

Fortalecimiento de la electrificación rural en Honduras: Una evaluación integrada de PV+BESS y usos productivos de la electricidad en Gracias a Dios, Honduras

NREL/TP-7A40-92018 • Noviembre 2024

Fortalecimiento de la electrificación rural en Honduras: Una evaluación integrada de PV+BESS y usos productivos de la electricidad en Gracias a Dios, Honduras

Andrew Bilich, Byron Pullutasig, David Martínez Biro, and Daniel Bernal

National Renewable Energy Laboratory

Este informe presenta el trabajo realizado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) en la electrificación rural de Honduras, centrándose especialmente en escuelas y clínicas y extendiéndose para apoyar un desarrollo comunitario más amplio a través de usos productivos de la de la energía. El proyecto fue financiado y dirigido por el Departamento de Energía y el Departamento de Estado de EE.UU. y ejecutado en estrecha colaboración con el Gobierno de Honduras.

Agradecimientos

El equipo del proyecto desea agradecer a las siguientes personas su contribución a la orientación, revisión, diseño y edición de este informe: Roberto Zapata Quiroz (Secretaría de Energía), María José Álvarez (Secretaría de Energía), Riccardo Bracho (National Renewable Energy Laboratory [NREL]), Isabel McCan (NREL), Sophie Schrader (NREL), Liz Breazeale (NREL), Christopher Schwing (NREL), Jennifer Daw (NREL) y Adam Warren (NREL).

Cita sugerida: Bilich, Andrew, Byron Pullutasig, David Martínez Biro y Daniel Bernal. 2024. *Fortalecimiento de la electrificación rural en Honduras: Una evaluación integrada de PV+BESS y usos productivos de la electricidad en Gracias a Dios, Honduras*. Golden, CO: Laboratorio Nacional de Energías Renovables. NREL/TP-7A40-92018. <https://www.nrel.gov/docs/fy25osti/92018.pdf>.

Aviso

Este informe presenta el trabajo realizado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) en la electrificación rural de Honduras, centrándose especialmente en escuelas y clínicas y extendiéndose para apoyar un desarrollo comunitario más amplio a través de usos productivos de la energía. El proyecto fue financiado y dirigido por el Departamento de Energía de EE. UU. y el Departamento de Estado de EE. UU. y ejecutado en estrecha colaboración con el Gobierno de Honduras.

Autores: Andrew Bilich, Byron Pullutasig, David Martinez Biro, y Daniel Bernal

Agradecimientos

El equipo del proyecto desