.



# 1. Introducción

La iniciativa “Transición de comunidades remotas a energías renovables” documenta estrategias para el avance de comunidades remotas de América del Norte hacia fuentes de energía más limpias y confiables. En colaboración con la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) y la Agencia Internacional de Energías Renovables, y con la orientación estratégica de representantes técnicos y de políticas de Canadá, Estados Unidos y México, el equipo del proyecto *Dare to Know, LLC* (Atrévete a Saber) consultó con nueve comunidades remotas de América del Norte que pusieron en marcha proyectos de energía renovable (véase el cuadro 1). Este informe describe dichos proyectos y resume las lecciones aprendidas por las comunidades a lo largo de su ejecución. A continuación se muestra la ubicación de las nueve comunidades estudiadas.





**Cuadro 1. Localización de las comunidades seleccionadas por país**



**Canadá**

Bingwi Neyaashi  
Anishinaabek  
(Ontario)

Inukjuak  
(Quebec)

Whitehorse  
(Yukón)



**Estados Unidos**

Borrego Springs  
(California)

Shungnak y Kobuk  
(Alaska)

Toro Negro  
(Puerto Rico)



**México**

Magdaleno Aguilar  
(Tamaulipas)

San José de Natora  
(Sonora)

Yoloxochio-Zongolica  
(Veracruz)

Generar energía en comunidades remotas presenta muchos desafíos debido a factores como la geografía, el clima y la infraestructura. El aislamiento, el terreno accidentado, las temperaturas extremas y otros factores dificultan y encarecen la instalación, puesta en marcha y mantenimiento de los sistemas de generación de energía.

El transporte de materiales y equipos a estas comunidades suele requerir una logística especializada, como transporte aéreo, carreteras heladas o barcazas, lo que añade un costo y una complejidad considerables a los proyectos energéticos. Dado que muchas comunidades remotas carecen de acceso a la red eléctrica principal, dependen de generadores diésel que generalmente son costosos y perjudiciales para el medio ambiente. En este informe, las comunidades remotas se definen como aquellas que viven un aislamiento geográfico, de infraestructura o funcionamiento de los sistemas centralizados —la energía, el transporte o las comunicaciones, por ejemplo— y, en consecuencia, padecen problemas persistentes de fiabilidad o asequibilidad a dichos sistemas.

Los factores socioeconómicos añaden otra capa a dicha complejidad. Las comunidades remotas suelen tener poca población, lo que puede limitar la viabilidad económica de los proyectos energéticos a gran escala. Los elevados costos iniciales y los largos periodos de amortización pueden disuadir a inversionistas. Además, las comunidades pequeñas a menudo carecen de los conocimientos técnicos y la mano de obra necesaria para instalar, operar y mantener sistemas energéticos avanzados, lo que exige apoyo y formación externos continuos.

A pesar de estos desafíos, hay oportunidades para la innovación y la colaboración. Las principales conclusiones de los nueve estudios de caso analizados en este documento revelan temas comunes a todos los proyectos energéticos comunitarios, como el desarrollo liderado por la comunidad, la sustentabilidad ambiental, el empoderamiento económico, la innovación tecnológica y la importancia del contexto cultural. Cada proyecto demuestra cómo pueden superarse los retos inherentes a la generación de energía en lugares remotos aprovechando los recursos locales, fomentando la participación de la comunidad y aplicando soluciones adaptadas a sus necesidades y condiciones específicas. Estos nueve proyectos son ejemplo de cómo las comunidades remotas pueden lograr una generación de energía sustentable y resiliente.

Los siguientes apartados contienen resúmenes de los proyectos energéticos y los hallazgos clave de las comunidades analizadas en los estudios de caso, todo presentado en orden geográfico norte-sur: Canadá, Estados Unidos y México. El apartado 5 aborda los temas comunes identificados en los proyectos de los estudios de caso.

## 2. Estudios de caso de Canadá

### Contexto

Canadá cuenta con más de 200 comunidades que habitan en lugares remotos, de las cuales más de tres cuartas partes son indígenas. Muchas de estas comunidades no están conectadas a la red eléctrica de América del Norte, razón por la cual utilizan combustibles fósiles como el diésel para la calefacción y la energía eléctrica. Debido a su lejanía y climas fríos, para la seguridad de estas comunidades resulta esencial un suministro fiable de energía. Sin embargo, la lejanía y las condiciones extremas plantean desafíos logísticos para el transporte seguro y confiable del combustible, que en invierno suele requerir el uso de carreteras de hielo, barcazas y aviones cisterna.



Aunque el diésel es una fuente fiable de energía, su uso presenta desventajas que van más allá de los retos logísticos de su entrega en lugares remotos. El uso de diésel afecta negativamente el medio ambiente por sus emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de contaminación atmosférica local, además de representar un riesgo de contaminación por posibles derrames de combustible durante su transporte, almacenamiento y utilización. Las fluctuaciones del precio de mercado de este combustible y el elevado costo de su transporte a zonas remotas suponen un alto costo de operación y mantenimiento de los sistemas de generación diésel para comunidades, gobiernos y contribuyentes.

Las necesidades energéticas varían en las comunidades remotas de Canadá en función de las prioridades de la comunidad y de sus capacidades financieras, técnicas y organizativas. En la mayoría de los casos, las comunidades se abastecen de sus propias microrredes. Los proyectos de generación de energía a gran escala no suelen ser rentables debido a los elevados costos iniciales y a las dificultades logísticas que plantea la construcción de infraestructuras en lugares remotos. En los territorios septentrionales de Nunavut, Yukón y los Territorios del Noroeste, una base muy reducida de contribuyentes sufraga la explotación y el mantenimiento de los sistemas energéticos, lo que complica la rentabilidad de los grandes proyectos.

La integración de sistemas de energías renovables en las microrredes diésel existentes se ve dificultada por condiciones climáticas extremas, como fuertes nevadas, acumulación de hielo y periodos de oscuridad prolongados. Estas condiciones pueden aumentar la variabilidad del suministro de energía de las tecnologías renovables impulsadas por el viento, el agua y el sol y comprometer la seguridad y fiabilidad del suministro energético de una comunidad. La integración de las tecnologías de energías renovables requiere una cuidadosa planificación y adaptación a las condiciones locales para garantizar la sostenibilidad, seguridad y fiabilidad de los sistemas energéticos remotos.

En respuesta a los objetivos de Canadá de lograr una economía de cero emisiones netas para 2050, varios programas federales, provinciales y territoriales, como los programas Energía Limpia para Comunidades Rurales y Remotas (*Clean Energy for Rural and Remote Communities*) y Enfoque Energético Responsable del Norte para Calefacción y Electricidad Comunitarias (*Northern Responsible Energy Approach for Community Heat and Electricity*), entre otros, establecen medidas para apoyar a las comunidades remotas e indígenas en su transición hacia el uso de fuentes de energía limpia para calefacción y electricidad. Estos esfuerzos están guiados por estrategias más amplias, como el “Marco político del Ártico y el Norte”, que brinda una dirección a largo plazo para la resiliencia de la infraestructura y la autodeterminación indígena en esa región. En el anexo de este documento se presentan más detalles sobre estas políticas y estructuras de financiamiento.



El proceso de recopilación de información en Canadá se centró en tres comunidades remotas del territorio de Yukón y las provincias de Ontario y Quebec que en la actualidad realizan esfuerzos de transición a fuentes de energía más limpias. El objetivo de las entrevistas se centró en conocer las repercusiones económicas, ambientales y sociales de las iniciativas de las comunidades en materia de energías renovables, los principales desafíos que plantean y el papel de la gobernanza local en la ejecución de los proyectos.



## Con arraigo en su visión y el impulso de la comunidad: la transición energética de Bingwi Neyaashi Anishinaabek

“Lo hemos construido con un equipo pequeño y una visión sólida. Otras Primeras Naciones también pueden hacerlo, pero hace falta perseverancia y compromiso para involucrar a la comunidad”  
Líder Paul Gladu, Bingwi Neyaashi Anishinaabek

Bingwi Neyaashi Anishinaabek (BNA), antes llamada Primera Nación de Sand Point, es una comunidad pequeña pero resiliente situada en la orilla sureste del lago Nipigon, en Ontario. Con alrededor de 250 habitantes, BNA mantiene una estrecha conexión con el bosque boreal circundante y las aguas prístinas del lago, recursos que siguen siendo fundamentales para su cultura, economía y vida cotidiana.

La ubicación de la comunidad, a más de una hora en automóvil del centro urbano más cercano y accesible sólo por largos tramos de carretera rural, ha representado desafíos para el desarrollo de infraestructura, el acceso a los servicios y el crecimiento económico. Al mismo tiempo, este aislamiento ha fomentado un espíritu de innovación, autosuficiencia y una conexión profundamente arraigada con el territorio.



Durante décadas, BNA enfrentó las consecuencias de políticas coloniales que apartaron a sus pobladores de su territorio tradicional, dejando a esta Primera Nación sin base territorial ni reconocimiento legal. Este desplazamiento interrumpió la gobernanza, la continuidad cultural y el desarrollo económico. Sin embargo, en los últimos años, ha logrado avances notorios en la recuperación de sus tierras y en la reconstrucción de su economía local.

Una piedra angular de esta revitalización es el aserradero Papasay, actualmente el único negocio en funcionamiento en Sand Point. El aserradero procesa madera local y genera oportunidades de empleo durante todo el año para los habitantes de la comunidad. También provee combustible para el nuevo sistema de calefacción de BNA mediante el uso de biomasa; así, los residuos del aserradero sirven para calentar los edificios comunitarios y las viviendas. Antes de contar con este sistema de calefacción distrital, los trabajadores soportaban temperaturas bajo cero (a veces tan bajas como  $-40^{\circ}\text{C}$ ) con apenas calefactores diésel donados, que resultaban no sólo insuficientes sino muy contaminantes.

El nuevo sistema de biomasa ha mejorado de modo considerable las condiciones de trabajo y la resiliencia energética. Aunque BNA está conectada a la red eléctrica a través de la línea A4L, esta larga línea de transmisión radial es poco confiable y sufre con frecuencia apagones prolongados, lo que representa un serio riesgo en invierno, cuando las viviendas dependen de calefactores eléctricos de zócalo. El sistema de biomasa ofrece una alternativa más segura y sostenible para la calefacción y respalda los objetivos más amplios de BNA en materia de seguridad energética y autosuficiencia.

En paralelo con sus iniciativas de energía renovable, BNA ha ampliado su infraestructura en los últimos años. La comunidad cuenta ahora con 25 viviendas, un centro comunitario y otras instalaciones esenciales, todo ello como parte de una visión más amplia de un desarrollo sustentable impulsado localmente.

### **Resumen del proyecto de transición energética**

El camino de Bingwi Neyaashi Anishinaabek hacia el uso de energías renovables refleja una visión a largo plazo de la gestión ambiental, la preservación cultural y el empoderamiento económico. La comunidad ha puesto en marcha el proyecto del sistema de calefacción por biomasa del aserradero BNA, una iniciativa transformadora para sustituir el sistema de calefacción de diésel por un sistema de biomasa alimentado por residuos de la madera local. En este proyecto se instaló una caldera de biomasa Froling T4 de 150 kW en un contenedor. (Véase en el cuadro 2 un resumen del proyecto.)

## Cuadro 2. Resumen del proyecto de calefacción por biomasa de Bingwi Neyaashi Anishinaabek

Detalle del proyecto	Descripción
Tecnología	Sistema de calefacción por biomasa
Capacidad instalada	150 kW
Cronograma	Planeación: otoño de 2011-otoño de 2019 Construcción: noviembre de 2019-marzo de 2020
Costo total	\$C1.05 millones (\$EU734,800) (ICE Network, 2020)
Fuentes de financiamiento	\$C1.05 millones del programa Energía Limpia para las Comunidades Rurales y Remotas ( <i>Clean Energy for Rural and Remote Communities</i> )
Líder del proyecto y socios clave	Consejo de Bingwi Neyaashi Anishinaabek, programa Energía Limpia para Comunidades Rurales y Remotas, ministerio de Recursos Naturales de Canadá, contratistas locales
Estructura de propiedad	Propiedad exclusiva y operada por Bingwi Neyaashi Anishinaabek
Beneficios del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>El proyecto apoyó la bioeconomía local al dar valor agregado a los residuos del aserradero y, al mismo tiempo, evitar el uso de ~13,000 litros de diésel al año, lo que supuso un ahorro estimado de \$C26,000 anuales (TBT Engineering Limited, comunicación personal, 8 de enero de 2025).</li> <li>El proyecto redujo las emisiones en ~34.84 toneladas de CO<sub>2</sub>e al año, al pasar del diésel a la biomasa para calentar el aserradero de Papasay.</li> <li>Quienes integran el Consejo de Bingwi Neyaashi Anishinaabek y el personal del aserradero de Papasay adquirieron experiencia con los sistemas de biomasa, sentando las bases para ampliar el sistema hacia un circuito de calefacción distrital comunitario cuya construcción comenzará en 2025.</li> </ul>



**Cuadro 3. Resultados de las entrevistas sobre el sistema de calefacción por biomasa de Bingwi Neyaashi Anishinaabek por fase de desarrollo del proyecto**

**Fase de desarrollo del proyecto**

**Hallazgos clave**

**Planeación**

- Quienes habitan esta comunidad participaron en la definición de prioridades, la zonificación de áreas para el desarrollo y la alineación del proyecto energético de acuerdo con sus objetivos.
- BNA realizaba de cuatro a cinco reuniones generales al año para informar e involucrar a las personas habitantes de la comunidad.
- BNA estableció una estructura de gobernanza para supervisar el proyecto y garantizar la transparencia y la rendición de cuentas.

**Selección y adquisición de tecnología**

- La capacidad del sistema de calefacción por biomasa, con uso de astillas de madera procedentes del aserradero, se ajusta a la economía basada en recursos de Bingwi Neyaashi Anishinaabek.
- La participación de socios clave, como el ministerio de Recursos Naturales de Canadá, garantizó la viabilidad técnica y financiera.
- La comunidad decidió adoptar la tecnología de biomasa antes de trabajar con ingenieros para diseñar el sistema.

**Financiamiento y permisos**

- Se recibieron fondos de subvención del ministerio de Recursos Naturales de Canadá, procedentes del Programa de Energía Limpia para Comunidades Rurales y Remotas.
- No se requirieron permisos porque el proyecto se encuentra en tierras de las Primeras Naciones con derecho de autogobierno.

**Instalación y puesta en marcha**

- La instalación del sistema de biomasa constituyó un hito para Bingwi Neyaashi Anishinaabek.
- Dada la limitada experiencia de la comunidad en sistemas de biomasa, se contrató a TBT Engineering como gestor y responsable de la orientación técnica durante todo el ciclo de vida del proyecto.
- BNA enfrentó limitaciones de capacidad al gestionar simultáneamente múltiples iniciativas. Esto se mitigó mediante la participación de TBT Engineering para supervisar la coordinación del proyecto y garantizar el cumplimiento de los plazos. Reuniones regulares entre BNA, TBT y el contratista ayudaron a mantener en marcha el proyecto.
- Para gestionar la integración de múltiples tecnologías, se seleccionó un contratista local — Biothermic— mediante un proceso de licitación competitiva con el fin de asegurar respuestas oportunas a problemas técnicos y determinar la disponibilidad local de piezas de repuesto.
- El soporte técnico en sitio requerido durante la instalación (proporcionado por Art Gladu, oficial mecánico de oficio) permitió la resolución rápida de los desafíos de instalación.

**Operación**

- Biothermic, el instalador, formó a un técnico y sigue brindando a distancia asistencia para solución de problemas.

## Hallazgos clave

La trayectoria de Bingwi Neyaashi Anishinaabek hacia las energías renovables resalta una mezcla de planificación estratégica, determinación colectiva y colaboración eficaz. El proyecto ha fomentado un sentimiento de logro colectivo, y muchos habitantes lo describen como un hito en el camino de la comunidad hacia la recuperación de sus tierras y recursos. (En el cuadro 3 se resumen las principales conclusiones de las entrevistas por fase de desarrollo del proyecto.)

La trayectoria de Bingwi Neyaashi Anishinaabek demuestra el poder de la autodeterminación, la visión y las asociaciones estratégicas para impulsar la transformación energética liderada por la comunidad. Su progreso, desde la biomasa en el aserradero hasta un proyecto de calefacción distrital comunitario, refleja un enfoque deliberado de crecimiento basado en la planificación y la sustentabilidad. Durante el proceso de entrevistas con la comunidad destacaron algunas lecciones aprendidas específicas:

- La visión y la participación comunitarias son fundamentales. La base del éxito del proyecto radica en la unidad de la comunidad de BNA. A través de encuestas periódicas, talleres y foros abiertos, el Consejo de BNA se aseguró de que las prioridades de la comunidad se escucharan y atendieran para dar forma a los resultados del proyecto. Por ejemplo, un participante destacó cómo las discusiones sobre la asignación de recursos llevaron a rediseñar ciertos aspectos del sistema para alinearlos mejor con las necesidades de la comunidad, lo que ilustra el impacto tangible de estas participaciones. Como compartió el líder Paul Gladu: “No sólo construimos un sistema de calefacción: construimos confianza y una visión compartida de nuestro futuro”.
- La disponibilidad de financiamiento y experiencia resultó crucial para el éxito. Un reto importante fue conseguir financiamiento confiable. La colaboración con organizaciones como el ministerio de Recursos Naturales de Canadá resultó invaluable en términos no sólo de apoyo financiero, sino también para acceder a asistencia técnica. Como declaró uno de los responsables del proyecto: “Cuando los recursos eran escasos, nuestras asociaciones nos empujaban para seguir adelante”.
- Navegar a través de la burocracia para superar los problemas de financiamiento requiere paciencia y persistencia. El apoyo estratégico del Consejo de BNA garantizó que el proyecto cumpliera con procesos de planificación complejos, al tiempo que se mantenía fiel a la visión de la comunidad.

Con miras al futuro, los líderes de Bingwi Neyaashi Anishinaabek se centran en completar el diseño y garantizar el financiamiento total del sistema de calefacción distrital por biomasa, que ampliará la calefacción limpia y de origen local a toda la comunidad. Los siguientes pasos están en proceso o previstos por la comunidad:

- Los dirigentes se están preparando para buscar financiamiento a través de la Autoridad Financiera de las Primeras Naciones, basándose en su certificación de gestión financiera y fortaleciendo su capacidad para respaldar futuros proyectos de infraestructura.
- También se llevan a cabo esfuerzos para desarrollar un plan de operaciones y mantenimiento del sistema de calefacción distrital, asegurando su confiabilidad a largo plazo.
- Bingwi Neyaashi Anishinaabek reconoce que la participación de la juventud es fundamental para el éxito del proyecto, razón por la cual las oportunidades de formación en silvicultura, construcción y operación del sistema se dirigen a la próxima generación, que continuará el legado energético y la gobernanza de Bingwi Neyaashi Anishinaabek.



## Aprovechando el río, fortaleciendo a la comunidad: el proyecto hidroeléctrico Innavik en Inukjuak

“Creo que es muy importante que un proyecto como éste, dirigido por los Inuit, empiece desde abajo: que la comunidad dirija el proyecto. Veo a mi gente valiéndose por sí misma y trabajando en sus propias ideas”

Presidente Tommy Palliser, Pituvik Landholding Corporation

Inukjuak es una comunidad inuit remota, situada a lo largo de la costa de la bahía Hudson, en la región de Nunavik, al norte de Quebec. Según el censo canadiense de 2021, la población se compone de 1,805 habitantes, de los cuales 99% se identifica como inuit. El clima subártico de la región, caracterizado por inviernos largos y severos y veranos cortos y frescos, deja ver la necesidad del desarrollo de infraestructura y el suministro de combustible. Inaccesible por carretera, Inukjuak depende del transporte aéreo y marítimo estacional, lo que refuerza su aislamiento logístico.

La economía local se basa principalmente en los servicios del sector público, el comercio minorista a pequeña escala y las actividades de recolección tradicionales, como la pesca y la caza. Los profundos lazos culturales con la tierra, la lengua y las tradiciones siguen sosteniendo la vida y la identidad de la comunidad inuit. La Pituvik Landholding Corporation desempeña un papel clave en la representación de los intereses de la comunidad y en la promoción de las prioridades locales, como la transición a sistemas energéticos más limpios y sostenibles.





#### Cuadro 4. Resumen del proyecto hidroeléctrico Innavik

Detalle del proyecto	Descripción
Tecnología	Presa hidroeléctrica de pasada
Capacidad instalada	7.5 MW (Innergex Renewable Energy Inc., 2020)
Cronograma	2016 (inicio)-2023 (culminación) (Innergex Renewable Energy Inc., s. f.)
Costo total	\$C127 millones (\$EU89 millones) (Innergex Renewable Energy Inc., 2020)
Precio de la energía contratada	\$C0.19/kWh (\$EU0.14/kWh)* (Innavik Hydro & Hydro-Québec Distribution, 2019)
Fuentes de financiamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mezcla de deuda del proyecto y aportes a capital por parte de Innergex y Pituvik Landholding Corporation.</li> <li>• La deuda del proyecto cubrió entre 75 y 85 por ciento del costo total (~\$C95-108 millones), utilizando financiamiento no recurrente (Innergex Renewable Energy Inc., 2020).</li> <li>• Los aportes a capital ascendieron a ~\$C35 millones, divididos por igual: \$C17.5 millones de Pituvik fueron financiados en su totalidad mediante subvenciones gubernamentales (aproximadamente, 60-65% federal y 35-40% provincial) (Innergex Renewable Energy Inc., 2020).</li> <li>• Innergex aportó \$C17.5 millones de capital privado (Innergex Renewable Energy Inc., 2020).</li> </ul>
Líder del proyecto y socios clave	Innergex, el Gobierno Regional de Nunavik, la Comisión de Calidad Ambiental de Kativik (KEQC), Pituvik Landholding Corporation (Innergex Renewable Energy Inc., 2020, Pituvik Landholding Corporation, 2024).
Estructura de propiedad	Modelo de asociación 50/50 entre Innergex y Pituvik Landholding Corporation (Innergex Renewable Energy Inc., 2020).
Beneficios del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redujo en 80% la dependencia del diésel. Se evitan unas 700,000 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>e durante los 40 años de vida útil del proyecto (Innergex Renewable Energy Inc., s. f.).</li> <li>• Mejoró los hábitats pesqueros aguas abajo gracias a la regulación del caudal (Pituvik Landholding Corporation, 2024).</li> <li>• Generó empleos locales y creó capacidades para la construcción y operación del proyecto (Innergex Renewable Energy Inc., s. f.).</li> <li>• Los ingresos anuales previstos de \$C8.6 millones apoyarán iniciativas impulsadas por la comunidad (Innavik Hydro, 2020).</li> </ul>

\* La cantidad de \$C0.19/kWh se obtuvo dividiendo el costo total de la energía contratada entre la energía esperada a entregar durante el plazo del acuerdo. Si bien los valores reales pueden variar, esto proporciona una estimación razonable de la tarifa efectiva del acuerdo de compra de energía.

**Cuadro 5. Resultados de las entrevistas por fase de desarrollo del proyecto hidroeléctrico de Innavik**

<b>Fase de desarrollo del proyecto</b>	<b>Hallazgos clave</b>
<b>Planeación</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• La participación comunitaria dio relevancia a la toma de decisiones y aportes locales. Los líderes de Pituvik priorizaron el uso del conocimiento local para las evaluaciones ambientales e insistieron en el lema “Es tu tierra, es tu proyecto”. Se llevaron a cabo reuniones periódicas y se atendieron las preocupaciones locales a través de sesiones informativas (Innavik Hydro, 2020).</li><li>• La Comisión de Calidad Ambiental de Kativik (KEQC), un organismo regulador regional, fue crucial en la aprobación del proyecto, toda vez que garantizó el cumplimiento de las medidas de protección ambiental y culturales específicas del ecosistema único de Nunavik y del patrimonio indígena (Pituvik Landholding Corporation, 2024). Los líderes de Pituvik colaboraron con Innergex para cumplir con estos requisitos.</li><li>• Las personas jóvenes y otros habitantes de la comunidad participaron en la planificación del proyecto, encuestas y funciones operativas.</li><li>• Las preocupaciones iniciales de 17% de los residentes (Anselmi, 2019) se atendieron de manera eficaz mediante la educación de la comunidad en cuanto a medidas de protección específicas, particularmente en lo relacionado con la calidad del agua (Paradis, 2023, y Pituvik Landholding Corporation, 2024).</li></ul>
<b>Selección y adquisición de tecnología</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se eligió un sistema hidroeléctrico de pasada para minimizar el impacto ambiental. El diseño evita bloquear el flujo del agua, respondiendo así a las preocupaciones de la comunidad sobre la salinidad y la biodiversidad (Innavik Hydro, 2021).</li></ul>
<b>Financiamiento y permisos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• El proyecto se realizó mediante contratos de ingeniería, adquisiciones y construcción, asignando al contratista la responsabilidad del diseño y la construcción. Este enfoque agilizó la logística y garantizó la rendición de cuentas en la construcción en el riguroso entorno septentrional (CIMA+, 2025).</li><li>• El proyecto recibió financiamiento público y privado, incluidas importantes contribuciones de Innergex, así como financiamiento federal para comunidades indígenas (Innergex Renewable Energy Inc., 2020).</li><li>• La aprobación de la KEQC fue esencial, exigiendo condiciones para mitigar los impactos ambientales, incluido el monitoreo de los niveles de mercurio. Dado que el río es una fuente de agua comunitaria, se requirieron medidas de protección estrictas para mantener la calidad del agua durante la construcción (Pituvik Landholding Corporation, 2024).</li></ul>
<b>Instalación y puesta en marcha</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Las reuniones comunitarias regularmente programadas facilitaron la comunicación directa entre quienes habitan la comunidad y los expertos del proyecto, quienes respondieron preguntas, aclararon los impactos del proyecto y dieron seguimiento oportuno (Innavik, 2024) para mantener la transparencia y generar confianza en la comunidad.</li><li>• Los desafíos incluyeron problemas logísticos, como el transporte de materiales en barcaza y avión, así como limitaciones derivadas de la COVID-19. Para facilitar la construcción se edificaron un puente provisional y carreteras de acceso. La logística especializada, como una barcaza y un avión dedicados sólo al proyecto, garantizó la entrega puntual de materiales y personal (Rogers, 2020, e Innergex Renewable Energy Inc., 2020).</li><li>• Se dio prioridad a la formación y contratación de trabajadores locales, lo que fomentó un sentido de pertenencia y orgullo por el proyecto (Innergex Renewable Energy Inc., s. f.).</li></ul>
<b>Operación</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se capacitó a dos operadores locales para gestionar el sistema y fomentar el sentido de pertenencia en la comunidad (Innavik Hydro, s. f.).</li><li>• La capacitación y la mentoría garantizaron la sustentabilidad operativa. También se planearon otros programas de desarrollo de capacidades, como la formación en carpintería y mecánica (Innavik Hydro, s. f.).</li></ul>

Esta comunidad remota y predominantemente indígena se enfrenta a retos relacionados con el acceso a la energía y la sustentabilidad ambiental. Durante décadas, Inukjuak dependió del diésel para obtener electricidad, una solución plagada de problemas ecológicos, económicos y logísticos. La dependencia del diésel acarrea importantes riesgos para el medio ambiente y la población, como las emisiones de gases de efecto invernadero, los elevados costos operativos, las fluctuaciones del precio del combustible y las interrupciones de la cadena de suministro. Consciente de estos problemas, la comunidad buscó una solución energética más sustentable y autosuficiente.



### **Resumen del proyecto de transición energética**

El proyecto *Innavik Hydro* consistió en una central hidroeléctrica de pasada de 7.5 megavatios (MW) construida para sustituir el diésel como principal fuente de electricidad en Inukjuak. El proyecto, en operación desde octubre de 2023, se desarrolló gracias a una larga colaboración entre Pituvik Landholding Corporation, el organismo local inuit responsable de la gestión de las tierras de categoría 1<sup>1</sup> e Innergex, un promotor privado de energías renovables con amplia experiencia en sistemas hidroeléctricos. Pituvik desempeñó desde el principio un papel decisivo al garantizar que los valores de la comunidad, la protección del medio ambiente y los beneficios económicos a largo plazo siguieran ocupando un lugar central en el proyecto.

El financiamiento cubrió entre 75 y 85 por ciento de los costos de desarrollo totales, y el resto del capital se repartió a partes iguales entre Pituvik e Innergex (Perron-Piché, 2023). Juntos, los socios gestionaron las aprobaciones reglamentarias y abordaron la resistencia inicial de la comunidad educando de forma proactiva a las personas habitantes sobre las medidas de protección ambiental, en especial en lo relativo a la calidad del agua. El proyecto posicionó a Inukjuak como líder en el desarrollo de energías renovables liderado por indígenas en el norte de Quebec (véase en el cuadro 4 un resumen del proyecto).

<sup>1</sup> Las tierras de categoría 1 son tierras indígenas gestionadas por las Primeras Naciones con acuerdo a la Ley de Gestión de Tierras de las Primeras Naciones, lo que permite una mayor autonomía y control sobre el uso del suelo.

## Hallazgos clave

El proyecto hidroeléctrico Innavik ejemplificó una iniciativa impulsada por la comunidad con un sistema seleccionado para minimizar la perturbación ecológica y evitar el bloqueo del flujo de agua y los riesgos para la biodiversidad. (Véase en el cuadro 5 un resumen de las principales conclusiones de las entrevistas por fase de desarrollo del proyecto.)

La trayectoria de Innavik Hydro ilustra el potencial transformador de los proyectos de energía renovable liderados por comunidades indígenas, guiados por una planificación comunitaria, alianzas culturalmente afines y una sólida gestión ambiental. Si bien los logros incluyeron superar complejidades logísticas, desafíos y preocupaciones de la comunidad, los esfuerzos continuos siguen siendo esenciales para sostener este progreso. A continuación se resumen las principales lecciones del proceso de entrevistas con la comunidad:

- La planificación liderada por comunidades indígenas fortalece la pertinencia y la rendición de cuentas del proyecto. El proyecto representó una iniciativa de energía renovable dirigida por pueblos indígenas que destacó la integración del conocimiento tradicional inuit y la toma de decisiones en el ámbito local. Impulsado por los líderes de Pituvik en colaboración con Innergex, el proyecto cumplió con los requisitos regulatorios a través de la KEQC, que aplicó salvaguardas ambientales y culturales para el ecosistema de Nunavik.
- La participación transparente genera confianza y supera la resistencia. El proyecto sorteó la resistencia inicial de 17% de las personas de la comunidad (Paradis, 2023) mediante procesos de educación e inclusión, empoderando a la juventud y otros residentes en las funciones de planificación, encuestas y construcción.
- La capacidad local convierte las barreras logísticas en fortalezas. Los obstáculos logísticos relacionados con el acceso remoto, las restricciones por la COVID-19 y el transporte de materiales fueron superados gracias al ingenio comunitario, lo que fortaleció su sentido de apropiación del proyecto.

Como pasos siguientes al proyecto, Pituvik e Innergex están comprometidos a:

- compartir las lecciones aprendidas con otras comunidades;
- monitorear rigurosamente los impactos ambientales;
- ampliar los programas de capacitación, y
- revertir los ingresos del proyecto en infraestructura comunitaria y programas sociales.

Este enfoque holístico ofrece un modelo sustentable para la transición hacia energías renovables en regiones remotas.

# Honrando el pasado, energizando el futuro: el legado energético de la Primera Nación Kwanlin Dün

“Este proyecto trata de asegurar un futuro en el que nuestros hijos y nietos no tengan que depender del diésel; se trata de construir algo duradero para las próximas generaciones”

Líder Sean Smith, Primera Nación Kwanlin Dün

La Primera Nación Kwanlin Dün (KDFN, por sus siglas en inglés), de aproximadamente 1,200 ciudadanos, ubicada en Whitehorse y sus alrededores y capital de Yukón, se rige por autogobierno. El clima de la zona, subártico, se caracteriza por inviernos largos y fríos y veranos cortos y templados, lo que dificulta el suministro confiable de energía y el desarrollo de infraestructura. Históricamente, los ciudadanos de la KDFN dependían en gran medida del río Yukón para su subsistencia y prácticas culturales, pero desarrollos de infraestructura como la presa Whitehorse (construida en 1958) alteraron las formas de vida tradicionales y desplazaron a muchos residentes.

En la actualidad, a pesar de su proximidad a la capital territorial, la comunidad se enfrenta a continuos retos energéticos, incluida la dependencia de combustibles importados durante los meses de invierno, la vulnerabilidad a la fluctuación de los precios de la energía y un sistema eléctrico aislado con capacidad de generación local limitada. En 2005, la Primera Nación Kwanlin Dün se convirtió en autogobierno mediante su Acuerdo Final con el Territorio de Yukón y Canadá, que estableció sus derechos sobre tierras, recursos y gobernanza. Desde entonces, la KDFN ha impulsado el desarrollo económico a través de su brazo empresarial: Chu Níikwän Limited Partnership (CNLP). El proyecto eólico Haeckel Hill-Thay T'äw se basa en esta visión estratégica, reforzando la posición de la KDFN como líder en el desarrollo de energías renovables liderado por comunidades indígenas y en la resiliencia económica local.





**Cuadro 6. Resumen del proyecto de energía eólica Haeckel Hill-Thay T’äw**

Detalle del proyecto	Descripción
<b>Tecnología</b>	Energía eólica (4 turbinas EWT DW-61 de 1 MW cada una) (Eagle Hill Energy LP, 2023)
<b>Capacidad instalada</b>	4 MW (dos parques eólicos de 2 MW); cada parque eólico tiene 2 MW para cumplir con los límites de tamaño establecidos por el programa de productores de energía independientes (IPP) del Yukón (Eagle Hill Energy LP, 2023)
<b>Cronograma</b>	De 2016 (inicio) a 2024 (finalización) (Eagle Hill Energy LP, 2023)
<b>Costo total</b>	\$C25,086,336 (~\$EU18 millones) (Eagle Hill Energy LP, 2023)
<b>Fuentes de financiamiento</b>	Programa de Inversión en Infraestructura de Canadá, Programa de Energía Limpia para Comunidades Rurales y Remotas, Agencia de Desarrollo Económico del Norte de Canadá (Connors, 2023, y Gobierno de Yukón, 2023)
<b>Líder del proyecto y socios clave</b>	KDFN, CNLP, Northern Energy Capital (CNLP, 2024)
<b>Estructura de propiedad</b>	Indígena: 100% propiedad de la KDFN a través de CNLP (CNLP, 2024)
<b>Beneficios del proyecto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El proyecto genera ingresos significativos a largo plazo mediante la venta de electricidad a Yukon Energy Corporation, reinvertidos en infraestructura comunitaria esencial, como viviendas y carreteras (CNLP, 2024).</li> <li>• El equivalente en energía limpia de más de 615,000 litros de diésel se produjo en el primer año de generación energética (comunicación personal con Stephanie Cunha, Yukon Energy Corporation, 27 de junio de 2025). Las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen en alrededor de 4,000 toneladas anuales, lo que suma unas 100,000 toneladas durante los 25 años de operación del proyecto (Connors, 2023; EWT, 2023, y Environment Journal, 2023).</li> <li>• La KDFN ha pasado de ser desplazada por proyectos energéticos (como la presa Whitehorse) a convertirse en líder en energías renovables. Además, el proyecto creó empleos locales y apoyó el empoderamiento comunitario y la soberanía energética (CNLP, 2024).</li> </ul>



**Cuadro 7. Resultados de las entrevistas sobre el proyecto de energía eólica Haeckel Hill-Thay T'äw por fase de desarrollo del proyecto**

**Fase de desarrollo del proyecto**

**Hallazgos clave**

**Planeación**

La participación temprana y las asociaciones estructuradas fueron fundamentales. La KDFN aprovechó su Acuerdo del Tratado Moderno para garantizar su poder de decisión. La participación comunitaria ayudó a superar el escepticismo generado por fracasos de proyectos eólicos anteriores.

**Selección y adquisición de tecnología**

El proyecto se alineó con la política de productores de energía independientes (IPP) del Yukón, lo que permitió la propiedad de la Primera Nación.

**Financiamiento y permisos**

- El proyecto seleccionó turbinas EWT de 1 MW por su idoneidad en condiciones árticas remotas (WindpowerNL, 2023). Se requirió la aprobación regulatoria de las aspas de color negro de las turbinas para reducir la formación de hielo. La logística de la cadena de suministro y las adaptaciones a clima frío fueron factores importantes en las decisiones de compra.
- Fue esencial asegurar el financiamiento de fuentes federales, incluido el Fondo de Infraestructura de Canadá y la Agencia de Desarrollo Económico del Norte de Canadá (Gobierno de Canadá, 2023).
- La Junta de Evaluación Ambiental y Socioeconómica del Yukón otorgó la aprobación regulatoria, lo que aseguró el cumplimiento de la normativa ambiental (YESAB, s. f.).

**Instalación y puesta en marcha**

La construcción se completó según lo programado y por debajo del presupuesto, lo que permitió agregar mejoras tecnológicas e innovaciones posteriores a la finalización de la construcción. Se priorizó a contratistas locales para fortalecer la capacidad laboral regional. Se requirieron algunos ajustes técnicos para adaptar las turbinas a un sistema de 60 Hz, y se optimizó el rendimiento del sistema de calefacción de las aspas durante la puesta en marcha.

**Operación**

El proyecto enfrentó desafíos con la variabilidad del viento, particularmente en condiciones de frío extremo. La tecnología de calefacción por aspas es efectiva por encima de -20 °C, pero limitada a temperaturas más bajas.

## Resumen del proyecto de transición energética

El proyecto eólico Haeckel Hill-Thay T'äw representa un hito importante en el camino de la Primera Nación Kwanlin Dün hacia la soberanía energética. Ubicado en el territorio tradicional de la KDFN, este proyecto se beneficia del marco legal del tratado, que otorga a la KDFN autoridad en materia de planificación del uso de la tierra, gestión de los recursos y desarrollo económico. De manera crucial, el tratado establece que las empresas de servicios públicos y las entidades gubernamentales deben ofrecer a la KDFN una participación accionaria mínima de 25% en los proyectos de generación de energía desarrollados en sus tierras, lo que asegura rendimientos económicos significativos, mayor control comunitario y alineación con las prioridades locales (Crown-Indigenous Relations and Northern Affairs Canada, 2005).

Desarrollada de manera colaborativa por CNLP y Northern Energy Capital, Eagle Hill Energy Limited Partnership es la primera empresa totalmente indígena propietaria de energía eólica a escala de servicios públicos en el norte de Canadá. Eagle Hill Energy estructuró el financiamiento, construcción y operación del proyecto. Esta iniciativa no sólo reduce la dependencia del diésel y el gas natural licuado, sino que también proporciona ingresos sostenidos a la KDFN, sirviendo como un modelo replicable para el desarrollo de energías renovables liderado por comunidades indígenas.



## Hallazgos clave

El proyecto de energía eólica Haeckel Hill-Thay T'äw avanzó a través de varias fases, cada una de las cuales abordó desafíos técnicos, financieros y operativos. (El cuadro 7 presenta los hallazgos clave por fase del proyecto, resumidos a partir de entrevistas con la comunidad KDFN y los socios del mismo.)

El proyecto de energía eólica Haeckel Hill-Thay T'äw marca una transición histórica para la KDFN, demostrando su capacidad para poseer y operar infraestructura de energía renovable y sentando un sólido precedente para proyectos de desarrollo económico de propiedad indígena en el territorio del Yukón. A continuación se presentan las principales lecciones del proyecto.

Aprendizajes para las corporaciones de desarrollo de las Primeras Naciones:

- Las comunidades indígenas ahora pueden liderar los proyectos desde el principio en lugar de esperar a promotores externos.
- El desarrollo energético debe integrarse en la planificación económica a largo plazo para garantizar la coherencia con las prioridades de la comunidad.
- La estructura de gobierno de CNLP se mantuvo apolítica, lo que permitió que el proyecto de energía eólica de Haeckel Hill-Thay T'äw mantuviera el impulso y la continuidad a pesar del cambio de liderazgo en la KDFN tras las elecciones.

Aprendizajes para empresas de servicios públicos y desarrolladores:

- El financiamiento público es fundamental para hacer viables los proyectos eólicos en redes aisladas.
- Es necesario dar prioridad a las soluciones de almacenamiento de energía para gestionar la intermitencia de la energía eólica.
- La colaboración entre empresas de servicios públicos, Primeras Naciones y dependencias gubernamentales garantiza una integración más fluida del proyecto con apoyo en las políticas.



Este proyecto histórico e innovador ofrece un modelo viable y replicable para otras Primeras Naciones. A continuación se presentan los próximos pasos en curso o previstos para la KDFN y otras comunidades indígenas en el Yukón:

- La KDFN continúa ampliando su portafolios de energías renovables, consolidando su liderazgo hacia el desarrollo sustentable. Reconociendo la importancia de un crecimiento estructurado y equitativo de las energías renovables, los defensores de políticas están impulsando la creación de un marco de adquisición de energía liderado por pueblos indígenas para minimizar la competencia entre comunidades.
- Para abordar la intermitencia y fortalecer la confiabilidad de la red, la KDFN está invirtiendo estratégicamente en un sistema de almacenamiento de energía con una capacidad de 20 MW y 40 MWh, lo que refuerza su compromiso con una independencia energética proactiva, sustentable y centrada en la comunidad.
- Yukon Energy Corporation aprovecha el éxito del proyecto evaluando iniciativas de energías renovables a mayor escala, en particular el propuesto Proyecto de Energía Eólica y Almacenamiento Mount Sumanik, valorado en 200 millones de dólares canadienses (Yukon Energy Corporation, 2014, y Eagle Hill Energy LP, 2023).



# 3. Estudios de caso de Estados Unidos

## Contexto

Estados Unidos abarca una amplia variedad de suelos, características geográficas y climas, y las comunidades geográficamente aisladas en todo el país enfrentan desafíos y oportunidades únicas en relación con las transiciones energéticas. Algunas comunidades enfrentan limitaciones de infraestructura y aislamiento geográfico de los centros de población y de las redes eléctricas, lo que hace necesarias soluciones innovadoras y a la medida para el desarrollo energético sustentable.

Las tres comunidades geográficamente aisladas seleccionadas para estos estudios de caso se encuentran en el distrito de Northwest Arctic (NAB) (Alaska), Toro Negro en el municipio de Ciales (Puerto Rico) y Borrego Springs (California), las cuales han emprendido proyectos energéticos transformadores para mejorar su resiliencia y sustentabilidad.



Estos esfuerzos fueron posibles gracias a una combinación de programas federales y estatales —como las Subvenciones para Costos Energéticos Elevados del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, los fondos para la resiliencia del Departamento de Energía y las inversiones de la Comisión de Energía de California— junto con el liderazgo local y el apoyo de organizaciones sin fines de lucro. (En el anexo de este documento se proporcionan detalles adicionales sobre las políticas facilitadoras y las estructuras de financiamiento para cada proyecto.)

El distrito de Northwest Arctic (NAB) está expuesto al riguroso clima ártico y se encuentra a una distancia considerable de la red eléctrica. Su enfoque se ha centrado en aprovechar los recursos renovables locales para reducir la dependencia de costosos combustibles importados. Los esfuerzos de transición energética en esta región reflejan la estrategia más amplia del NAB de integrar fuentes de energía renovable, como la eólica y la solar, con los sistemas de generación en uso, a fin de garantizar un suministro confiable y asequible para sus habitantes.

Toro Negro, Puerto Rico, presenta un conjunto diferente de desafíos y oportunidades. Tras el paso de devastadores huracanes, la comunidad recurrió a la tecnología de microrredes y a la energía solar para reconstruir y crear un sistema energético más resiliente. Esta transición responde no sólo a un proceso de recuperación, sino también a la construcción de una infraestructura energética sostenible que resista futuros fenómenos meteorológicos extremos y reduzca la dependencia de los combustibles fósiles.

Borrego Springs, California, constituye un caso destacado de innovación liderada por una empresa de servicios públicos en una comunidad desértica geográficamente aislada. Desarrollada y operada por San Diego Gas & Electric (SDG&E), la microrred inteligente se creó para mejorar la confiabilidad en una región abastecida por una sola línea de transmisión. El sistema ha permitido la integración parcial de recursos solares locales y ha proporcionado energía de respaldo durante cortes programados, incluidos los realizados por motivos de seguridad pública. Si bien quienes habitan esta comunidad han expresado su reconocimiento por el desempeño del sistema durante esos eventos, también han manifestado frustración frente a sus limitaciones durante interrupciones no planificadas. El proyecto destaca tanto las oportunidades como las complejidades de implementar tecnologías de red avanzadas en entornos rurales y aislados, especialmente cuando las expectativas de la comunidad y las realidades de la infraestructura no están alineadas por completo.

En conjunto, estos proyectos ilustran la diversidad de enfoques y soluciones innovadoras que se emplean en Estados Unidos para atender las necesidades energéticas específicas de comunidades geográficamente aisladas.

# El poder de lo colectivo: la transición energética colaborativa de Shungnak y Kobuk en el distrito de Northwest Arctic

“Si una comunidad desea energía limpia, debe preguntarse: ¿Queremos controlar nuestro futuro energético? ¿Queremos reducir costos? Todo empieza por reunir a todos, debatir y elaborar un plan. Así sucedió en Shungnak y Kobuk”

Ingemar Mathiasson, gerente de Energía,  
distrito de Northwest Arctic

El NAB en Alaska, que abarca un área de poco más de 100,000 kilómetros cuadrados (39,000 millas cuadradas), presta servicio a 7,793 residentes distribuidos en las comunidades de Ambler, Buckland, Deering, Kiana, Kivalina, Kobuk, Kotzebue, Noatak, Noorvik, Selawik y Shungnak (US Census Bureau, 2020). El modo de vida de esta región, habitada sobre todo por el pueblo Iñupiat, está profundamente ligado a la tierra y los recursos naturales. El NAB se caracteriza por su ubicación geográfica aislada, condiciones climáticas desafiantes y una fuerte dependencia del diésel —costoso e insostenible en términos ambientales— para la generación de energía.

En los últimos años, el NAB redujo significativamente su dependencia del diésel al integrar fuentes de energía renovable, como la eólica y la solar (Meadows *et al.*, 2025, y Anderson *et al.*, 2023). Esta transición está estrechamente vinculada con la búsqueda de autodeterminación y soberanía energética de las comunidades, así como con la creación de productores de energía independientes (IPP, por sus siglas en inglés) sin fines de lucro. Históricamente, la región dependía en gran medida de generadores diésel, costosos e insostenibles en términos ambientales (Vera *et al.*, 2020). A inicios de la década de 2010 se llevaron a cabo estudios de factibilidad y proyectos iniciales para comenzar a explorar soluciones energéticas alternativas, como sistemas híbridos eólico-diésel e instalaciones fotovoltaicas solares (WHPacific, 2010, y Alaska Energy Authority, 2014). Para 2014, varias comunidades ya habían instalado paneles solares fotovoltaicos para abastecer infraestructura esencial, como plantas de agua y alcantarillado, reduciendo los costos operativos y el consumo de diésel (Uddin *et al.*, 2023).



Este estudio de caso se centra en las comunidades de Shungnak y Kobuk con el fin de comprender mejor los desafíos y logros únicos de las comunidades más pequeñas y remotas del Northwest Arctic. Son comunidades que han aprovechado soluciones de energía renovable para abordar problemas críticos como el aislamiento geográfico, los altos costos energéticos y el impacto ambiental. Shungnak, con una población en declive de 247 habitantes en 2024, ha impulsado proyectos de energía solar fotovoltaica y almacenamiento en baterías para reducir su dependencia del diésel. De manera similar, Kobuk, con 156 habitantes en 2021, ha adoptado sistemas de energía híbridos para abastecer infraestructura esencial mientras reduce los costos operativos y las emisiones.



Históricamente, la energía eléctrica de Shungnak y Kobuk dependió por completo de generadores diésel. Esta dependencia planteaba desafíos importantes, como los altos costos de transporte del combustible y las preocupaciones ambientales relacionadas con las emisiones. En respuesta, Shungnak emprendió un ambicioso proyecto de transición energética. Aunque los costos de la electricidad generada con diésel han sido parcialmente compensados por el programa Power Cost Equalization (PCE) de Alaska, que otorga subsidios financieros para reducir los gastos de electricidad en comunidades rurales, dicho subsidio no cubre todos los costos ni aborda por completo la inestabilidad asociada a la dependencia de combustibles importados (Alaska Energy Authority, 2019). La persistente carga financiera y la vulnerabilidad a las interrupciones en el suministro externo de combustible subrayaron la crucial necesidad de avanzar hacia un sistema energético más sustentable y controlado localmente.

### **Resumen del proyecto de transición energética**

La transición energética en Shungnak y Kobuk refleja cómo la planificación coordinada y la infraestructura pueden facilitar soluciones innovadoras de energía limpia en comunidades geográficamente aisladas. Ambas aldeas se benefician de una interconexión eléctrica construida en 1994 por la Cooperativa Eléctrica de Alaska (*Alaska Village Electric Cooperative, AVEC*). Esta conexión hizo posible centralizar la generación en Shungnak y, al mismo tiempo, suministrar electricidad a ambas comunidades, sentando las bases para el beneficio compartido de las nuevas inversiones en energías renovables.

El primer paso de Shungnak ocurrió en 2016 con la instalación de un sistema solar fotovoltaico de 7.5 kW para abastecer la planta de tratamiento de agua. Sobre la base de ese éxito inicial, la comunidad puso en marcha en 2021 un sistema mucho más grande: una microrred solar con baterías que incluye un arreglo solar de 223.5 kW y un sistema de almacenamiento de energía eléctrica en baterías (SAEB) de 352 kWh. El proyecto ahora sustituye más de 9,800 galones de diésel cada año, con lo que demuestra el poder del liderazgo local, las alianzas estratégicas y la colaboración intercomunitaria para fortalecer la resiliencia energética en el Ártico (Anderson et al., 2023, y NAB, s. f.). (El cuadro 8 presenta un breve resumen e impactos del proyecto.)



### **Hallazgos clave**

El desarrollo e implementación de la microrred solar con baterías en Shungnak y Kobuk fue el resultado de un proceso deliberado y en múltiples fases, adaptado a las condiciones únicas de la Alaska rural. Desde la etapa inicial de planificación hasta la operación en curso, cada fase del proyecto combinó liderazgo comunitario, adaptación técnica y resolución colaborativa de problemas. (El cuadro 9 presenta los principales hallazgos por fase del proyecto, resumidos a partir del proceso de entrevistas con las comunidades de Shungnak y Kobuk.)

La transición a energías renovables en Shungnak y Kobuk ejemplifica el potencial de las comunidades remotas de Alaska para dejar de lado la dependencia del diésel y adoptar sistemas energéticos sostenibles gestionados localmente. Las principales lecciones del proyecto son las siguientes:

- El liderazgo local sólido impulsa el éxito del proyecto. NAB y las personas líderes de la comunidad desempeñaron un papel fundamental en el seguimiento del proyecto, la coordinación entre organismos y la armonización con las prioridades locales.
- La inversión temprana en el fortalecimiento de capacidades genera beneficios a largo plazo. Capacitar a los residentes locales para operar y mantener el sistema redujo la dependencia de contratistas externos y fomentó la apropiación comunitaria del proyecto.
- Las alianzas deben respetar los tiempos de la comunidad. La coordinación con financiadores, desarrolladores y gobiernos locales requirió paciencia y flexibilidad, sobre todo en lugares remotos donde el clima, los horarios de transporte y las temporadas de subsistencia condicionan los plazos.

- La equidad energética mejora cuando los proyectos consideran el ahorro de costos. Al reducir el uso de diésel, el proyecto aminoró los costos de combustible y estabilizó la disponibilidad de energía, con lo que generó beneficios económicos tangibles para hogares e instituciones.
- El éxito en una comunidad impulsa a otras. El modelo Shungnak-Kobuk ha inspirado a comunidades vecinas al demostrar el valor de soluciones de energía renovable escalables y adaptadas localmente en la región.

A continuación se plantean los próximos pasos previstos y potenciales para Shungnak y Kobuk:

- Para consolidar sus logros, las comunidades planean mejorar la capacidad del inversor, lo que permitirá la plena utilización del actual sistema de baterías de 352 kWh y maximizar la eficiencia energética.
- Una expansión de la capacidad del sistema fotovoltaico permitirá reducir aún más el uso de diésel y obtener mayores beneficios económicos.
- Es esencial seguir invirtiendo en la capacitación de la comunidad, incluida la formación avanzada de los operadores locales en la gestión de sistemas energéticos.
- Compartir de forma proactiva los conocimientos y las lecciones aprendidas del proyecto con las comunidades remotas vecinas fomentará transiciones renovables similares en toda la región.
- Por último, destinar una parte de los ingresos del proyecto para la creación de un fondo específico de mantenimiento y reparación garantizará la sostenibilidad operativa a largo plazo, reforzando un modelo replicable de independencia energética, crecimiento económico y responsabilidad ambiental en las zonas rurales de Alaska.





**Cuadro 8. Resumen del proyecto de energía de Shungnak y Kobuk**

Detalle del proyecto	Descripción
<b>Tecnología</b>	Paneles solares fotovoltaicos bifaciales, sistema de almacenamiento de energía en baterías, inversor, controlador de microrred
<b>Capacidad instalada</b>	Solar fotovoltaica: 223 kW Baterías de almacenamiento: 352 kWh
<b>Cronograma</b>	Enero de 2020-diciembre de 2021
<b>Costo total</b>	\$EU2.3 millones
<b>Fuentes de financiamiento</b>	Subvención para altos costos de energía del Departamento de Agricultura de Estados Unidos: \$EU1,219,675 Fondo de Mejoramiento de Aldeas del Distrito de Northwest Arctic: \$EU800,000
<b>Líder del proyecto y socios clave</b>	AVEC Alaska Native Renewable Industries Ageto (proveedor de controladores de microrredes) Blue Planet Energy (proveedor de baterías)
<b>Estructura de propiedad</b>	El proyecto, estructurado como un IPP (productor de energía independiente), es operado por las entidades tribales de Shungnak y Kobuk, sus propietarios. El IPP vende energía a AVEC mediante un acuerdo. Los ingresos se utilizan para mantener el sistema, cubrir los costos operativos y proporcionar beneficios económicos a las comunidades.
<b>Beneficios del proyecto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se fortaleció la propiedad comunitaria de los recursos energéticos, lo que fomentó un sentido de empoderamiento y autosuficiencia.</li> <li>• La reducción en el consumo de diésel disminuyó tanto los costos de energía como las emisiones de gases de efecto invernadero y generó un flujo de ingresos para la comunidad a través del modelo IPP.</li> <li>• El proyecto genera alrededor de \$EU100,000 anuales en ingresos netos, que se reinvierten en la comunidad.</li> <li>• Se necesita transportar menos combustible diésel, lo que reduce riesgos de derrames y contaminación.</li> <li>• El proyecto ha cumplido o superado las expectativas al lograr una penetración de energía renovable de 11%, sustituir consumo de diésel y generar ingresos para financiar proyectos comunitarios como la instalación de bombas de calor.</li> </ul>

Fuente: Información de la tabla procedente de Anderson et al. (2023), y Meadows et al. (2025).

**Cuadro 9. Resultados de las entrevistas relacionadas con los sistemas implementados en Shungnak y Kobuk por fase de desarrollo del proyecto**

Fase de desarrollo del proyecto	Hallazgos clave	Fase de desarrollo del proyecto	Hallazgos clave
<b>Planeación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El establecimiento de un IPP permitió a la comunidad mantener la propiedad y reinvertir los ingresos procedentes de la venta de energía.</li> <li>El potencial de energías renovables en Shungnak fue cuidadosamente evaluado durante la fase de planificación. Se identificó la energía solar como un recurso viable. Aunque la variabilidad estacional de la energía solar representaba diversos retos, el sistema se diseñó para priorizar el aporte solar en los picos de disponibilidad, utilizando un respaldo mínimo de diésel durante los meses más oscuros.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Los acuerdos de uso de suelo se abordaron en el proceso de concesión de permisos. La ciudad de Shungnak proporcionó los terrenos para los paneles solares y la infraestructura de la microrred, arrendándolos formalmente al IPP tribal.</li> <li>El equipo del proyecto colaboró con AVEC para garantizar la integración fluida del sistema renovable a la red existente basada en diésel. Esta colaboración también aseguró el cumplimiento con los requisitos del PCE y evitó interrupciones en los ahorros de costos energéticos de la comunidad.</li> </ul>
<b>Selección y adquisición de tecnología</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El proyecto utilizó paneles solares bifaciales, que capturan la luz solar por ambos lados para aumentar la eficiencia. Los paneles se instalaron en una configuración semicircular para optimizar la captación de energía durante todo el día, considerando las condiciones solares únicas de Alaska, como los ángulos bajos del sol y las largas horas de luz durante el verano.</li> <li>Entre los retos presentes durante el proceso de adquisición figuran los problemas de compatibilidad del sistema. Algunos componentes, como los optimizadores SolarEdge, presentaron fallas iniciales superiores a las esperadas, si bien se resolvieron mediante ajustes y reparación técnicos.</li> <li>La instalación sobre la tundra presentó retos únicos. El diseño del sistema enfrentó el desplazamiento del permafrost mediante estructuras de soporte especializadas para garantizar la estabilidad a pesar de los movimientos del terreno.</li> </ul>	<b>Instalación y puesta en marcha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La ubicación remota de Shungnak y sus condiciones árticas extremas plantearon retos para la instalación del sistema. Fue necesario clavar en el permafrost las estructuras de soporte y se utilizaron estructuras especiales para adaptarse al terreno inestable. A pesar de estas dificultades, el proyecto se completó eficazmente con ajustes menores al diseño original.</li> <li>Cada componente, incluidas las baterías (de Blue Planet) y el controlador de la microrred (de Agito), se probó y calibró para garantizar un funcionamiento perfecto. AVEC facilitó la puesta en marcha final para integrar el sistema a la red existente. El proyecto experimentó un ligero sobrecosto por \$EU200,000, cubiertos por el Village Improvement Fund.</li> </ul>
<b>Financiamiento y permisos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El proyecto energético de Shungnak requirió una cuidadosa alineación con el programa PCE con el fin de maximizar los beneficios financieros para la comunidad.</li> <li>Para cumplir los requisitos federales, el proyecto se evaluó conforme a la Ley Nacional de Política Ambiental bajo las directrices del Departamento de Agricultura de Estados Unidos. La revisión se completó sin retrasos significativos, lo que dio vía libre a la etapa de construcción.</li> <li>El financiamiento del proyecto se logró por una combinación de fondos federales y locales. La creación de un IPP permitió a la comunidad generar ingresos mediante la venta de energía renovable a AVEC en virtud de un acuerdo. Los ingresos procedentes de la venta de energía se reinvierten en el mantenimiento del sistema, costos operativos y desarrollo de la comunidad.</li> </ul>	<b>Operación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El mantenimiento del proyecto se lleva a cabo con mano de obra local y sistemas de supervisión a distancia. AVEC continúa ocupándose de la supervisión operativa, mientras que los operadores tribales realizan el mantenimiento diario.</li> <li>Los residentes tribales fueron capacitados para gestionar operaciones rutinarias, como el monitoreo del rendimiento de las baterías y la estabilidad de la microrred. Capacitación adicional aborda cuestiones como los ajustes de estructuras frente al desplazamiento del permafrost.</li> <li>El proyecto ha fortalecido la capacidad local al emplear y capacitar a residentes tribales en la operación de sistemas energéticos.</li> </ul>

Fuente: Información de la tabla procedente de Anderson et al. (2023), y Meadows et al. (2025).

# Desatar el potencial de la microrred de Borrego Springs: una historia de superación de desafíos

“Borrego Springs es único porque estamos limitados por nuestra ubicación: nuestra única línea eléctrica cruza un parque estatal. Esto hace que la resiliencia energética sea no sólo un objetivo, sino una necesidad”

John Peterson, Grupo de Patrocinadores de Borrego Springs

Borrego Springs, California, es una pequeña comunidad no incorporada que se ubica en el corazón del Parque Estatal del Desierto de Anza-Borrego, el parque estatal más grande de California, conocido por sus impresionantes paisajes desérticos y cielos nocturnos llenos de estrellas. La comunidad tiene una población aproximada a 3,500 residentes (Census Reporter, 2022). El parque estatal desempeña un papel fundamental en la identidad y economía del pueblo. Atrae entre 650,000 y un millón de visitantes al año, lo que convierte al turismo en el principal motor económico de la comunidad (County of San Diego, 2011, pp.5-6). Los residentes se benefician de la importancia ambiental y cultural única del parque. Alberga miles de yacimientos arqueológicos vinculados al legado de los pueblos Cahuilla y Kumeyaay. Su espíritu de preservación influye en las decisiones de desarrollo e infraestructura locales. La economía de Borrego Springs también se orienta hacia personas jubiladas y visitantes estacionales, con servicios como hoteles, restaurantes e instalaciones recreativas (County of San Diego, 2011, pp. 6-9).



Borrego Springs experimenta frecuentes interrupciones de energía debido a su exposición a fenómenos meteorológicos extremos como incendios forestales, fuertes vientos, inundaciones repentinas y rayos. Estos riesgos se agravan por la ubicación de la comunidad al final de una sola línea de transmisión operada por SDG&E, lo que hace vulnerable a interrupciones el suministro de energía (Katmale *et al.*, 2019).



### Cuadro 10. Resumen del proyecto energético de Borrego Springs

Detalle del proyecto	Descripción
Tecnología	Solar fotovoltaica, SAEB, ultracapacitor, generador convencional
Capacidad instalada	Planta solar fotovoltaica de 26 MW (no propiedad de la empresa de servicios) 8.6 MW de energía solar en azoteas (no propiedad de la empresa de servicios) Batería de 500 kW/1.5 MWh Batería de 1 MW/3 MWh Ultracapacitor de 250 kW Generador de 4.4 MW Batería de 7.3 MW/14.6 MWh (en fase de puesta en marcha)
Cronograma	La planificación inicial comenzó en 2008 y los componentes significativos empezaron a operar en 2013. Las mejoras al sistema continúan en curso (Katmale et al., 2019).
Costo total	Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE): \$EU6.1 millones Comisión de Energía de California: \$EU6.9 millones Financiamiento adicional del DOE: \$EU4.5 millones La contribución de costos de SDG&E no se detalló en su totalidad (Katmale et al., 2019).
Fuentes de financiamiento	DOE, Comisión de Energía de California, SDG&E
Líder del proyecto y socios clave	SDG&E con apoyo de la Comisión de Energía de California y el DOE
Estructura de propiedad	Propiedad de la empresa de servicios públicos
Beneficios del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>En términos económicos, la microrred ha mejorado la confiabilidad durante cortes planificados: en particular, por seguridad pública, los apagones. Sin embargo, muchos residentes aún experimentan interrupciones no planificadas, lo que genera percepciones mixtas sobre el impacto de la microrred en el turismo y la estabilidad económica local. Aunque el proyecto apoyó el empleo en el sector energético y el desarrollo regional de energías renovables, quienes habitan esta comunidad han manifestado su preocupación por la limitada creación directa de empleos dentro de Borrego Springs (Katmale et al., 2019).</li> <li>Además de mejorar la resiliencia durante cortes planificados, la microrred busca reducir la dependencia de la electricidad importada generada con combustibles fósiles mediante la generación y almacenamiento locales. Aunque estos desarrollos pueden disminuir los costos de energía, aún no hay evidencia concreta de ahorros para la comunidad, y algunos residentes han expresado inquietudes sobre la distribución equitativa de los beneficios (Barabino et al., 2023).</li> <li>Si bien el avanzado diseño de la microrred ha reducido la dependencia de generadores diésel, la percepción comunitaria sobre su efectividad no ha sido del todo favorable.</li> </ul>

Cuadro 11. Resultados de las entrevistas relacionadas con el proyecto de Borrego Springs por fase del proyecto (Parte 1)

Fase de desarrollo del proyecto

Hallazgos clave

Planeación

- Debido a la limitada participación de la comunidad en el proceso de planificación liderado por la empresa de servicios públicos, se pasaron por alto preocupaciones locales, incluida la fuerte y sostenida oposición a una propuesta anterior de SDG&E para expandir las líneas de transmisión a través del parque estatal del desierto de Anza-Borrego. Aunque la ruta finalmente se modificó, este episodio sigue influyendo en la confianza de la comunidad en los proyectos liderados por la empresa.

Selección y adquisición de tecnología

La tecnología para la microrred de Borrego Springs fue seleccionada para responder a los desafíos operativos específicos que implica mantener el suministro energético en un entorno desértico aislado en términos geográficos. El diseño del sistema refleja una combinación de tecnologías tradicionales y avanzadas adaptadas a condiciones climáticas extremas, acceso limitado a la línea de transmisión y la necesidad de capacidad de operación en modo isla. La integración del sistema estuvo limitada por restricciones técnicas y una fuerte oposición comunitaria a expandir la infraestructura hacia áreas protegidas, lo que reflejó prioridades ambientales y culturales.

Entre los componentes técnicos clave se encuentran:

**Sistemas de almacenamiento de energía**

- Batería de 500 kW/1.5 MWh
- Batería de 1 MW/3 MWh (el activo formador de red o modo isla)
- Ultracondensador de 250 kW (apoya la estabilización de corta duración)
- Batería de 7.3 MW/14.6 MWh (en proceso de puesta en marcha para reemplazar la batería de 1 MW en modo isla)
- Generador convencional de 4.4 MW (incorporado recientemente para respaldar la fiabilidad del sistema durante los cortes de energía)

**Generación solar**

- Aunque cerca de la zona existe un sistema solar fotovoltaico de 26 MW a gran escala, es de propiedad privada (de Clearway) y no forma parte de la microrred. SDG&E tuvo acceso limitado a algunos inversores, pero este recurso ya no se utiliza debido a la complejidad del conmutado.
- En techos de la comunidad se dispone de energía solar por alrededor de 8.6 MW; sin embargo, estos sistemas no están controlados por la empresa y no pueden coordinarse durante operaciones en modo isla.

**Consideraciones en la compra**

- Los activos de la microrred se adquirieron para satisfacer capacidades de formación de red, balanceo de carga y arranque en negro. La adquisición inicial se centró en demostrar la funcionalidad de la microrred durante cortes planificados y escenarios limitados de operación en isla.

Financiamiento y permisos

Asegurar el financiamiento y abordar los requisitos de permisos fueron hitos cruciales en el desarrollo de la microrred. El proyecto fue respaldado por subvenciones significativas (véase el cuadro 10). Aunque SDG&E manejó procesos regulatorios y de permisos complejos, algunos residentes señalaron que la participación comunitaria fue limitada o reactiva. El proyecto ilustra los desafíos de alinear el desarrollo técnico con una comunicación proactiva e inclusiva, en especial en comunidades geográficamente aisladas.





Cuadro 11. Resultados de las entrevistas relacionadas con el proyecto de Borrego Springs por fase del proyecto (Parte 2)

Fase de desarrollo del proyecto

Hallazgos clave

Instalación y puesta en marcha

La instalación y puesta en marcha de la microrred de Borrego Springs requirió adaptar infraestructura en uso para dar cabida a una combinación híbrida de tecnologías solares, de almacenamiento en baterías y de generación convencional. El proyecto se desarrolló por etapas: comenzó con la integración de los primeros sistemas de almacenamiento y culminó con la puesta en marcha de un generador de 4.4 MW y la integración gradual de un nuevo sistema de baterías de 7.3 MW/14.6 MWh.

Principales desafíos durante la instalación:

- **Integración del sistema:** La coordinación de la infraestructura existente con las nuevas tecnologías de formación de red y balanceo de carga requirió soluciones de ingeniería específicas y pruebas por etapas. Esto incluyó la configuración de controles en tiempo real en los distintos componentes de la microrred.
- **Restricciones ambientales y del sitio:** Las temperaturas extremas del desierto y las limitaciones de acceso al lugar añadieron complejidad al cronograma de instalación. Los componentes del sistema se seleccionaron e instalaron teniendo en cuenta la durabilidad y la operabilidad en condiciones remotas.
- **Proceso de puesta en marcha:** Los sistemas iniciales de baterías y ultracondensadores se pusieron en funcionamiento junto con la generación de respaldo existente. La puesta en marcha de la batería de 7.3 MW/14.6 MWh —que se espera se convierta en el nuevo *island master*— está en curso y programada para completarse en el tercer trimestre de 2025.

Si bien la puesta en marcha técnica se completó con éxito en fases anteriores, la funcionalidad completa de la microrred —en especial, la operación en isla sin interrupciones durante cortes no planificados— sigue en desarrollo. La empresa espera que la puesta en marcha de la nueva batería amplíe de manera significativa la capacidad del sistema con la aportación de un control de frecuencia más robusto y servicios de formación de red (Katmale et al., 2019, y SDG&E, 2024).

Operación

- Aunque el sistema ha demostrado su funcionalidad durante algunos cortes planificados, su desempeño durante eventos no planificados ha sido variable. Estas inconsistencias se atribuyen principalmente a problemas de comunicación y control entre los componentes del sistema durante perturbaciones en la red.
- La capacidad de la microrred para abastecer por completo a la comunidad en condiciones de operación en isla aún está en evolución. Los protocolos operativos siguen refinándose, particularmente en preparación para la integración de la nueva batería de larga duración como activo principal de formación de red. Una vez puesta en marcha por completo, se espera que esta batería mejore la estabilidad de frecuencia y voltaje, además de participar en el mercado del California Independent System Operator durante condiciones de red normales.
- Los actores comunitarios destacaron que el valor fundamental de la microrred radica en su capacidad de operar de manera independiente durante los cortes, y que mejorar la resiliencia local —no aumentar la interconexión— debe seguir siendo la prioridad del proyecto.
- Algunos residentes han expresado frustración porque la microrred no ha funcionado de manera consistente durante los cortes no planificados, con lo que se reforzó la percepción de que la fiabilidad no ha mejorado de modo sustancial.

## Resumen del proyecto de transición energética

En respuesta a los persistentes problemas de confiabilidad energética, SDG&E lideró el desarrollo de la microrred de Borrego Springs, con el apoyo de un importante financiamiento público. Aunque se ubica cerca una planta solar fotovoltaica de 26 MW —creada por NRG y ahora propiedad de Clearway—, no forma parte de la microrred en operación. SDG&E tuvo acceso limitado a varios inversores en el sitio para apoyar la red, pero este acuerdo ya concluyó. En su lugar, la microrred funciona con activos gestionados por la empresa de servicios públicos, que incluyen una batería de 500 kW/1,5 MWh, una batería de 1 MW/3 MWh, un ultracapacitor de 250 kW y un generador de 4,4 MW puesto en marcha recientemente. La comunidad cuenta también con alrededor de 8,6 MW de energía solar en azoteas, aunque no están bajo control de la empresa. Una nueva batería de 7.3 MW/14.6 MWh se convertirá, ya en plena operación, en el principal activo formador de red. La participación de la comunidad durante la fase inicial de planificación del proyecto fue limitada, lo que ha contribuido a preocupaciones persistentes alrededor de la transparencia, la autoridad en la toma de decisiones y la alineación con las prioridades locales. (El cuadro 10 presenta un resumen del proyecto y enumera sus métricas y beneficios.)

## Hallazgos clave

La microrred de Borrego Springs, en el sur de California, es una de las primeras iniciativas de servicios públicos de Estados Unidos para mejorar la resiliencia energética en un entorno remoto y de alto riesgo. Desarrollado y gestionado por SDG&E, el proyecto integra energía solar, almacenamiento en baterías y sistemas



diésel heredados para dar servicio a una comunidad desértica afectada con frecuencia por apagones y fenómenos climáticos como incendios forestales que dañan la infraestructura energética. El desarrollo de la microrred supuso una compleja combinación de innovación técnica, consideraciones ambientales y procesos regulatorios. (El cuadro 11, que resume los principales hallazgos de las entrevistas en cada fase del proyecto, arroja luz sobre los logros y los retos, en particular en torno a la participación de la comunidad y el desempeño del sistema.)

Tras consultar a la comunidad de Borrego Springs y estudiar su proyecto energético de microrred, destacan las siguientes lecciones aprendidas:

- El almacenamiento debe cumplir con lo prometido. La limitada duración del respaldo ha impedido que la microrred cumpla con las expectativas de confiabilidad.
- Priorizar la resiliencia local sobre la expansión de la transmisión. Aunque algunos expertos técnicos señalan las limitaciones en la transmisión como un obstáculo para la integración solar, los residentes subrayaron que mejorar el desempeño de la microrred —con un almacenamiento reforzado y una mayor capacidad de operación en modo aislado— es más importante que construir nueva infraestructura de transmisión.
- La confianza depende de una participación temprana. La planificación no inclusiva contribuyó a la desconfianza de la comunidad.
- El contexto ambiental debe guiar la planificación de la infraestructura. La oposición comunitaria a propuestas anteriores para expandir líneas de transmisión a través de áreas naturales protegidas ilustra cómo los esfuerzos de desarrollo del pasado siguen influyendo en las actitudes locales hacia la infraestructura y la conservación.
- La capacidad local es importante. Sin un plan energético impulsado por la comunidad, los residentes siguen marginados en la definición de su propio futuro energético.

A pesar de los notorios avances en las mejoras de la red y de varias interrupciones programadas exitosas que demostraron el potencial de la microrred para abastecer a toda la comunidad de Borrego Springs, persisten algunos desafíos. Dos residentes



de la comunidad, representantes de organizaciones locales sin fines de lucro, expresaron su insatisfacción al señalar casos en los que la microrred no operó según lo previsto durante interrupciones no programadas. Estas fallas, atribuibles en gran medida a problemas de comunicación entre el controlador de la microrred y el sistema de respuesta de frecuencia, han alimentado el escepticismo continuo respecto a su confiabilidad. Si bien el proyecto ha contribuido al avance del conocimiento técnico de los sistemas de microrredes que combinan energía solar y almacenamiento, aún se requiere investigación y perfeccionamiento para abordar la estabilización de voltaje y frecuencia, aspectos críticos en el contexto de la creciente adopción de energías renovables en California.

Este caso resalta la importancia de diferenciar entre los logros técnicos y la experiencia vivida por la comunidad. Aunque la microrred representa una innovación significativa liderada por la empresa eléctrica, algunos residentes de Borrego Springs siguen preocupados por la falta de beneficios locales tangibles y la escasa participación comunitaria en decisiones clave.

Con miras al futuro, las acciones prioritarias podrían incluir:

- Ampliar la capacidad de almacenamiento local para fortalecer la capacidad de operación en modo aislado;
- explorar soluciones no basadas en infraestructura eléctrica tradicional (*non-wired solutions*) que cumplan funciones de transmisión respetando los límites de conservación, y
- profundizar en la participación local para alinear las estrategias energéticas con los objetivos y valores de la comunidad.



# Sobrevivientes solares: la luz después de la tormenta de Toro Negro

“Con todos los pros y los contras y con todas las dificultades y éxitos que el proyecto ha enfrentado, creemos que ha sido de entero beneficio para nuestra comunidad y, sin importar cuál sea el desenlace, siempre será un bien adquirido gracias al esfuerzo y compromiso de todos”

José Figueroa, líder comunitario de Toro Negro

Toro Negro es una pequeña comunidad de 62 habitantes asentada en la región montañosa central de Puerto Rico, en el municipio de Ciales. Ubicada en el Bosque Estatal de Toro Negro, esta área se caracteriza por su exuberante vegetación tropical y diversos ecosistemas, incluidos bosques nubosos y regiones montañosas. El terreno accidentado presenta pendientes pronunciadas y una red de ríos y arroyos que contribuyen al sistema hidrológico de la isla.

La economía local se centra en la agricultura a pequeña escala en la que el cultivo del café es una actividad importante, junto con la agricultura de subsistencia de tubérculos y frutas. Quienes habitan esta comunidad se dedican también a la artesanía tradicional, como el tejido y la carpintería, y algunos contribuyen a iniciativas de ecoturismo, dada la proximidad de la zona a rutas de senderismo y atracciones naturales como las cascadas. La identidad cultural de Toro Negro está profundamente ligada a su rico patrimonio ambiental y a sus tradiciones agrícolas. Además, Toro Negro destaca como comunidad muy unida, en la que sus habitantes entienden la importancia de apoyarse unos a otros. Son generosos y disfrutan al compartir su experiencia con los paneles solares y las baterías de almacenamiento de energía.

El huracán *María* en 2017 causó un prolongado apagón eléctrico —duró ocho meses— que evidenció la urgente necesidad de una energía más fiable en Puerto Rico, sobre todo para las comunidades rurales montañosas, que ya desde antes experimentaban problemas de electricidad consistentes.



## Resumen del proyecto de transición energética

Reconociendo la necesidad crítica de contar con una fuente de energía resiliente, la comunidad tomó la iniciativa de desarrollar una microrred solar, la primera de este tipo en Puerto Rico. Este esfuerzo, encabezado por el líder comunitario José Figueroa, contó con el apoyo de la Fundación Comunitaria de Puerto Rico (FCPR) y Somos Solar, que donaron los recursos económicos necesarios para las instalaciones fotovoltaicas y de almacenamiento en baterías. En marzo de 2018, Toro Negro estableció la primera microrred solar comunitaria de Puerto Rico, una red descentralizada compuesta por 20 sistemas fotovoltaicos y de almacenamiento en baterías que proporcionó energía a 28 hogares y a su centro comunitario. El diseño único y adaptado a la topografía de la comunidad incluye paneles solares desmontables instalados en los techos y conexiones eléctricas subterráneas, lo que proporciona resiliencia frente a futuras tormentas y vientos de alta velocidad (Deng *et al.*, 2019). Gracias a su configuración en isla, la microrred puede proporcionar energía confiable incluso cuando se ve afectada la red principal. (En el cuadro 12 se presenta un resumen del proyecto y su impacto en la comunidad.)

Trece de los 20 sistemas instalados suministran energía a viviendas individuales; seis pueden abastecer a dos viviendas, y uno a tres de éstas. Cada hogar cuenta con un medidor para registrar el consumo de energía y un interruptor de transferencia en caso de que deseen conectarse a la red principal. Seis sistemas tienen la capacidad de exportar energía a la red eléctrica del país; sin embargo, las regulaciones actuales, administradas por la Oficina de Energía de Puerto Rico (Puerto Rico Energy Bureau) y el operador del servicio eléctrico LUMA, no permiten el medidor neto en los casos de Toro Negro donde más de una vivienda está conectada a un mismo sistema fotovoltaico (Deng *et al.*, 2019). Como resultado, los sistemas, en su mayor parte, permanecen interconectados eléctricamente, pero no inyectan activamente energía a la red. Su función principal es suministrar electricidad directa a los hogares —en especial durante interrupciones del servicio— más que maximizar los beneficios económicos. Tampoco se cuenta con acceso a datos históricos de generación de energía, lo que dificulta aún más estimar tarifas o calcular el retorno de la inversión.

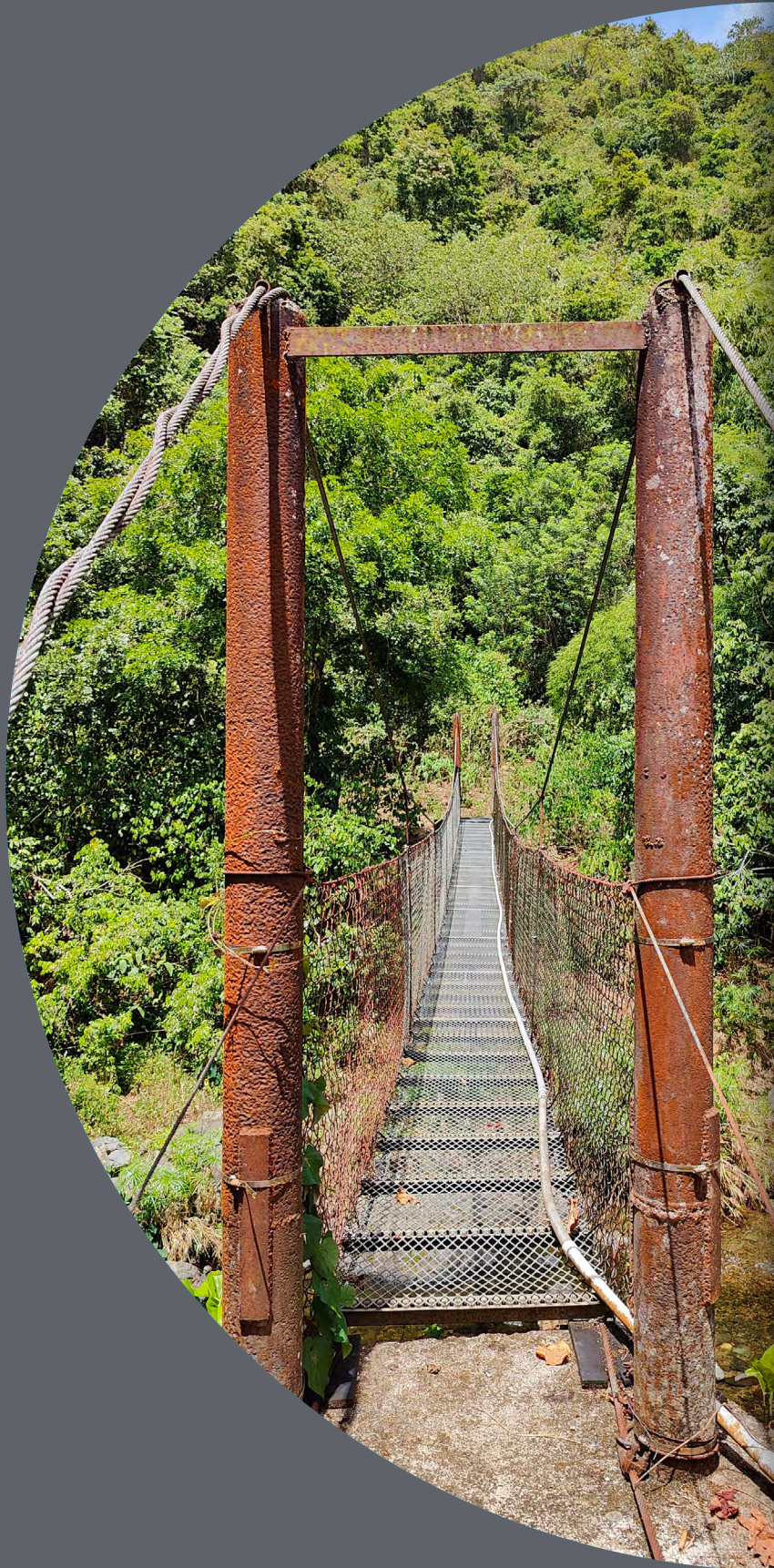
El sistema se diseñó con el objetivo de ofrecer resiliencia y beneficio comunitarios, más que obtener una rentabilidad financiera. Máximo Solar fue la empresa responsable de la construcción de la microrred, y SunSol LLC fue el proveedor. En la actualidad, SunSol cobra una tarifa mensual de 735 dólares estadounidenses por servicios básicos de mantenimiento y administración de todos los sistemas (Comunicación personal con José Figueroa, líder comunitario de Toro Negro, 31 de mayo de 2025).



**Cuadro 12. Resumen del proyecto de paneles solares de Toro Negro**

**Detalle del proyecto Descripción**

<b>Tecnología</b>	Microrred solar y de almacenamiento
<b>Capacidad instalada</b>	Fotovoltaica: 83 kW (corriente alterna) Sistema de baterías de almacenamiento: 116 kWh (Deng et al., 2019, y FCPR, 2019)
<b>Cronograma</b>	El huracán María azotó la isla en septiembre de 2017, y el corte de electricidad posterior se prolongó durante ocho meses. El suministro eléctrico se restableció el 25 de mayo de 2018 (FCPR, 2018), y en agosto de 2018 entraron en funcionamiento las unidades fotovoltaicas y de almacenamiento (Comunidad Toro Negro, 2024).
<b>Costo total</b>	Más de \$EU400,000 (East Penn Manufacturing, 2020)
<b>Fuentes de financiamiento</b>	Fundación Comunitaria de Puerto Rico y Somos Solar
<b>Líder del proyecto y socios clave</b>	José Figueroa, comunidad Toro Negro, Fundación Comunitaria de Puerto Rico y Somos Solar
<b>Estructura de propiedad</b>	La Comunidad Solar Toro Negro es propietaria de todos los sistemas
<b>Beneficios del proyecto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aunque los costos de energía iniciales se redujeron en comparación con la red nacional, la microrred opera actualmente con pérdidas financieras debido a la insuficiencia de ingresos. La creación de empleo se limitó a la fase de instalación, ya que el mantenimiento continuo fue subcontratado a entidades externas, y por esta razón los beneficios laborales locales fueron mínimos. A pesar de la autonomía energética en la generación, la dependencia de empresas externas para la gestión del sistema limita la verdadera independencia, lo que resalta los desafíos para la sostenibilidad a largo plazo.</li> <li>• La transición hacia la energía solar eliminó la dependencia de generadores de combustibles fósiles. Al evitar infraestructura a gran escala, como líneas eléctricas, el proyecto preservó la biodiversidad local y minimizó la alteración del hábitat en los ecosistemas de Toro Negro.</li> <li>• La gobernanza comunitaria de la microrred fortaleció la cohesión y el orgullo locales. Los residentes adquirieron experiencia práctica con sistemas de energía renovable, lo que aumentó la conciencia sobre prácticas sustentables.</li> </ul>



**Cuadro 13. Resultados de las entrevistas relacionadas con el sistema de paneles solares en Toro Negro por fase de desarrollo del proyecto**

**Fase de desarrollo del proyecto**

**Hallazgos clave**

**Planeación**

- Iniciado tras el huracán *María* para atender necesidades energéticas urgentes, el proyecto fue liderado localmente por el líder comunitario José Figueroa, con el apoyo institucional de la FCPR y Somos Solar. Este esfuerzo colaborativo priorizó la resiliencia posterior a la tormenta, asegurando electricidad básica para los hogares y los servicios esenciales.
- Surgieron desafíos de integración debido a la incompatibilidad del proyecto con el marco de medición neta de Puerto Rico.

**Selección y adquisición de tecnología**

- Se optó por sistemas solares fotovoltaicos y de almacenamiento en baterías debido a su modularidad, confiabilidad y adecuación para zonas remotas, lo que posibilitó una instalación y mantenimiento eficientes. Este enfoque permitió a la comunidad alcanzar independencia energética después del huracán *María* y responder a las urgentes necesidades de electricidad confiable.
- La configuración descentralizada enfocada en la resiliencia proporcionó flexibilidad y redundancia en todo el sistema.
- La tecnología elegida respalda la capacidad de la comunidad para gestionar de manera efectiva soluciones energéticas y servir de ejemplo para otras zonas rurales que buscan independencia energética sostenible.

**Financiamiento y permisos**

- La comunidad recibió los equipos como una donación de la FCPR y Somos Solar.
- Poco después de la instalación de la microrred en Toro Negro, la Comisión de Energía de Puerto Rico publicó en mayo de 2018 el Reglamento para el Desarrollo de Microrredes (Reglamento 9028). En septiembre del mismo año, la Comunidad Solar Toro Negro cumplió con los requisitos para registrarse y certificarse ante la Junta Reglamentadora de Servicio Público del Gobierno de Puerto Rico.

**Instalación y puesta en marcha**

- La empresa responsable de la instalación fue Máximo Solar.

**Operación**

- La administración de la microrred de Toro Negro está a cargo de una junta directiva elegida en 2019, que en la actualidad cuenta con cuatro integrantes activos. Los residentes de la comunidad que forman parte de la administración ofrecen su tiempo de manera voluntaria.
- Dentro de la comunidad se necesita mayor experiencia técnica, ya que el mantenimiento y la resolución de problemas dependen de apoyo externo. Las personas habitantes pueden realizar revisiones básicas, pero si se requiere soporte técnico adicional deben pagar una tarifa de \$EU250 para que un técnico acuda a la comunidad a revisar el sistema.
- El actual gestor de la microrred (SunSol) cobra al mes una tarifa de \$EU735 por el mantenimiento de los paneles solares y las baterías, la lectura de medidores, la facturación y la recolección de pagos mensuales.

## Hallazgos clave

La de Toro Negro es la primera microrred solar gestionada por una comunidad en Puerto Rico. Se desarrolló para atender necesidades energéticas urgentes tras el huracán María. Aunque la microrred enfrenta desafíos para integrarse con la red centralizada de la isla y con las políticas de medición neta, continúa operando y demostrando el liderazgo y el compromiso de la comunidad con la sostenibilidad. La gestión está a cargo de la organización sin fines de lucro Comunidad Solar Toro Negro, que promueve la participación comunitaria, tarifas equitativas y operaciones transparentes. La confianza y la cooperación de esta comunidad unida fueron valores fundamentales para el éxito del proyecto. Sin embargo, el mantenimiento depende de apoyo técnico externo, y los ingresos insuficientes representan un desafío para su sostenibilidad. (En el cuadro 13 se resumen las principales conclusiones de las entrevistas por fase de desarrollo del proyecto.)



A pesar de las dificultades, la microrred continúa operando, lo que prueba el liderazgo, la capacidad de adaptación y el compromiso de la comunidad con la sostenibilidad. Este proyecto pionero ha permitido a Toro Negro mantener su autonomía energética, lo que demuestra su fortaleza organizativa y sienta un precedente para otras iniciativas de energía renovable lideradas por comunidades en Puerto Rico y otros lugares. Su caso destaca cómo el liderazgo local, combinado con marcos institucionales adecuados, puede generar soluciones impactantes y duraderas, incluso frente a desafíos significativos. Las consultas y entrevistas con la comunidad de Toro Negro permiten resumir varios aprendizajes clave:

- El éxito de la microrred de Toro Negro demuestra la importancia de un liderazgo sólido y de la participación comunitaria en la planificación, implementación y gobernanza del proyecto.
- Estructuras de gobernanza transparentes, robustas e inclusivas han sido esenciales para mantener las operaciones y resolver los desafíos dentro del marco comunitario.
- A pesar del éxito operativo, el proyecto evidencia la dificultad de lograr sostenibilidad financiera en iniciativas energéticas rurales sin subsidios externos o fuentes de ingreso adicionales.
- Si bien el proyecto ha empoderado a la comunidad, la dependencia de entidades externas para el mantenimiento y la experiencia técnica subraya la necesidad de fortalecer la capacidad local. Es clara la necesidad de capacitación técnica conti-

na y educación comunitaria para aumentar la autosuficiencia y reducir la dependencia de apoyo externo.

- La configuración descentralizada, aunque resiliente, ha revelado ineficiencias en la distribución de energía y desafíos al conectar sistemas de múltiples viviendas a la red sin generar problemas de contabilización energética. La imposibilidad de aprovechar completamente la medición neta debido a limitaciones de diseño ha reducido la eficiencia y rentabilidad potencial del sistema.
- A pesar de recopilar datos de consumo y aplicar una tarifa estandarizada por kilovatio-hora, los costos operativos siguen siendo superiores a los ingresos generados.

La experiencia de Toro Negro resalta la importancia de la participación comunitaria, estructuras de gobernanza sólidas y el apoyo continuo de organizaciones externas. Entre las recomendaciones y pasos próximos para la comunidad se incluyen los siguientes:

- Buscar fuentes de financiamiento adicionales o subsidios para compensar los costos operativos y reparar los sistemas que no operan en la actualidad, e involucrarse con los responsables de políticas públicas para garantizar apoyo continuo a las iniciativas energéticas lideradas por la comunidad.
- Priorizar la recopilación de datos detallados sobre el desempeño y los costos actuales del sistema para perfeccionar el diseño de la microrred y garantizar que los nuevos fondos se utilicen de manera efectiva para la sostenibilidad a largo plazo.
- Generar e implementar programas de capacitación con el fin de dotar a los residentes con las habilidades técnicas necesarias para el mantenimiento y la resolución de problemas del sistema. Explorar la posibilidad de transferir ciertas responsabilidades de mantenimiento de entidades externas a actores locales.
- Abordar problemas técnicos relacionados con las ineficiencias en la distribución de energía y los sistemas de multirresidencia para mejorar la integración con la medición neta. Abogar por ajustes regulatorios que hagan más compatibles las microrredes con la infraestructura energética existente e incentiven proyectos de energía renovable en zonas rurales.
- Investigar la viabilidad de un sistema de facturación en línea.
- Crear una estrategia a largo plazo para adaptarse a las necesidades energéticas cambiantes y a las condiciones ambientales.

## 4. Estudios de caso de México

### Contexto

Las comunidades mexicanas seleccionadas formaban parte de un programa federal de acceso a la electricidad para poblaciones que aún carecen de este servicio, a partir del concepto de justicia energética para reducir la pobreza energética en el país.<sup>2</sup> La Secretaría de Energía (SENER) ha proporcionado financiamiento para la electrificación de zonas rurales y áreas urbanas marginadas a través del Fondo de Servicio Universal Eléctrico (FSUE) desde 2017 (SENER, 2017).

La gestión e implementación del programa, incluidas las labores de difusión, selección de candidatos y ejecución de proyectos, es llevada a cabo por la SENER a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), mientras que el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.N.C. (Banobras) actúa como fiduciario del FSUE. En una de sus modalidades, el programa financia la instalación de soluciones de energía renovable, lo que incluye sistemas fotovoltaicos aislados y de almacenamiento en baterías para comunidades que no cuentan con electricidad y cuya red principal se encuentra a más de cinco kilómetros de distancia. Las comunidades seleccionadas para este estudio de caso, beneficiadas en esta modalidad por el FSUE, se ubican en los estados de Sonora, Tamaulipas y Veracruz.

Estas comunidades carecían de acceso a la electricidad por encontrarse en zonas donde la extensión de la red es inviable en términos técnicos y económicos. Estos proyectos fueron posibles gracias al FSUE, creado en el marco de la Reforma Energética de 2013 y establecido por la Ley de la Industria Eléctrica de México para reducir la pobreza energética en comunidades desatendidas. El programa recoge los objetivos nacionales de equidad social y sostenibilidad mediante la inversión pública en electrificación fuera de la red. A principios de 2025, el FSUE se actualizó para expandir su catálogo de soluciones energéticas elegibles, que ahora incluye generación distribuida, sistemas de autoconsumo y sistemas solares aislados, lo que permite enfoques más flexibles adaptados a las condiciones locales. (En el anexo incluido en este documento se proporcionan detalles adicionales sobre el fundamento jurídico y la estructura del FSUE.)

<sup>2</sup> La pobreza energética se define en la Ley de Planeación y Transición Energética como la situación en la que a hogares no pueden satisfacer sus necesidades energéticas básicas debido a bajos ingresos o carencias sociales (art. 3, fracc. XXI). La justicia energética se define entonces como las acciones orientadas a reducir la pobreza energética (art. 3, fracc. XVI).



A diferencia de otras regiones analizadas en este informe —en Canadá y Estados Unidos las estrategias de implementación y financiamiento son variadas—, los proyectos en México se financian de manera centralizada a través de la SENER mediante el FSUE. Este modelo centralizado garantiza consistencia en financiamiento, selección de tecnología y gestión del proyecto, con todas las fases coordinadas por la CFE. Aspectos clave como financiamiento, permisos y uso estandarizado de la tecnología son los mismos en todos los proyectos del FSUE (véase el apartado 4.2). Los apartados 4.3 a 4.5 se enfocan en los impactos localizados y los desafíos específicos de las comunidades remotas fuera de la red seleccionadas como casos de estudio, donde se instalaron sistemas fotovoltaicos independientes.



## Estrategias federales para ampliar la energía no conectada a la red

El FSUE tiene como objetivo contribuir a la reducción de la pobreza energética mediante la provisión de infraestructura a usuarios domésticos que aún no cuentan con servicio eléctrico y el suministro de equipos y tecnologías que utilicen energía renovable para satisfacer necesidades básicas como preparación de alimentos, refrigeración, calentamiento de agua e iluminación, entre otras. Con estas acciones, el FSUE contribuye a cubrir los requerimientos energéticos básicos en comunidades rurales y zonas urbanas marginadas. Sin embargo, para lograrlo, deben implementarse mecanismos que permitan monitorear la operación de los equipos y sistemas instalados y brindar mantenimiento en la medida de lo posible.

Para apoyar la electrificación de comunidades marginadas y remotas en México, el FSUE facilita la expansión de la red eléctrica y el despliegue de sistemas de energía renovable descentralizados, como la energía solar fotovoltaica, dando prioridad a las poblaciones rurales e indígenas. Este informe no aborda la expansión de la red eléctrica: se enfoca únicamente en la instalación de sistemas de energía renovable descentralizados. Todos los sistemas son independientes y no están interconectados al sistema eléctrico nacional, de manera que no aplica la medición neta.

El FSUE opera en un marco transparente que incluye la presentación de propuestas y la priorización de proyectos con base en su impacto social y costoefectividad. Los principales socios —incluida la CFE, municipios y entidades privadas— colaboran en la implementación de proyectos que reducen la pobreza energética, mejoran las condiciones de vida y buscan aumentar la sostenibilidad a largo plazo mediante el uso de tecnologías estandarizadas, la capacitación comunitaria y obligaciones contractuales basadas en el desempeño. (El proceso de solicitud ante el FSUE se resume en la gráfica 1.)



Gráfica 1. Proceso para las solicitudes al FSUE



Fuente: Comunicación personal con Antonio Alcaraz, Ociel Ong Rubio y Juan Pablo Gonzalez de la CFE, septiembre 6 de 2024.

## Planeación, selección y adquisición de la tecnología

La razón para utilizar pequeños sistemas fotovoltaicos aislados para la electrificación rural está en su practicidad, rentabilidad y capacidad para satisfacer las necesidades energéticas básicas de los hogares (Opiyo, 2020). Estos sistemas se diseñaron de modo específico para proporcionar servicios esenciales, como iluminación y carga de pequeños electrodomésticos, y atender los requerimientos energéticos inmediatos de comunidades desatendidas (Kabir *et al.*, 2017). Además, su facilidad de instalación y requerimientos de mantenimiento mínimos los hacen ideales para áreas remotas con infraestructura limitada y acceso reducido a soporte técnico.

Para determinar la capacidad de los sistemas, la SENER optó por una solución universal debido a la falta de datos disponibles sobre consumo eléctrico, y por el costo y tiempo que implicaría la recopilación de información detallada. Asimismo, la composición demográfica cambiante de muchas localidades —impulsada por la movilidad rural-urbana y la migración— determina que los datos en uso sean volátiles y difíciles de interpretar (FAO, 2018). (Los criterios específicos y las suposiciones de dimensionamiento adoptadas por la SENER para los tres proyectos se resumen en el cuadro 14 [SENER, 2018a, y Flores Espino *et al.*, 2021].) Cabe destacar que estas directrices se aplicaron en específico a los tres proyectos analizados aquí. Los proyectos futuros seguirán el marco actualizado establecido en la Ley de la Empresa Pública del Estado, Comisión Federal de Electricidad (2025) (Secretaría de Gobernación, 2025).

En los inicios del programa, la capacidad mínima de los sistemas residenciales era de 300 W, sin embargo desde 2024 esta capacidad mínima aumentó a 550 W. Para proyectos con uso productivo de electricidad, centros de reunión y/o pequeños “centros de salud” esta capacidad mínima es de 1,200 W.

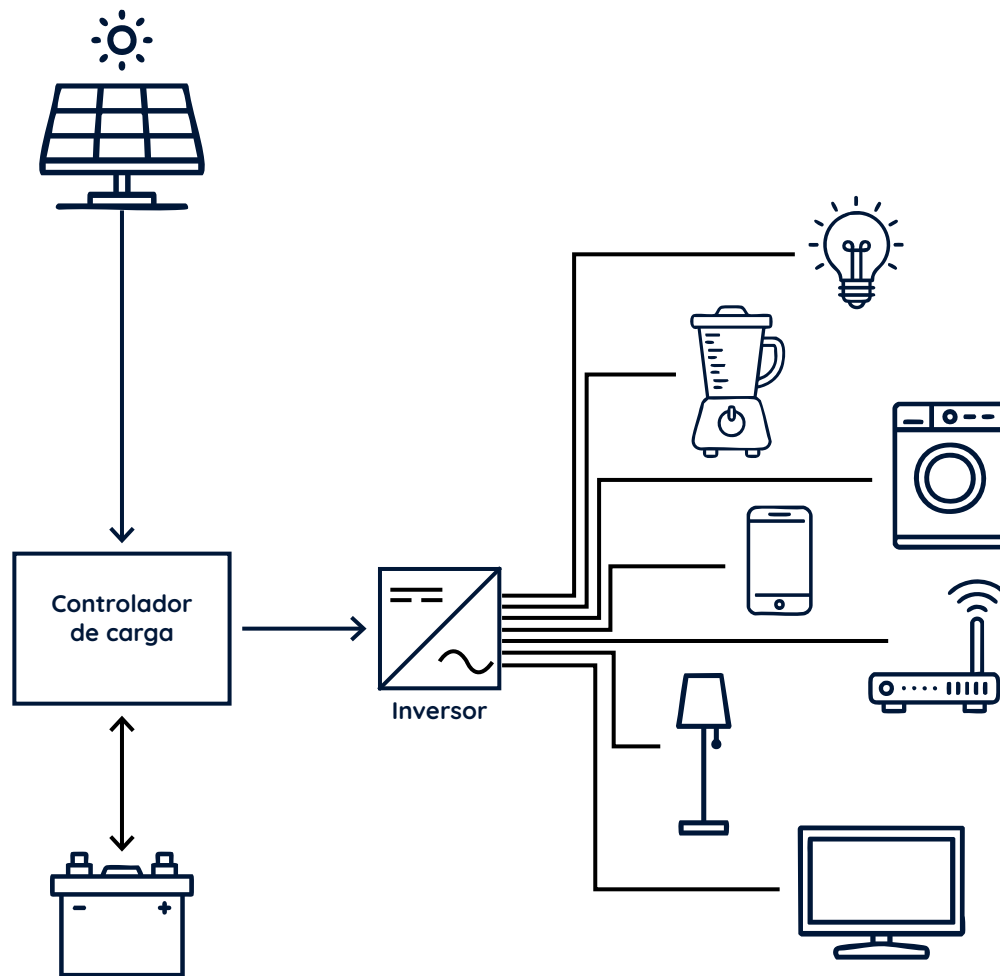
En cada comunidad, para participar en el proyecto, los hogares se autoseleccionaron mediante la entrega de documentación básica, como identificación y comprobante de domicilio. Las personas líderes de la comunidad y las organizaciones de apoyo ayudaron a compilar las solicitudes en una presentación colectiva a la CFE. Aprobado el proyecto, los hogares elegibles que habían aplicado recibían un sistema fotovoltaico y un sistema de almacenamiento de energía eléctrica en baterías (SAEB). Como resultado, el número final de sistemas instalados refleja el subconjunto de la comunidad que completó el proceso de solicitud, no a toda la población.

Los contratistas del proyecto, seleccionados mediante un proceso de licitación competitiva, variaron según la comunidad o región. Los criterios de selección se centraron en estándares técnicos y de calidad, asegurando al mismo tiempo la compatibilidad con las necesidades de instalaciones remotas y fuera de la red. El proveedor

seleccionado proporcionó no sólo el *hardware*, sino también manuales de usuario y sesiones de capacitación para los residentes sobre cómo utilizar los sistemas. Los contratos con los proveedores no siempre son estandarizados, lo que permite diferencias entre los servicios y sistemas proporcionados por los contratistas, aunque requisitos mínimos se mantienen invariables.

Los sistemas instalados en cada comunidad se enumeran en el cuadro 15, y en la gráfica 2 se muestra una representación de los dispositivos y aparatos eléctricos típicamente utilizados en edificios residenciales. (En el cuadro 16 figuran los costos individuales de cada tipo de instalación, incluidas residencias, centros comunitarios, escuelas y centros de salud.)

Gráfica 2. Dispositivos y electrodomésticos típicos usados por las comunidades mexicanas tras la electrificación



Fuente: Comunicación personal con la CFE y habitantes de la comunidad, 2024.

**Cuadro 14. Supuestos para determinar la capacidad fotovoltaica y el SAEB para cada tipo de inmueble en el marco del FSUE**

Parámetro	Sistema de costo individual			
	Residencial	Escuela	Centro de salud	Centro comunitario
Características del inmueble	Sala-comedor, cocina y dos habitaciones: 48 metros cuadrados	Dos salones	Una sala de revisión y una sala de espera	No especificado
Consumo estimado	Consumo mínimo diario 750 Wh	2,300 Wh, 5 días a la semana	4,000 Wh, 1 día a la semana	Consumo mínimo diario 1,000 kWh
Capacidad mínima del panel solar	300 W	900 W (3 x 300 W)	1,200 W (4 x 300 W)	1,200 W (4 x 300 W)
Generación diaria promedio	1,320 kWh	3,960 kWh	5,280 kWh	5,280 kWh
Capacidad del inversor	1,200 W	1,200 W	1,200 W	1,200 W
Infraestructura eléctrica proporcionada además del sistema fotovoltaico y el SAEB	Cuatro luminarias, dos tomas de corriente, dos interruptores, cableado, conectores y las protecciones necesarias	Cinco luminarias, cuatro tomas de corriente, cinco interruptores, cableado, conectores y las protecciones necesarias	Cinco luminarias, cuatro tomas de corriente, cinco interruptores, cableado, conectores y las protecciones necesarias	Cinco luminarias, cuatro tomas de corriente, cinco interruptores, cableado, conectores, medidores y las protecciones necesarias
Vida útil del sistema fotovoltaico	>10 años*			
Vida útil del SAEB	Cambio cada 4 años**			

Fuente: SENER (2018a).

\* Este número se indicó en la documentación de la CFE relacionada con el proyecto; sin embargo, los paneles fotovoltaicos suelen tener una vida útil operativa esperada de aproximadamente 25 años en condiciones estándar.

\*\* Este número se indicó en la documentación de la CFE relacionada con el proyecto; sin embargo, los SAEB suelen tener una vida útil operativa esperada de alrededor de 15 años en condiciones estándar.

**Cuadro 15. Sistema instalado para cada proyecto de energía comunitaria en México en el marco del programa FSUE**

Sistema de información	Yoloxochio	San José de Natora	Magdaleno Aguilar
Ubicación	Zongolica, Veracruz (18°35'56.20"N, 96°51'19.01"O)	Sahuaripa, Sonora (29°2'52.00"N, 108°45'33.00"O)	Llera, Tamaulipas (23°8'38.55"N, 98°26'29.42"O)
Número de instalaciones fotovoltaicas y SAEB (>300 W)	46	72	19
Número de instalaciones fotovoltaicas y SAEB en centros comunitarios (>1,200 W)	0	4	0
Número de instalaciones fotovoltaicas y SAEB en escuelas (>900 W)	0	3	0
Número de instalaciones fotovoltaicas y SAEB en centros de salud (>1,200 W)	0	1	0
Capacidad total	13.8 kW	30.3 kW	5.7 kW
Capacidad de almacenamiento de las baterías	60.72 kWh	102.32 kWh	25.08 kWh



**Cuadro 16. Sistema fotovoltaico individual y costo del sistema de baterías por tipo de inmueble en el marco del programa FSUE**

Tipo de inmueble	Sistema de costo individual	
	Pesos mexicanos	Dólares estadounidenses
Residencia	54,964.55	2,913.12
Centro comunitario	154,929.98	8,211.29
Escuela	55,587.00	3,200.00
Centro de salud	77,380.00	4,500.00

\* Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2021 & Comunicación personal con Mariano Osvaldo Birlain Escalante de la SENER, 4 de marzo de 2026.

## Financiamiento y permisos

Los proyectos se financiaron a través del FSUE con recursos provenientes del presupuesto federal y de los ingresos del mercado eléctrico administrados por el Centro Nacional de Control de Energía. Este financiamiento cubrió la adquisición, instalación y puesta en marcha de los sistemas fotovoltaicos y de almacenamiento de energía con baterías, así como la instalación eléctrica descrita en el cuadro 14.

Aunque los proyectos no requirieron permisos específicos más allá de la autorización otorgada a la CFE por la SENER, el gobierno federal cuenta con un marco regulatorio que rige las acciones del FSUE. Este marco incluye:

- i) marco constitucional y legal;
- ii) reglamentos;
- iii) planes y programas, y
- iv) acuerdos, estatutos o lineamientos (SENER, 2018b).

## Instalación y puesta en marcha

La instalación y puesta en marcha de los sistemas fotovoltaicos y de almacenamiento de energía con baterías fueron gestionadas por los contratistas seleccionados mediante el proceso de licitación de la CFE. El estricto cumplimiento de las directrices técnicas de la CFE y la SENER garantizó que todas las instalaciones cumplieran con los estándares de seguridad, calidad y desempeño establecidos. Si bien los diseños y especificaciones de los sistemas se definieron con base en los supuestos presentados en el cuadro 14, en muchos casos los contratistas tuvieron que ingeniárselas para enfrentar desafíos logísticos, como el transporte de baterías pesadas y módulos solares a través de terrenos remotos e irregulares. En varios casos, las personas de la comunidad ayudaron en el transporte y la instalación, lo que reforzó el sentido de apropiación local del proyecto. Esta participación práctica complementó su papel más amplio en la apropiación del sistema, que se extendió más allá de la instalación e incluyó su participación en la capacitación, supervisión y uso continuo de los sistemas conforme a las necesidades de la comunidad.



## Operación

Los contratistas están sujetos a un contrato de desempeño de cinco años con la CFE, durante el cual deben atender cualquier falla de componentes o mal funcionamiento del sistema. Esto incluye la reparación o sustitución de componentes defectuosos, como baterías o inversores, para garantizar la confiabilidad del sistema. El marco del FSUE establece que dichos contratos de desempeño pueden variar según la región, pero se diseñaron para cubrir los desafíos operativos iniciales que suelen presentarse en nuevas instalaciones.

La fase de operación de los proyectos depende tanto de la capacitación brindada a la comunidad como de las obligaciones de los contratistas con la CFE. Tras la instalación, los contratistas realizan pruebas de arranque para confirmar que el sistema funcione según lo previsto. En caso de problemas mayores, como fallas de equipos o interrupciones en el desempeño, los contratistas deben ofrecer soluciones como parte de su acuerdo de cinco años con la CFE. Este enfoque dual —que combina el respaldo de los contratistas y el fortalecimiento de capacidades comunitarias— sustenta la sostenibilidad de los sistemas y fomenta la independencia energética a largo plazo.



## Llueva o truene: superando los desafíos climáticos con energía solar en Yoloxochio-Zongolica

“Es un beneficio para mí, porque antes usábamos mucha vela, mucho candil y mis hijos (...) tenían que hacer su tarea con candil o con lámpara de pila, entonces ahí sí me están funcionando mucho”

Josefina Hernández, integrante de la comunidad

Yoloxochio forma parte del municipio de Zongolica, ubicado en la zona central del estado de Veracruz, en la región conocida como Altas Montañas, dentro de la Sierra Madre Oriental. El clima es cálido y húmedo, y el territorio se conforma de selva, bosque y pastizal (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010c). En Zongolica es indígena más de 58% de la población, y entre las lenguas habladas figuran el náhuatl, mixteco, mazateco, zapoteco y zoque. Los pobladores de Yoloxochio, una comunidad de 359 habitantes, señalaron que las principales actividades económicas de la región son la agricultura (con el café como cultivo principal) y la ganadería.

Algunas zonas de la comunidad tienen acceso a la red eléctrica principal, mientras que otras carecían de electricidad antes de la implementación del FSUE. Las condiciones de los caminos son difíciles y las personas de la comunidad viven dispersas a lo largo de un terreno accidentado. Algunos deben recorrer a pie largas distancias para llegar al centro de la comunidad, ya que no disponen de otro medio de transporte. Además, en las zonas de la comunidad conectadas a la red principal son comunes los cortes de energía debido a los fuertes vientos y tormentas, sobre todo durante la temporada de lluvias.



## Resumen del proyecto de transición energética

El proyecto fue posible gracias al apoyo conjunto de la CFE, el gobierno municipal, el Instituto Tecnológico Superior de Zongolica y la organización civil Fondo para la Paz (CFE, s. f.). Esta última desempeñó un papel fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que participó en la selección de las comunidades del municipio y brindó de manera gratuita servicios de traducción (del español al náhuatl y viceversa) durante la sesión de capacitación para el mantenimiento y la operación de los sistemas dirigida a las personas de la comunidad (Comunicación personal con Juan Pablo Gonzalez de la CFE, junio 21 de 2024). (El cuadro 17 incluye un resumen del proyecto y sus impactos.)

Los residentes que cuentan con electricidad de la red principal se beneficiaron indirectamente del FSUE. Dado que la red principal sufre cortes de energía debido a los fuertes vientos, quienes cuentan con sistemas fotovoltaicos y SAEB aislados comparten su electricidad con los vecinos afectados para cubrir las necesidades básicas. Como resultado de la instalación de estos sistemas, un habitante local, Maurilio Tlehuac, inició junto con sus dos hijos un negocio dedicado a ofrecer servicios básicos de mantenimiento y resolución de problemas para los sistemas fotovoltaicos y SAEB instalados en la comunidad.

Como parte del diseño general del programa FSUE, el proyecto de Yolochochio incorporó desde la etapa de planificación una perspectiva de género con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las mujeres, aumentar su acceso a la educación y ampliar su participación en las actividades comunitarias. Entre las acciones específicas desarrolladas se encuentran:

- Capacitación técnica para mujeres en el manejo, operación y mantenimiento de módulos solares.
- Talleres de igualdad de género y derechos humanos, fomentando la reflexión sobre roles y la participación comunitaria.
- Actividades lúdico-formativas para niñas y niños, orientadas a valores, uso responsable de la energía y cultura de paz.
- Espacios de análisis sobre el impacto de la electrificación en la vida de las mujeres, promoviendo su agencia y autonomía.



- Impartición bilingüe (español-náhuatl) para asegurar inclusión cultural.
- Encuesta de seguimiento con enfoque de género para evaluar impactos diferenciados entre mujeres y hombres.
- Participación activa de mujeres como agentes de decisión dentro del proceso de electrificación.

Estos esfuerzos reflejan los compromisos nacionales de promover la equidad de género mediante iniciativas de electrificación rural. La participación continua de la comunidad será fundamental para lograr plenamente los beneficios a largo plazo previstos con este enfoque.

### **Hallazgos clave**

Desde la perspectiva de la comunidad, el proyecto ha fomentado un fuerte sentido de cooperación y adaptabilidad. Los residentes que adoptaron los sistemas comparten a menudo la electricidad con vecinos que no son beneficiarios directos, lo que demuestra su espíritu comunitario. Sin embargo, el desempeño mixto de los sistemas y la falta de un soporte de mantenimiento consistente evidencian la necesidad de mejorar la infraestructura y la capacitación. Aunque el proyecto ha generado avances significativos, también pone de manifiesto la importancia de abordar los desafíos técnicos y operativos para garantizar la sostenibilidad a largo plazo y ampliar el acceso a la electricidad para todas las personas de la comunidad. (Los conocimientos clave obtenidos a partir del proceso de entrevistas en Yoloxochio se presentan en el cuadro 18.)



A pesar de los desafíos enfrentados por la comunidad de Yoloxochio, su fuerte espíritu de cooperación se consolidó como un activo fundamental, ejemplificado por los vecinos que comparten electricidad y abordan de manera conjunta los problemas. El negocio de mantenimiento y reparación iniciado por Maurilio Tlehuac y sus hijos podría replicarse en otras comunidades mexicanas para fortalecer las capacidades locales. Cabe destacar varias lecciones de la experiencia de Yoloxochio:

- El espíritu cooperativo de la comunidad es un activo importante. Los vecinos comparten con frecuencia la electricidad y trabajan juntos para podar árboles y reducir su sombra, lo que demuestra un capital social que puede respaldar futuros proyectos.
- El terreno accidentado y las condiciones ambientales de Yoloxochio dificultan el transporte, la instalación y el mantenimiento de los sistemas. Las fuertes lluvias y la caída de ramas dañan a menudo los equipos solares, lo que destaca la necesidad de sistemas más duraderos.
- Las guías visuales ayudaron a los residentes a manejar y reparar los sistemas, incluso si no sabían leer ni escribir. Los proyectos futuros deben establecer expectativas claras y proporcionar mejores recursos para la solución de problemas.

Los siguientes son posibles pasos próximos para continuar con la transición energética en Yoloxochio:

- Mejorar el transporte y la comunicación para superar las barreras en la implementación y el mantenimiento, en especial en las zonas remotas.
- Procurar incluir al mayor número posible de hogares, independientemente de su ubicación, en futuras iniciativas de electrificación, a fin de reducir la frustración y aumentar la participación.
- Simplificar y agilizar los procesos gubernamentales para disminuir los retrasos en la entrega de los recursos y beneficios aprobados a la comunidad.



## Cuadro 17. Resumen del proyecto de paneles solares de Yoloxochio-Zongolica

Detalle del proyecto	Descripción
Capacidad instalada	13.8 kW (véanse detalles en el cuadro 15)
Cronograma	Diciembre de 2020-abril de 2021
Costo total	\$2,047,011 (\$EU102,335)
Fuentes de financiamiento	Gobierno federal mexicano
Líder del proyecto y socios clave	Fondo para la Paz, SENER, CFE
Estructura de propiedad	Propiedad individual
Beneficios del proyecto	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pequeños comercios, como talleres de carpintería y tiendas, pudieron ampliar sus servicios y aumentar su productividad gracias al acceso confiable a la electricidad. Una familia local se ha vuelto de total confianza en la reparación de sistemas fotovoltaicos, creándose una oportunidad económica especializada.</li><li>• El proyecto fortalece los lazos comunitarios, ya que los hogares comparten la electricidad solar para necesidades diarias como recargar teléfonos y alimentar electrodomésticos, y fomenta la resiliencia y la interdependencia. Los esfuerzos colaborativos, como la organización de jornadas de limpieza para reducir la sombra sobre los paneles, destacan la capacidad colectiva de la comunidad para resolver problemas y su compromiso con mantener el acceso a la energía.</li><li>• Al elegir la energía solar fotovoltaica y los SAEB en lugar del queroseno, la comunidad evita la emisión de 15.04 toneladas anuales de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) (comunicación personal con José Vicente Hernández de la CFE, abril 2 de 2024).</li><li>• La mejora en la iluminación doméstica ha incrementado la seguridad de las mujeres; algunos habitantes, incluida una residente entrevistada, mencionaron sentirse más seguros por la noche gracias a la electricidad confiable.</li></ul>



**Cuadro 18. Resultados de las entrevistas sobre el sistema de paneles solares en Yoloxochio-Zongolica por fase de desarrollo del proyecto**

Fase de desarrollo del proyecto	Hallazgos clave
Planeación	<ul style="list-style-type: none"><li>• Esta fase implicó una coordinación significativa entre la comunidad, el Fondo para la Paz y la CFE. El liderazgo local trabajó para asegurar que la documentación requerida para la aprobación del proyecto se presentara en las oficinas centrales de la Ciudad de México.</li><li>• Fondo para la Paz desempeñó un papel crucial en el desarrollo del proyecto al gestionar los fondos y brindar de manera gratuita servicios de traducción durante la capacitación para el mantenimiento y la operación dirigida a las personas de la comunidad (Comunicación personal con Juan Pablo González de la CFE, junio 21 de 2024).</li><li>• El retraso en la autorización del proyecto fue un desafío común, ya que los procesos del ámbito federal requirieron un tiempo considerable.</li></ul>
Selección y adquisición de tecnología	<ul style="list-style-type: none"><li>• Debido a condiciones geográficas y la dispersión de las viviendas en la fecha de aprobación del proyecto, para estas comunidades no fue posible la extensión de la red eléctrica; en consecuencia, se instalaron sistemas solares fotovoltaicos y SAEB.</li><li>• Véase Planificación, selección de tecnología y adquisición, en la sección 4.2.</li></ul>
Financiamiento y permisos	<ul style="list-style-type: none"><li>• No se identificaron hallazgos específicos, ya que las fases de financiamiento y permisos son las mismas para todos los proyectos en México.</li></ul>
Instalación y puesta en marcha	<ul style="list-style-type: none"><li>• La fase de instalación contó con el apoyo de las personas de la comunidad, quienes se coordinaron con los técnicos, aunque no se mencionó la asistencia directa durante el proceso de instalación.</li><li>• Una vez instalados, los sistemas fueron probados para verificar su correcto funcionamiento. Se llevaron a cabo sesiones de capacitación, aunque algunos participantes señalaron lagunas en la cobertura de las prácticas de mantenimiento esenciales. Las demostraciones prácticas ayudaron a los habitantes de la comunidad a comprender el funcionamiento de los sistemas.</li><li>• Se proporcionaron manuales que detallaron el uso adecuado de los sistemas a la mayoría de los residentes; sin embargo, la distribución no fue completa, de manera que las instrucciones de mantenimiento no se compartieron de manera uniforme en todos los hogares.</li></ul>
Operación	<ul style="list-style-type: none"><li>• El desempeño del sistema ha sido mixto, con informes de cortes frecuentes y componentes dañados debido a sobrecargas. La sombra de los árboles y los desafíos estacionales, como la reducción de eficiencia durante la temporada de lluvias, se señalaron como obstáculos operativos importantes.</li><li>• Los habitantes han sugerido aumentar la capacidad del sistema para soportar aparatos más grandes y mejorar los servicios de mantenimiento de modo que garanticen la confiabilidad a largo plazo y satisfagan necesidades futuras.</li><li>• A pesar de las insuficiencias, la comunidad ha adoptado los sistemas, compartiendo a menudo la electricidad con vecinos que aún no son beneficiarios. Este enfoque cooperativo refleja los fuertes lazos comunitarios de Yoloxochio y resalta la necesidad de redoblar los esfuerzos de electrificación.</li></ul>

## Acortando distancias: resiliencia energética en San José de Natora

“ En la secundaria no había ningún tipo de luz; ahora con la energía se me facilita la forma de trabajar porque tengo computadora, impresora, enfriador de agua, abanicos en tiempo de calor y pues igual aquí en mi casa: el internet, lavadora, refrigerador, la luz; y pues se siente bien tener este tipo de comodidad”

Yadira Urquijo Rivas, integrante de la comunidad

San José de Natora se ubica en el municipio de Sahuaripa, estado de Sonora. Sahuaripa se extiende sobre un suelo desértico en un clima semiseco y semicálido. La zona se caracteriza por sus formaciones rocosas, ríos y los impresionantes paisajes de la Sierra Madre Occidental. La vegetación predominante es de tipo forestal, con pastizales, árboles de mezquite y arbustos desérticos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010b). La población total de Sahuaripa en 2020 fue de 5,245 habitantes, lo que representa una disminución de 13% en comparación con 2010 (Secretaría de Economía, 2020). Una pequeña parte de la comunidad habla alguna lengua indígena. La economía del municipio se basa principalmente en la agricultura y la ganadería, que ocupan 1.25% del territorio, así como en la minería. Además, en el municipio se fabrican monturas y todas las herramientas necesarias para la ganadería (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010b).



San José de Natora se encuentra 213 km al este de la capital del estado, Hermosillo, más cerca de la frontera con el estado vecino de Chihuahua que de la propia capital. No existe una carretera pavimentada que conecte directamente San José de Natora con la cabecera municipal de Sahuaripa; para llegar se requiere viajar ocho horas en automóvil por caminos de terracería y terreno accidentado. Las comunidades más cercanas a Natora son Guadalupe el Grande, ubicada 10 km al sur, y Tunapa, unos 15 km al norte. No hay carreteras pavimentadas que las conecten, y sólo algunos habitantes de la comunidad poseen vehículos. Debido a su lejanía (a 90 km de la red eléctrica principal) y su pequeña población (288 habitantes), la electrificación no había llegado a la comunidad antes de la implementación del Fondo de Servicio Universal Eléctrico.

## Resumen del proyecto de transición energética

El proyecto de San José de Natora fue el más grande entre las comunidades mexicanas seleccionadas para este estudio. La comunidad cuenta con 72 viviendas equipadas con sistemas de 300 W, tres escuelas con sistemas de 900 W y una clínica y cuatro centros comunitarios con sistemas de 1,200 W. La implementación de los sistemas fotovoltaicos y SAEB mejoró la confiabilidad del suministro eléctrico local y hoy apoya a pequeños negocios, otorga servicios esenciales y beneficia a toda la comunidad. (El cuadro 19 presenta un resumen del proyecto y sus beneficios.)



## Hallazgos clave

La exitosa implementación de la energía solar en la comunidad se basó en una planificación colaborativa y un liderazgo local sólido. (Las principales conclusiones obtenidas del proceso de entrevistas en San José de Natora se presentan en el cuadro 20.)

Los sistemas actuales satisfacen las necesidades energéticas básicas de los hogares, escuelas y centros comunitarios. Aunque el mantenimiento puede resultar complicado para la comunidad, los habitantes destacan que su calidad de vida ha mejorado significativamente con la implementación de este proyecto. A continuación se presentan las lecciones aprendidas del proyecto energético de San José de Natora:

- La colaboración municipal acelera de manera significativa la implementación del proyecto; sin la misma, el progreso tomaría mucho más tiempo. El comisariado ejidal desempeñó un papel fundamental al organizar a los residentes y agilizar los procesos administrativos, mientras que los representantes municipales brindaron apoyo logístico crucial, como la preparación y entrega de documentos.
- Las instalaciones actuales de sistemas fotovoltaicos y SAEB cubren las necesidades básicas de los hogares, escuelas y centros comunitarios, pero resultan insuficientes para los negocios y otras necesidades de la comunidad, por lo que debe optarse por una solución más robusta.
- Es fundamental establecer reglas claras sobre la propiedad y el uso para evitar problemas, como que algunos residentes retengan el acceso a la electricidad compartida.

- Persisten desafíos en el mantenimiento debido a canales de comunicación poco claros, lo que provoca retrasos en la notificación de problemas, aunque la CFE, cuando se le informa, responde con rapidez.

Los siguientes son posibles pasos a seguir para la comunidad de San José de Natora:

- Buscar financiamiento para las futuras necesidades de mantenimiento, ya que los proyectos financiados por el FSUE requerirán apoyo continuo a pesar de que las comunidades se consideren electrificadas.
- Ampliar la infraestructura para satisfacer la creciente demanda mediante la creación de programas de apoyo que permitan a los residentes adquirir electrodomésticos como refrigeradores, ventiladores o lavadoras, ahora que cuentan con un suministro eléctrico estable.
- Capacitar y designar a un técnico local encargado del mantenimiento y las reparaciones, asegurando que cuente con los conocimientos y las herramientas necesarias para gestionar los equipos y comunicarse con la CFE cuando se requiera asistencia externa.
- Proveer localmente piezas de repuesto y recursos para reducir la dependencia del apoyo externo y minimizar los retrasos en el transporte debidos al aislamiento de la comunidad.
- Ofrecer capacitación y recursos a los residentes para fomentar el crecimiento de pequeños negocios que puedan aprovechar la electricidad para la refrigeración, sistemas de Wi-Fi u otras tecnologías que impulsen el desarrollo económico.



## Cuadro 19. Resumen del proyecto de San José de Natora

Detalle del proyecto	Descripción
Capacidad instalada	30.3 kW (véanse detalles en el cuadro 15)
Cronograma	Junio-diciembre de 2021
Costo total	\$4,082,983 (\$EU204,149)
Fuentes de financiamiento	Gobierno federal mexicano
Líder del proyecto y socios clave	SENER, CFE, autoridades locales y municipales
Estructura de propiedad	Propiedad individual
Beneficios del proyecto	<ul style="list-style-type: none"><li>• Al proporcionar electricidad constante, el proyecto ha eliminado la necesidad de métodos alternativos, a menudo costosos, para la iluminación, la refrigeración y las actividades domésticas diarias, lo que liberó ingresos para otros usos. Los habitantes expresaron satisfacción con la energía limpia proporcionada por el sistema, que también ha despertado interés en las energías renovables y las prácticas sustentables. El uso de sistemas fotovoltaicos y SAEB evita la emisión de 26.16 toneladas de CO<sub>2</sub>e al año en comparación con la iluminación a base de queroseno (comunicación personal con José Vicente Hernández de la CFE, abril 2 de 2024).</li><li>• La electricidad confiable ha mejorado significativamente la calidad de vida de las familias al permitirles refrigerar de manera segura la insulina en lugar de usar cubetas de hielo. El acceso a electrodomésticos como ventiladores, licuadoras y lavadoras ha facilitado las tareas cotidianas, mejorado el confort durante condiciones climáticas extremas y extendido las actividades productivas y sociales hasta horas de la noche. Estos cambios fomentan la salud, la comodidad y los vínculos comunitarios.</li></ul>

Cuadro 20. Resultados de las entrevistas en San José de Natora por fase de desarrollo del proyecto

**Fase de desarrollo del proyecto**

**Hallazgos clave**

**Planeación**

- El comisariado ejidal (órgano electo que representa a los ejidatarios o poseedores de tierras comunales) desempeñó un papel clave al organizar a la comunidad y facilitar la entrega de la documentación necesaria para el proyecto.
- Representantes del municipio, incluida la contraloría, brindaron apoyo logístico, como la impresión, organización y envío de los documentos requeridos para cumplir con los criterios de elegibilidad.
- El liderazgo local y los residentes se reunieron para definir los objetivos del proyecto y asegurar el acuerdo de participación. Los líderes locales guiaron a los residentes a través de los requisitos administrativos, garantizando claridad en el proceso y fomentando la confianza en el proyecto.

**Selección y adquisición de tecnología**

- No se identificaron hallazgos específicos del proyecto, ya que la selección tecnológica y el proceso de adquisiciones son los mismos para todos los proyectos en México.

**Financiamiento y permisos**

- No se identificaron hallazgos específicos del proyecto, ya que las fases de financiamiento y permisos son las mismas para todos los proyectos en México.

**Instalación y puesta en marcha**

- El transporte del equipo hasta la ubicación remota representó un desafío debido a la falta de infraestructura vial.

**Operación**

- La fase operativa depende en gran medida de la capacitación brindada a los habitantes durante la instalación. Esta formación les permitió realizar tareas rutinarias de mantenimiento de forma independiente, como limpiar los paneles solares para mantener su eficiencia y monitorear el estado de las baterías y el uso óptimo de energía para garantizar el rendimiento del sistema.
- Se prevé el reemplazo de las baterías después de cinco años, lo que coincide con la terminación del contrato de servicio del proveedor. Algunas baterías ya se han reemplazado.
- Aunque los sistemas son por lo general confiables, se han reportado apagones o interrupciones ocasionales. Estos incidentes suelen deberse a prácticas de mantenimiento variables o al desgaste normal de los componentes.
- Los residentes reportan a la CFE los problemas del sistema, pero el proceso ha sido inconsistente. Además, a uno de ellos se le asignó energía adicional para alimentar el alumbrado público; sin embargo, la falta de reglas de operación claras resultó en que dicha persona retuviera el acceso a la electricidad compartida.



## Iluminando el Camino: acceso a la energía y cooperación en Magdaleno Aguilar

“Estamos muy contentos porque ya tengo mi licuadora, tengo mi refri y ya no se me echa a perder la carne, no se me echa a perder el queso. Y antes tenía que tener la insulina en hielo, entonces ahorita ya no batallo. Y estamos muy agradecidos”

Rosa Fonseca Piñón, habitante de la comunidad

Magdaleno Aguilar es una comunidad de 76 habitantes ubicada en el municipio de Llera, en el estado de Tamaulipas, en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Tamaulipas. El lugar, que varía en altitud y clima, presenta una vegetación que va desde matorrales altos y espinosos en las laderas de las montañas hasta matorrales bajos y bosques deciduos, espinosos y bajos en la región central (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010a). La economía se basa principalmente en la agricultura, que ocupa 33% del territorio, así como en la ganadería y la apicultura a menor escala. Las mujeres de la región producen ollas de barro y parrillas de hierro fundido, y tejen manteles y estambre. Otras actividades incluyen la elaboración de sillas y sofás de madera y escobas de palma (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010a).

El camino hacia Magdaleno Aguilar es accidentado, y la comunidad se encuentra a 12 km de la red eléctrica principal. Al igual que las otras comunidades consultadas para este documento, Magdaleno Aguilar no tenía acceso a electricidad antes de la implementación del FSUE debido a su ubicación remota y a su pequeña población.



## Resumen del proyecto de transición energética

Toda la comunidad de 76 habitantes se benefició del FSUE con la instalación de sistemas fotovoltaicos y SAEB en 19 viviendas. Al comienzo, algunos habitantes dudaron en presentar su documentación para postularse al FSUE, pero se animaron al ver cómo el acceso a la electricidad ayudaba a sus vecinos. Se espera también electrificar un centro comunitario a través del FSUE. El proyecto incluso motivó a la comunidad vecina de Nuevo Progreso a postularse al programa, y ambas comunidades han coordinado de cerca los asuntos relacionados con el proyecto, compartiendo lecciones aprendidas y apoyándose mutuamente en la implementación. (El cuadro 21 presenta un resumen del proyecto y su impacto en la comunidad.)

## Hallazgos clave

La iniciativa de energía solar en Magdaleno Aguilar fue impulsada por un liderazgo local sólido y la coordinación comunitaria, toda vez que representantes del ejido y un exdelegado encabezaron la solicitud de sistemas fotovoltaicos y SAEB y gestionaron los procesos administrativos. (En el cuadro 22 se presentan las principales conclusiones del proceso de entrevistas con la comunidad de Magdaleno Aguilar.)

El proyecto demostró cómo las intervenciones energéticas focalizadas pueden mejorar profundamente la calidad de vida en áreas remotas, equilibrando la practicidad con un impacto transformador. Las siguientes conclusiones del proceso de entrevistas destacan como lecciones esenciales:

- Las dudas iniciales de los residentes resaltaron la importancia de un involucramiento sólido desde el principio para dejar claros los beneficios del proyecto y generar confianza. Ser testigos de las experiencias positivas de los vecinos resultó ser un motivador poderoso para una participación más amplia.
- El difícil acceso a Magdaleno Aguilar, debido a terrenos accidentados e infraestructura limitada, enfatizó la necesidad de una planificación cuidadosa y la asignación de recursos para el transporte y la entrega de equipos.
- Las unidades estandarizadas fotovoltaicas y SAEB garantizaron un proceso de



implementación consistente y manejable, pero su limitada capacidad evidenció la necesidad de diseñar sistemas alineados más estrechamente con las necesidades de la comunidad.

- Los frecuentes cortes nocturnos muestran la necesidad de un mejor entendimiento de los patrones locales de consumo energético en la etapa de planificación, especialmente en comunidades con capacidad limitada de almacenamiento y generación.
- La dependencia del mantenimiento externo para las unidades fotovoltaicas y SAEB, así como la falta de experiencia para las reparaciones, subrayan la necesidad comunitaria de mecanismos de apoyo a largo plazo —como programas de capacitación— para desarrollar capacidad técnica local. Al mismo tiempo, los habitantes expresaron desconfianza hacia la CFE y frustración por los largos tiempos de espera para recibir soporte. La comunidad se beneficiaría enormemente si contara con las herramientas y conocimientos necesarios para solucionar de manera independiente los problemas de sus sistemas.



Los siguientes son los posibles pasos para la continuidad de la transición energética en Magdaleno Aguilar:

- Ampliar los programas de capacitación para desarrollar la experiencia técnica local en el mantenimiento de sistemas fotovoltaicos y SAEB, y proporcionar a la comunidad herramientas para la solución de problemas, reducirá su dependencia de soporte externo.
- Realizar estudios detallados sobre el consumo energético de la comunidad permitirá orientar el diseño de futuras soluciones energéticas, incluida la optimización de la capacidad de almacenamiento y generación.
- Explorar la posibilidad de actualizaciones progresivas de los sistemas para satisfacer el aumento de la demanda energética a lo largo del tiempo.

## Cuadro 21. Resumen del proyecto de Magdaleno Aguilar

Detalle del proyecto	Descripción
Capacidad instalada	5.7 kW (véanse detalles en el cuadro 15)
Cronograma	Julio-noviembre de 2021
Costo total	\$847,671 (\$EU42,383)
Fuentes de financiamiento	Gobierno federal mexicano
Líder del proyecto y socios clave	SENER, CFE
Estructura de propiedad	Propiedad individual
Beneficios del proyecto	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aunque no se generaron ingresos directos, los hogares experimentaron una mayor estabilidad financiera al gastar menos en iluminación convencional y no perder alimentos por descomposición. Menos viajes al mercado también redujeron costos, liberando recursos para otras necesidades. Estos ahorros destacan el papel del proyecto en fortalecer indirectamente la resiliencia económica.</li><li>• La transición a sistemas fotovoltaicos para la iluminación eléctrica en lugar de la iluminación con keroseno evita la emisión de 6.21 toneladas de CO<sub>2</sub>e anuales (comunicación personal con José Vicente Hernández de la CFE, abril 2 de 2024). Esta iniciativa apoya los objetivos ambientales de México y ofrece un modelo de adopción de energía limpia en comunidades remotas.</li><li>• La introducción de sistemas fotovoltaicos transforma la vida diaria al garantizar la conservación de alimentos (lácteos, carnes, verduras...) y de la insulina, vital para el manejo de la diabetes, lo que reduce el estrés y mejora la salud. El escepticismo inicial entre los residentes desapareció a medida que se evidenciaron los beneficios tangibles, lo que llevó a una mayor participación comunitaria. La mejora en la iluminación, refrigeración y productividad también ha incrementado la seguridad, comodidad y orgullo comunitario.</li></ul>

Cuadro 22. Resultados de las entrevistas en Magdaleno Aguilar por fase de desarrollo del proyecto

**Fase de desarrollo del proyecto**

**Hallazgos clave**

**Planeación**

- Un habitante de la comunidad destacó que el exdelegado municipal desempeñó un papel fundamental en la organización de la solicitud de sistemas fotovoltaicos y SAEB. Al igual que en otros proyectos apoyados por el FSUE, la presentación de la documentación requerida fue facilitada por el liderazgo local.
- Los habitantes destacaron la espera de un año entre la presentación de la solicitud y la aprobación del proyecto, lo que refleja los desafíos logísticos específicos que supone planificar proyectos en áreas remotas como Magdaleno Aguilar.
- Llegar a Magdaleno Aguilar requirió atravesar terrenos accidentados con vehículos 4x4, lo que añadió complejidad a las fases de planificación e implementación. Estas limitaciones de acceso hicieron que la coordinación y la programación fueran particularmente críticas en las etapas tempranas.

**Selección y adquisición de tecnología**

- No se identificaron hallazgos específicos del proyecto, ya que la selección de tecnología y la adquisición son los mismos para todos los proyectos en México (véase el apartado 4.2.2).

**Financiamiento y permisos**

- No se identificaron hallazgos específicos del proyecto, ya que las fases de financiamiento y permisos son las mismas para todos los proyectos en México.

**Instalación y puesta en marcha**

- La comunidad reportó un proceso de instalación sin contratiempos a pesar de los desafíos logísticos que impone el terreno. Los sistemas se instalaron durante un periodo de dos meses.
- En la fase de instalación, los residentes participaron observando el proceso y con preguntas sobre el funcionamiento del sistema. Este compromiso ayudó a generar confianza en el uso de la tecnología.
- Los habitantes no notaron problemas significativos durante el periodo inicial de operación.

**Operación**

- Los pobladores, al expresar su profundo agradecimiento por los sistemas fotovoltaicos y SAEB, destacaron el impacto transformador en su vida diaria con el uso de aparatos para la refrigeración e iluminación. Sin embargo, también mencionaron cortes nocturnos frecuentes debidos a limitaciones de capacidad. A pesar de usar electricidad mínima, los sistemas a menudo no cubren siquiera las necesidades básicas.
- Los residentes expresaron preocupación por la vida útil de las baterías al señalar que, aunque las actuales funcionan bien, podría ser necesario reemplazarlas en pocos años. La comunidad depende de la garantía y los acuerdos de servicio de la CFE para atender necesidades de mantenimiento futuras.
- Magdaleno Aguilar aún no desarrolla una fuerza laboral local para el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos y SAEB, a diferencia de algunas otras comunidades del FSUE donde los residentes se capacitaron como técnicos locales. Sin embargo, la comunidad se mantiene proactiva en buscar apoyo externo cuando el mantenimiento lo hace necesario.



## 5. Temas comunes en la transición hacia la energía renovable de comunidades remotas e indígenas de América del Norte

Las comunidades remotas e indígenas seleccionadas para estos estudios de caso cursan transiciones hacia energías renovables moldeadas por contextos culturales, geográficos y socioeconómicos únicos. Aunque las experiencias de cada comunidad difieren, al analizar sus trayectorias colectivas surgen patrones claros y lecciones compartidas. Al mapear estas experiencias en un resumen de progresión —desde la electrificación básica con energías renovables hasta microrredes renovables completamente integradas (como se ilustra en la gráfica 3)—, podemos comprender mejor las distintas fases y los conocimientos temáticos que surgen en diferentes escalas de transición. Sin embargo, es importante señalar que las comunidades no necesariamente avanzan de manera secuencial en cada una de las escalas; algunas pueden iniciar su transición en niveles más avanzados, con acuerdo a sus contextos y recursos específicos. El cuadro 23 complementa esta progresión visual, resumiendo ejemplos de comunidades, características principales y oportunidades asociadas con cada escala. En conjunto, estos recursos destacan temas comunes y ofrecen una comprensión estructurada, fundamental para apoyar transiciones energéticas equitativas y sostenibles.

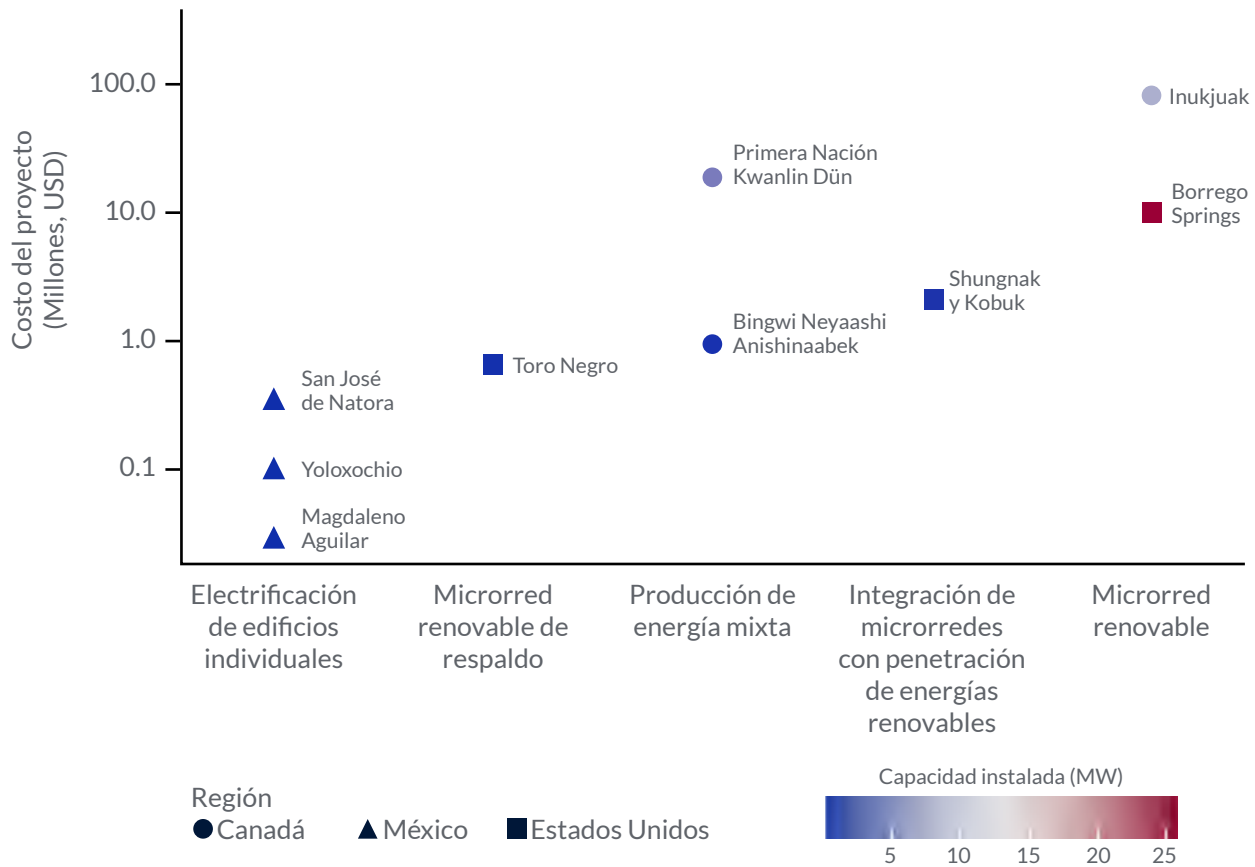
### **Madurez tecnológica: equilibrio entre innovación y confiabilidad**

Las comunidades destacan la importancia de seleccionar tecnologías de energía renovable que se ajusten a su capacidad operativa y necesidades de mantenimiento a largo plazo. Los primeros esfuerzos de integración de energías renovables, como en Shungnak y Kobuk, priorizaron sistemas confiables y probados que complementaban la infraestructura de diésel existente. Proyectos más complejos, como los sistemas eólicos de la Primera Nación Kwanlin Dün y el hidroeléctrico de Inukjuak, requirieron mayor capacidad técnica y planificación de recursos. Como demuestra Borrego Springs, los sistemas avanzados pueden enfrentar problemas operativos si la capacidad de apoyo local es limitada. Las decisiones tecnológicas deben equilibrar madurez, adecuación de recursos, necesidades de mantenimiento y experiencia disponible para garantizar resultados sostenibles.

**Cuadro 23. Tipologías de las escalas de los sistemas de energía renovable en las comunidades estudiadas**

Escala	Ejemplos de comunidades	Características clave	Principales desafíos	Beneficios
<b>Electrificación básica</b>	San José de Natora, Yoloxochio, Magdalena Aguilar (fotovoltaica y SAEB)	Sistemas renovables individuales, presupuestos reducidos, beneficios directos	Logística básica, capacidad técnica local limitada	Mejoras inmediatas en salud, educación y comunicación
<b>Unidades individuales conectadas (microrred renovable de respaldo)</b>	Toro Negro (fotovoltaica y SAEB)	Activos renovables: distribuidos y en almacenamiento, potencial conexión a la red	Integración del sistema, gestión efectiva del almacenamiento y de operaciones y mantenimiento	Mayor confiabilidad y resiliencia energética comunitarias
<b>Producción de energía mixta</b>	Bingwi Neyaashi Anishinaabek (biomasa), Primera Nación Kwanlin Dün (eólica)	Activos renovables centralizados, diversidad de fuentes energéticas	Complejidad técnica: se requiere experiencia especializada	Beneficios económicos más amplios, generación de ingresos desde el inicio
<b>Integración de microrred con penetración renovable</b>	Shungnak y Kobuk (microrred)	Microrred renovable, integrando múltiples fuentes de energía	Complejidades regulatorias, gestión avanzada del sistema	Colaboración energética regional, distribución de riesgos
<b>Microrred renovable</b>	Borrego Springs (microrred), Inukjuak (hidroeléctrica)	Microrred renovable totalmente resiliente, redundancia y diversificación	Alto capital inicial, gestión técnica a largo plazo	Soberanía energética sostenida, rentabilidad económica y mayor resiliencia regional

Gráfica 3. Tipologías de proyectos de energía renovable por costo y capacidad instalada en los estudios de caso



### Planificación comunitaria y autodeterminación

El grado de participación activa y autodeterminación de la comunidad evoluciona de manera significativa a lo largo de las etapas de transición energética representadas en la gráfica 3. Al inicio, la participación puede centrarse principalmente en identificar y atender las necesidades esenciales de acceso a la energía. Sin embargo, a medida que las comunidades avanzan hacia sistemas renovables más integrados o centralizado, como los demostrados por Toro Negro y Bingwi Neyaashi Anishinaabek, los residentes asumen papeles cada vez más activos mediante la consulta continua, la toma de decisiones, la alineación cultural y la gobernanza local. Una participación comunitaria sólida, iniciada desde las primeras fases de evaluación y sostenida a lo largo de todas las etapas del desarrollo del proyecto, fomenta la apropiación local y el apoyo generalizado. Este enfoque inclusivo de participación y liderazgo es crucial para guiar las comunidades hacia la sustentabilidad, la resiliencia y la soberanía energética duraderas.

## **Eficiencia presupuestaria e impacto comunitario**

El impacto de los proyectos de energía renovable no necesariamente se correlaciona de manera directa con el presupuesto disponible. Los proyectos de electrificación en etapas iniciales, a pesar de contar con presupuestos relativamente más pequeños, suelen generar beneficios inmediatos y transformadores, mejorando de modo significativo la calidad de vida mediante avances en salud, educación y comunicación básica (véanse en el cuadro 23 los ejemplos de San José de Natora, Yoloxochio y Magdalena Aguilar). En contraste, los sistemas avanzados de microrred, como los de Borrego Springs e Inukjuak, aunque considerablemente más costosos, ofrecen beneficios socioeconómicos más amplios, incluidas actividad económica sostenida, confiabilidad energética a largo plazo, resiliencia y oportunidades de generación de ingresos. Cada etapa, por tanto, ofrece impactos distintivos y complementarios, lo que resalta la importancia de alinear la inversión estratégica con los objetivos de transición específicos de cada comunidad.



## **Creación de alianzas y de consenso**

Las transiciones exitosas hacia energías renovables dependen en lo fundamental de alianzas efectivas entre las comunidades, los proveedores técnicos, las empresas de servicios públicos y las entidades gubernamentales. Como se ilustra en el cuadro 23, las comunidades que avanzan hacia etapas más desarrolladas, como la generación mixta y las microrredes renovables, enfrentan mayor complejidad en sus alianzas. Por ejemplo, los marcos regulatorios y de gobernanza son cruciales en microrredes interconectadas como Shungnak y Kobuk, donde la gestión coordinada de los recursos exige asociaciones sólidas. Las alianzas efectivas fortalecen tanto la confianza comunitaria como la sostenibilidad de los proyectos, garantizando la alineación entre las prioridades de todas las partes interesadas.

## **Experiencia técnica y desarrollo de capacidades comunitarias**

La experiencia técnica por sí sola no es suficiente; los proyectos exitosos integran las capacidades técnicas con un deliberado desarrollo de capacidades adaptado a las necesidades y prioridades de la comunidad. Como se ilustra en el cuadro 23, los proyectos de menor escala se benefician de programas de capacitación simples y centrados en la comunidad, enfocados en habilidades de mantenimiento básicas. En contraste, las iniciativas de mayor escala —como las lideradas por la Primera Nación Kwanlin

Dün y Borrego Springs— requieren conocimientos técnicos avanzados combinados con estrategias intencionadas para fomentar el empleo local, la transferencia de habilidades y la gestión dirigida por la comunidad. El desarrollo de capacidades exitoso comienza desde las primeras etapas de planificación, al involucrar activamente a diversos habitantes de la comunidad —incluidas personas jóvenes, mujeres y poblaciones marginadas— para construir competencias locales sustentables, empoderar a las comunidades y apoyar la sostenibilidad operativa a largo plazo. Este enfoque inclusivo garantiza que, a medida que las comunidades adoptan sistemas energéticos cada vez más sofisticados, el progreso técnico se mantenga alineado estrechamente con los objetivos de equidad social y autodeterminación.

### **El almacenamiento de energía como base**

El almacenamiento de energía se consolida como un elemento fundamental para el éxito de la transición a energías renovables. Los proyectos de electrificación en sus etapas iniciales muestran beneficios significativos incluso con capacidades de almacenamiento modestas, como la mejora inmediata de la confiabilidad y la reducción de la dependencia del diésel (por ejemplo, San José de Natora y Yoloxochio). Sin embargo, a medida que las comunidades avanzan hacia escalas intermedias y grandes, la ampliación de la capacidad de almacenamiento se vuelve esencial para fortalecer la resiliencia, abordar la intermitencia de las fuentes renovables y garantizar un suministro de energía estable y continuo (por ejemplo, Toro Negro, Shungnak y Kobuk). Las soluciones de almacenamiento integradas adecuadamente constituyen, por tanto, la base del éxito a largo plazo en todos los niveles de proyecto.

### **Operaciones y mantenimiento a largo plazo**

Las transiciones sostenibles hacia energías renovables requieren marcos de operación y mantenimiento (O&M) consistentes, bien financiados y de largo plazo. Los niveles de transición energética en el eje X de la gráfica 3 presentan una complejidad e importancia crecientes en términos de O&M, de izquierda a derecha, a medida que las comunidades progresan de escalas más básicas a mayores. La electrificación básica suele presentar desafíos logísticos y técnicos para el mantenimiento, especialmente en zonas remotas. En el caso de las comunidades mexicanas, el mantenimiento actual se apoya principalmente en contratos de mediano plazo. Sin embargo, el gobierno federal trabaja de manera activa para transitar hacia modelos de O&M basados en la comunidad, con el objetivo de fortalecer la capacidad local y respaldar la sostenibilidad a largo plazo. Las comunidades en niveles más avanzados de transición energética, como Borrego Springs e Inukjuak, demuestran contar con marcos de O&M consolidados, estructuras institucionales de apoyo y experiencia técnica local, todos elementos esenciales para garantizar el éxito operativo y la sostenibilidad a largo plazo de sus microrredes renovables.

## **Inversión pública y estructuración financiera**

La inversión pública sigue siendo un catalizador crucial para el éxito de las transiciones energéticas independientemente de su escala, ya que reduce el riesgo financiero que, de otro modo, recaería sobre las comunidades o desincentivaría la participación del sector privado, además de facilitar el desarrollo de infraestructura. La electrificación a pequeña escala se beneficia sobre todo de la inversión pública inicial para establecer un acceso básico a la energía, mientras que los proyectos a gran escala —como los de generación mixta y las microrredes renovables— aprovechan de manera estratégica los fondos públicos para atraer inversiones privadas, desarrollar infraestructura crítica y respaldar soluciones más complejas. De este modo, las comunidades que avanzan a través de los diferentes niveles presentados en el cuadro 23 se benefician de estructuras financieras adaptadas a sus necesidades en evolución.



## **Generación de ingresos y sostenibilidad financiera**

A medida que las comunidades avanzan en los niveles de penetración de energías renovables, la capacidad de generar ingresos se convierte cada vez más en un elemento central de la sostenibilidad. Los sistemas de microrredes avanzados, como los de Inukjuak y Borrego Springs, muestran oportunidades para convertirse en productores de energía independientes, reinvertiendo los ingresos en infraestructura local, desarrollo de la fuerza laboral y financiamiento a largo plazo para operaciones y mantenimiento. Establecer fuentes de ingresos fortalece las economías locales, lo que permite una resiliencia y autonomía comunitarias sostenidas más allá del financiamiento inicial del proyecto.

Las diversas transiciones hacia energías renovables de comunidades remotas e indígenas en América del Norte revelan prioridades temáticas y perspectivas estratégicas consistentes, esenciales para lograr el éxito a largo plazo. Si bien estas experiencias compartidas proporcionan un marco para orientar futuras transiciones energéticas, siguen siendo fundamentales los análisis cuantitativos adicionales y una recopilación de datos continua. Ampliar la investigación basada en los hallazgos y la estructura presentados aquí permitirá establecer referencias más precisas, intervenciones específicas y una formulación de políticas mejor informada. En última instancia, comprender la escala actual de cada comunidad dentro del marco de transición ilustra claramente los desafíos pendientes y las áreas de inversión estratégica, facilitando un progreso equitativo hacia una resiliencia duradera, sostenibilidad económica y soberanía energética.

# Referencias

Alaska Energy Authority (2014), *Alaska Renewable Energy Fund: Round 7* [Fondo de Energía Renovable de Alaska: Ciclo 7] (ID de proyecto: 1001), en: <https://www.akenergyauthority.org/What-We-Do/Grants-Loans/Renewable-Energy-Fund>.

Alaska Energy Authority (2019), *Power cost equalization program guide* [Guía del programa de igualación de costos energéticos], Anchorage, Alaska Energy Authority, en: <https://www.akenergyauthority.org/PCE>.

Anderson, B., R. Jordan e I. Baring-Gould (2023), *Distributed renewables for Arctic energy: A case study* [Energías renovables distribuidas para la energía del Ártico: un estudio de caso], Golden: National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5000-84391, en: <https://doi.org/10.2172/1922401>.

Anselmi, E. (2019), "Some Inukjuak residents remain concerned about hydro project" [Algunos residentes de Inukjuak siguen preocupados por el proyecto hidroeléctrico], Nunatsiaq News, en: <https://nunatsiaq.com/stories/article/some-inukjuak-residents-remain-concerned-about-hydro-project/>.

Barabino, E., D. Fioriti, E. Guerrazzi, I. Mariuzzo, D. Poli, M. Raugi, E. Razaee, E. Schito y D. Thomopoulos (2023), *Energy communities: A review on trends, energy system modelling, business models, and optimisation objectives* [Comunidades energéticas: una revisión sobre tendencias, modelización de sistemas energéticos, modelos de negocio y objetivos de optimización], Sustainable Energy, Grids and Networks, núm. 36: 101187, en: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101187>.

Census Reporter (2022), "Borrego Springs, CA", U.S. Census Bureau, American Community Survey 5-year estimates, en: <https://censusreporter.org/profiles/16000US0607596-borrego-springs-ca/>.

CFE (s. f.), *Proyecto social Zongolica: Electrificación indígena por medio de módulos solares individuales EPS Gen VI*, Comisión Federal de Electricidad, en: [https://www.cfe.mx/desarrollo\\_social/desarrollo\\_humano/Generales/PROYECTO\\_ZONGOLICA-2021.pdf](https://www.cfe.mx/desarrollo_social/desarrollo_humano/Generales/PROYECTO_ZONGOLICA-2021.pdf).

CIMA+ (s. f.), "Hydro Innavig" Chartered Institute of Management Accountants, en: <https://www.cima.ca/en/project/hydro-innavig/>.

CNLP (2024), "Eagle Hill Energy Limited Partnership", Chu Níikwän Limited Partnership, en: <https://www.chuniikwan.ca/eagle-hill-energy>.

Comunidad Toro Negro (s. f.), "Agua y energía", en: <https://www.comunidadtoronegro.org/agua-y-energia>.

Connors, S. (2023), "Haeckel Hill is the North's first entirely Indigenous-owned clean energy project" [Haeckel Hill es el primer proyecto de energía limpia del norte propiedad exclusiva de indígenas], APTN News, en: <https://www.aptnnews.ca/national-news/haeckel-hill-is-the-norths-first-entirely-indigenous-owned-clean-energy-project/>.

Crown-Indigenous Relations and Northern Affairs Canada (2005), "Kwanlin Dün First Nation final agreement." [Acuerdo definitivo de la Primera Nación Kwanlin Dün] <https://www.rcaanc-cirnac.gc.ca/eng/1294416351481/1542815981425>.

Crown-Indigenous Relations and Northern Affairs Canada (2023), "Northern REACHE program." [Programa de Enfoque Energético Responsable del Norte para la Calefacción y la Electricidad Comunitarias] 6 December. <https://www.rcaanc-cirnac.gc.ca/eng/1481305379258/1594737453888>.

County of San Diego (2011), *Borrego Springs community plan* [Plan comunitario de Borrego Springs], en: [https://www.sandiegocounty.gov/content/dam/sdc/pds/docs/CP/Borrego\\_Springs\\_CP.pdf](https://www.sandiegocounty.gov/content/dam/sdc/pds/docs/CP/Borrego_Springs_CP.pdf).

Deng, S., A. Hansen, G. Hiltbrand, S. Maddex y S. S. Lecaros (2019), "Evaluating viability of community solar microgrids for resilience in Puerto Rico" [Evaluación de la viabilidad de las microrredes solares comunitarias para la resiliencia en Puerto Rico], tesis de maestría, Duke University, Dukespace, en: <<https://hdl.handle.net/10161/18460>>.

East Penn Manufacturing (2020), *Solar product highlight: Toro Negro community project - Puerto Rico* [Producto solar destacado: proyecto comunitario Toro Negro, Puerto Rico], en: <https://www.eastpennmanufacturing.com/wp-content/uploads/8L16-Solar-Product-Highlight-Maximo-2554-1.pdf>.

Eagle Hill Energy LP (2023), "Haeckel Hill-Thay T'aw wind energy project celebrates construction milestone" [El proyecto de energía eólica Haeckel Hill-Thay T'aw celebra un hito en su construcción], 5 de octubre, en: <https://www.northernenergycapital.com/post/haeckel-hill-thay-t-%C3%A4w-wind-energy-project-celebrates-construction-milestone>.

Environment and Climate Change Canada (2016), *Pan-Canadian framework on clean growth and climate change* [Marco pancanadiense sobre crecimiento limpio y cambio climático], Gatineau: Environment and Climate Change Canada. <https://www.canada.ca/en/services/>

[environment/weather/climatechange/pan-canadian-framework/climate-change-plan.html](https://www.environment.ca.gc.ca/energy/industry/industry-environment/weather/climatechange/pan-canadian-framework/climate-change-plan.html).

Environment Journal (2023), "Haeckel Hill wind turbine project reaches milestone towards a sustainable Yukon" [El proyecto de aerogeneradores de Haeckel Hill alcanza un hito hacia un Yukón sustentable], 10 de octubre, en: <https://environmentjournal.ca/haeckel-hill-wind-turbine-project-reaches-milestone-towards-a-sustainable-yukon/>.

EWT (2023), "EWT's DW61 featured in The Haeckel Hill-Thay T'aw project", 7 de abril, en: <https://ewtdirectwind.com/news/ewts-dw61-featured-in-the-haeckel-hill-thay-taw-project/>.

FAO (2018), *México rural del siglo XXI*, Ciudad de México, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, en: [http://www.economia.unam.mx/academia/inae/images/ProgramasyLecturas/lecturas/inae\\_ii/agriculturasxxi.pdf](http://www.economia.unam.mx/academia/inae/images/ProgramasyLecturas/lecturas/inae_ii/agriculturasxxi.pdf).

FCPR (2018), "Fundación Comunitaria y SOMOS Solar se unen para establecer la primera comunidad solar administrada por una comunidad en la Isla", Fundación Comunitaria de Puerto Rico, 8 de junio, en: <https://www.fcpr.org/4140/>.

FCPR (2019), "Comunidad Solar Toro Negro recibe visita del congresista Grijalva", Fundación Comunitaria de Puerto Rico, 8 de abril, en: <https://www.fcpr.org/comunidad-solar-toro-negro-recibe-visita-del-congresista-grijalva/>.

FERC (2020a), "Order No. 841", Federal Energy Regulatory Commission, 16 de diciembre, en: <https://www.ferc.gov/media/order-no-841>.

FERC (2020b), *Docket No. RM18-9-000; Order No. 2222*, Federal Energy Regulatory Commission, en: <https://www.ferc.gov/media/order-no-2222>.

[www.ferc.gov/sites/default/files/2020-09/E-1\\_0.pdf](http://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-09/E-1_0.pdf).

Flores Espino, F., R. Castillo, R. U. Ruiz Saucedo y E. Rosas López (2021), *Electrificación rural para comunidades fuera de la red utilizando generación de energía renovable con sistemas híbridos*, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/690391/INFORME\\_Electrificacion\\_integrado18112021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/690391/INFORME_Electrificacion_integrado18112021.pdf).

Gobierno de Canadá (2023), "Indigenous off-diesel initiative" [Iniciativa indígena contra el diesel], 30 de octubre, en: <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/climate-plan/reduce-emissions/reducing-reliance-diesel/indigenous-off-diesel-initiative.html#about>.

Gobierno de Canadá (2025), "Clean energy for rural and remote communities funded projects" [Proyectos financiados para el suministro de energía limpia a comunidades rurales y remotas], en: <https://natural-resources.canada.ca/climate-change/clean-energy-rural-remote-communities-funded-projects>

Gobierno de Yukón (2023), "Haeckel Hill wind turbine project reaches milestone towards a strong, sustainable Yukon" [El proyecto de aerogeneradores de Haeckel Hill alcanza un hito hacia un Yukón fuerte y sostenible], 10 de marzo, en: <https://yukon.ca/en/news/haeckel-hill-wind-turbine-project-reaches-milestone-towards-strong-sustainable-yukon>.

ICE Network (2020), "Bioenergy action monitor 2020" [Monitor de acción en materia de bioenergía 2020], Indigenous Clean Energy Network, en: <https://www.icenet.work/c/bioenergy/bioenergy-action-monitor-2020-4744>.

Innavik Hydro (2020), "Community sessions highlights" [Lo más destacado de las sesiones comunitarias],

Innavik Hydro Project Updates, 12 de febrero, en: <https://www.innavikhydro.com/post/2020/02/12/community-sessions-highlights>.

Innavik Hydro (2021), "Innavik hydroelectric project environmental and social impact assessment" [Evaluación del impacto ambiental y social del proyecto hidroeléctrico Innavik], en: <https://www.ree.environnement.gouv.qc.ca/dossiers/3215-10-005/3215-10-005-5.pdf>.

Innavik Hydro (s. f.), "Innavik hydroelectric facility" [Evaluación del impacto ambiental y social del proyecto hidroeléctrico Innavik], en: <https://www.innavikhydro.com>.

Innavik Hydro & Hydro-Québec Distribution (2019), *Contrat d'approvisionnement en électricité: Centrale Innavik, rivière Inukjuak* [Contrato de suministro eléctrico], 27 de mayo, en: <https://www.hydroquebec.com/data/achats-electricite-quebec/pdf/contrats/innavik-contrat.pdf>.

Innergex Renewable Energy Inc. (2020), "Financial closing of the Innavik hydro project in Inukjuak, Quebec" [Cierre financiero del proyecto hidroeléctrico Innavik en Inukjuak, Quebec], 4 de noviembre, en: <https://www.innergex.com/en/media/financial-closing-of-innavik-hydro>.

Innergex Renewable Energy Inc. (s. f.), "Innavik", en: <https://www.innergex.com/en/sites/innavik>.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2021. *Electrificación rural para comunidades fuera de la red utilizando generación de energía renovable con sistemas híbridos*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/690391/INFORME\\_Electrificacion\\_integrado18112021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/690391/INFORME_Electrificacion_integrado18112021.pdf).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010a), *Compendio de información geográfica municipal Llera, Tamaulipas*, en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/28/28019.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28019.pdf).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010b), *Compendio de información geográfica municipal Sahuaripa, Sonora*, en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/26/26052.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/26/26052.pdf).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010c), *Compendio de información geográfica municipal Zongolica, Veracruz de Ignacio de la Llave*, en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/30/30201.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30201.pdf).

Kabir, E., K.-H. Kim y J. Szulejko (2017), *Social impacts of solar home systems in rural areas: A case study in Bangladesh* [Impactos sociales de los sistemas solares domésticos en zonas rurales: un estudio de caso en Bangladesh], *Energies*, núm. 10: 1615, en: <https://doi.org/10.3390/en10101615>.

Katmale, H., S. Clark, T. Bialek y L. Abcede (2019), *Borrego Springs: California's first renewable energy-based community microgrid* [Borrego Springs: la primera microrred comunitaria basada en energías renovables de California], California Energy Commission, CEC-500-2019-013, en: <https://www.energy.ca.gov/publications/2019/borrego-springs-californias-first-renewable-energy-based-community-microgrid>.

Meadows, R., E. Edgerly, R. Jordan y L. Beshilas (2025), *Renewable energy integration in remote Alaska communities* [Integración de las energías renovables en comunidades remotas de Alaska], U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, en: <https://doi.org/10.2172/2522802>.

NAB (s. f.), "Community profile: Shungnak" [Perfil de la comunidad: Shungnak], Northwest Arctic Borough, en: <https://www.nwabor.org/wp-content/uploads/L.-Community-Profile-Shungnak.pdf>.

Natural Resources Canada (2025), "Clean energy for rural and remote communities funded projects" [Proyectos financiados para el suministro de energía limpia a comunidades rurales y remotas], 13 January. <https://natural-resources.canada.ca/climate-change/clean-energy-rural-remote-communities-funded-projects>.

Opiyo, N. N. (2020), *How solar home systems temporally stimulate increasing power demands in rural households of Sub-Saharan Africa* [Cómo los sistemas solares domésticos estimulan temporalmente el aumento de la demanda de energía en los hogares rurales del África subsahariana], *Energy Transitions*, núm. 4, pp. 141-153, en: <https://doi.org/10.1007/s41825-020-00028-9>.

Perron-Piché, G. (2023), "Innavik delivers electricity to Inukjuak!" [¡Innavik suministra electricidad a Inukjuak!], Innavik Hydro, 30 de octubre, en: <https://www.innavikhydro.com/post/innavik-delivers-electricity-to-inukjuak>.

Pituvik Landholding Corporation (2024), *Innavik hydroelectric project, summary of the environmental and social impact assessment* [Proyecto hidroeléctrico Innavik, resumen de la evaluación del impacto ambiental y social], Montreal, RSW Inc., en: [https://www.keqc-cqek.ca/wp-content/uploads/20100200\\_3215-10-005\\_EX-0318RP\\_Summary-of-the-Environental.pdf](https://www.keqc-cqek.ca/wp-content/uploads/20100200_3215-10-005_EX-0318RP_Summary-of-the-Environental.pdf).

Rogers, S. (2020), "Construction starts on Nunavik hydro project" [Comienza la construcción del proyecto hidroeléctrico de Nunavik], Nunatsiaq News, 31 de julio, en: <https://nunatsiaq.com/stories/article/construction-starts-on-nunavik-hydro-project/>.

SDG&E (2024), *Borrego Springs microgrid fact sheet* [Hoja informativa sobre la microrred de Borrego Springs], San Diego Gas & Electric, en: <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-05/CEC-500-2019-013.pdf>.

Secretaría de Economía (2020), "Sahuaripa, municipio de Sonora", en: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/sahuaripa>.

Secretaría de Gobernación (2014), "Ley de la Industria Energética", *Diario Oficial de la Federación*, en: [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/lielec/Ley\\_de\\_la\\_Industria\\_Electrica-Abro.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/lielec/Ley_de_la_Industria_Electrica-Abro.pdf).

Secretaría de Gobernación (2025), "Ley de la Empresa Pública del Estado, Comisión Federal de Electricidad", *Diario Oficial de la Federación*, en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEPECFE.pdf>.

SENER (2017), "El Fondo de Servicio Universal Eléctrico permitirá ampliar la electrificación de comunidades rurales y zonas urbanas marginadas", Secretaría de Energía, 22 de mayo, en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/el-fondo-de-servicio-universal-electrico-permitira-ampliar-la-electrificacion-de-comunidades-rurales-y-zonas-urbanas-marginadas?idiom=es>.

SENER (2018a), *Catálogo de soluciones tecnológicas de electrificación en comunidades rurales y zonas urbanas marginadas*, Secretaría de Energía, en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314249/20180309\\_Catalogo\\_de\\_Soluciones\\_Tecnologicas\\_2018\\_FINAL.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314249/20180309_Catalogo_de_Soluciones_Tecnologicas_2018_FINAL.pdf).

SENER (2018b), *Libro blanco: Fondo de servicio universal eléctrico*, Secretaría de Energía, en: [https://base.energia.gob.mx/ER1218/LB\\_FSUE.PDF](https://base.energia.gob.mx/ER1218/LB_FSUE.PDF).

SENER (s. f.), *Reglas de operación del fondo de servicio universal eléctrico*, Secretaría de Energía, en: [https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/SubsecretariaElectricidad/FondoServicioUniversalElectrico/SENER\\_07\\_ReglasOperacionFSUE.pdf](https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/SubsecretariaElectricidad/FondoServicioUniversalElectrico/SENER_07_ReglasOperacionFSUE.pdf).

Uddin, M., H. Mo, D. Dong, S. Elsayah, J. Zhu y J. M. Guerrero (2023), Microgrids: A review, outstanding issues and future trends [Microrredes: revisión, asuntos pendientes y tendencias futuras], *Energy Strategy Reviews*, núm. 49: 101127, en: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>.

US Census Bureau (2020), "2020 decennial census of population and housing" [Censo decenal de población y vivienda de 2020], en: <https://www.census.gov/programs-surveys/decennial-census.html>.

USDA Rural Development (s. f.), "Electric programs" [Programas eléctricos], Departamento de Agricultura de Estados Unidos, en: <https://www.rd.usda.gov/programs-services/all-programs/electric-programs>.

Vera, E. G., C. A. Canizares y M. Pirnia (2020), "Renewable energy integration in Canadian remote community microgrids: The feasibility of hydrogen and gas generation" [Integración de energías renovables en microrredes de comunidades remotas de Canadá: la viabilidad de la generación de hidrógeno y gas], *IEEE Electrification Magazine*, vol 8, núm. 4, pp. 36-45, en: <https://doi.org/10.1109/mele.2020.3026438>.

WHPacific, Inc. (2010), *NANA wind resource assessment project: Final report (2008-2010)* [Proyecto de evaluación de los recursos eólicos NANA: Informe final (2008-2010)], NANA Regional Corporation & U.S. Department of Energy Tribal Energy Program, en: <https://www.nwabor.org/wp-content/uploads/NANAFinalReport23Sept2010.pdf>.

WindpowerNL (2023), "EWT commenced turbine installation at Haeckel Hill onshore wind project in Canada" [EWT ha comenzado la instalación de turbinas en el proyecto eólico terrestre Haeckel Hill en Canadá], 4 de julio, en: <https://windpowernl.com/2023/07/04/ewt-commenced-turbine-installation-at-haeckel-hill-onshore-wind-project-in-canada/>.

YESAB (s. f.), "YESAB online registry" [Registro en línea de YESAB], Yukon Environmental and Socio-economic Assessment Board, en: <https://yesab.ca>.

Yukon Energy Corporation (2014), "Yukon Energy's 2015 wind program" [Programa eólico de Yukon Energy para 2015], en: <https://yukonenergy.ca/about-us/news-events/yukon-energys-2015-wind-program>.

# Anexo. Políticas que apoyan los proyectos de electrificación rural

Este anexo presenta ejemplos de políticas nacionales y federales que influyen directamente en el desarrollo e implementación de proyectos de electrificación en comunidades rurales y remotas en Canadá, Estados Unidos y México. Estas políticas establecen los marcos legales, financieros y programáticos que permiten o respaldan los proyectos de estudio de caso aquí descritos.



## Canadá

### Energía limpia para comunidades rurales y remotas

El programa energía limpia para comunidades rurales y remotas (Clean Energy for Rural and Remote Communities, CERRC) es un elemento central que facilita las transiciones hacia energías renovables en las regiones fuera de la red eléctrica de Canadá. Administrado por el ministerio de Recursos Naturales de Canadá, el CERRC financia proyectos que reducen la dependencia del diésel en comunidades indígenas, rurales y remotas mediante el apoyo a la implementación de energías renovables, el fortalecimiento de capacidades y la planificación energética comunitaria (Natural Resources Canada, 2025). El programa ha sido directamente relevante para los proyectos presentados en este documento, incluidos Inukjuak y la Primera Nación Kwanlin Dün, al ofrecer mecanismos de financiamiento y asistencia técnica adaptados a iniciativas lideradas por comunidades indígenas. Se trata de un programa está alineado con los compromisos de Canadá en materia de reconciliación y crecimiento limpio.

### Iniciativa indígena para la sustitución del diésel

La iniciativa indígena para la sustitución del uso del diésel, también gestionada por el ministerio de Recursos Naturales de Canadá en asociación con la Indigenous Clean Energy Social Enterprise, apoya a líderes comunitarios en la ejecución de proyectos que reducen el uso de diésel mediante energías renovables (Gobierno de Canadá, 2023). Esta iniciativa ha contribuido al desarrollo de capacidades y la formación de liderazgo en comunidades como las descritas en este documento. Complementa los esfuerzos de política más amplios al financiar planes energéticos y etapas iniciales de proyectos en comunidades indígenas.

## Programa REACHE del Norte

El programa enfoque energético responsable del norte para la calefacción y la electricidad comunitarias (REACHE, por sus siglas en inglés) apoya proyectos de eficiencia energética y de energías renovables en los territorios (Crown-Indigenous Relations and Northern Affairs Canada, 2023). Dirigido por Crown-Indigenous Relations and Northern Affairs Canada, el programa se desarrolló en respuesta a los desafíos que enfrenta la infraestructura en regiones remotas del norte. El programa REACHE respalda la planificación y la implementación de sistemas de energía y calefacción limpia en Yukón y los Territorios del Noroeste, y facilitó actividades de planificación preliminar y estudios de factibilidad relevantes para los proyectos analizados, en particular en la Primera Nación Kwanlin Dün.

## Marco pancanadiense sobre crecimiento limpio y cambio climático

El marco pancanadiense sobre crecimiento limpio y cambio climático proporciona el contexto nacional general dentro del cual operan todos los programas mencionados (Environment and Climate Change Canada, 2016).

Aprobado en 2016, este marco establece la base para los objetivos de emisiones netas cero de Canadá y orienta la inversión federal hacia la reducción de emisiones y el apoyo a las tecnologías limpias. El marco hace un llamado explícito al desarrollo de energía limpia en comunidades indígenas y remotas, estableciendo así un mandato político y financiero para programas como REACHE y CERRC.

## Estados Unidos

### Ley de electrificación rural de 1936

La ley de electrificación rural (REA, por sus siglas en inglés) de 1936 sigue siendo la piedra angular del desarrollo energético rural en Estados Unidos. Promulgada originalmente para extender el acceso a la electricidad en las zonas rurales mediante préstamos a bajo interés, la REA autorizó la asistencia federal a cooperativas y empresas de servicios públicos. En la actualidad, el programa, administrado por Servicios Públicos Rurales (Rural Utilities Service) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, ofrece préstamos y garantías de préstamos para infraestructura energética en comunidades con servicios insuficientes. Este marco legal e institucional continúa brindando el apoyo fundamental para proyectos en regiones como el distrito de Northwest Arctic.



### **Programas de energía rural del Departamento de Agricultura**

Los programas eléctricos de desarrollo rural del Departamento de Agricultura de Estados Unidos financian la construcción, modernización y mejora de las infraestructuras de distribución eléctrica en las zonas rurales (U.S. Department of Agriculture Rural Development [s. f.]). A través de programas como *High Energy Cost Grant* y *el Electric Infrastructure Loan Program*, estas iniciativas reducen la carga financiera de las comunidades rurales que buscan diversificar o estabilizar su suministro energético. Las iniciativas de microrredes del distrito de Northwest Arctic se beneficiaron de esta estructura.

### **Orden núm. 841 de la Comisión Federal Reguladora de la Energía**

Emitida en 2018, la Orden núm. 841 de la Comisión Federal Reguladora de Energía (FERC, por sus siglas en inglés) instruyó a las organizaciones regionales de transmisión y a los operadores de sistemas independientes a garantizar que los recursos de almacenamiento de energía participen en los mercados de energía mayoristas (FERC, 2020a). Si bien su impacto principal se produce en áreas conectadas a la red, la orden estableció un precedente regulatorio para valorar los activos de almacenamiento en la planificación energética. Esto ayudó a validar el uso del almacenamiento en baterías en microrredes enfocadas en la resiliencia, como las de Borrego Springs y Alaska.

### **Orden núm. 2222 de la Comisión Federal Reguladora de la Energía**

La orden núm. 2222 de la FERC, publicada en 2020, facilita la agregación de recursos energéticos distribuidos, incluidos los sistemas solares en techos y de baterías, para su participación en mercados regionales (FERC, 2020b). Aunque su impacto es mayor en las regiones conectadas a la red, esta orden se alinea con las tendencias de política federal que apoyan el desarrollo energético descentralizado y la flexibilidad, principios fundamentales para las estrategias energéticas de comunidades remotas.

## **México**

### **Reforma energética de 2013**

La reforma energética de 2013 introdujo cambios constitucionales que reestructuraron el sector energético de México al permitir la inversión privada y promover el acceso universal a la electricidad. Esta reforma creó la base para el Fondo de Servicio Universal Eléctrico (FSUE) con el establecimiento de un marco legal e institucional que respalda los esfuerzos gubernamentales de electrificación en comunidades rurales y marginadas.

Publicada en 2014 como resultado de la reforma energética, la ley de la industria eléctrica establece la base legal del FSUE (Secretaría de Gobernación, 2014). El

artículo 126 ordena específicamente la creación de un fondo de servicio universal de electricidad destinado a atender comunidades remotas y desatendidas. La ley define las funciones de la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en la planificación y ejecución de proyectos de electrificación.

### **Reforma energética de 2025**

El 18 de marzo de 2025, el *Diario Oficial de la Federación* publicó un paquete de ocho leyes secundarias que reestructuraron varios componentes del sector energético de México. Entre los principales instrumentos se encuentran la Ley de la Empresa Productiva del Estado, la CFE, la Ley del Sector Eléctrico y la Ley de Planeación y Transición Energética. El nuevo marco legal establece la CFE como una empresa productiva del Estado, con personalidad jurídica y patrimonio propios, sectorizada bajo la SENER. Además, asigna a la CFE mayores responsabilidades en generación, transmisión, distribución y suministro básico de electricidad, así como en la provisión de servicios de internet y telecomunicaciones, en apoyo de objetivos de acceso y equidad social.

La Ley del Sector Eléctrico sustituye a la Ley de la Industria Eléctrica de 2014 e introduce un modelo de preferencia estatal para la generación eléctrica, reservando al menos 54% de la generación a la CFE. Mantiene modalidades específicas de participación de terceros mediante generación distribuida, autoconsumo y sistemas aislados. Los sistemas menores a 0.7 MW están exentos de requerir permisos, y los proyectos de hasta 20 MW pueden seguir procedimientos simplificados. La Ley de Planeación y Transición Energética crea un nuevo marco para la planeación energética nacional, que obliga al desarrollo de instrumentos de planeación a 15 años, incorporando consideraciones de justicia energética, sustentabilidad, derechos humanos y desarrollo regional.



Además de las reformas institucionales, el paquete legal disuelve la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), cuyas funciones se consolidan dentro de una nueva Comisión Nacional de Energía, encargada de la supervisión regulatoria de los sectores eléctrico e hidrocarburos, que opera bajo coordinación de la SENER. Estos cambios forman parte de una reorganización más amplia destinada a centralizar la gobernanza del sector energético y alinear los mandatos operativos con los objetivos de política social.

### **Normas operativas del Fondo de Servicio Universal Eléctrico**

La SENER publicó las reglas oficiales de operación del FSUE, que detallan sus mecanismos de implementación (SENER, s. f.). Estas reglas definen los criterios de elegibilidad, la priorización de proyectos (en función del impacto social y económico) y las obligaciones de desempeño de los contratistas. También explican que el FSUE se financia principalmente a través de asignaciones del presupuesto federal y de ingresos del mercado eléctrico.

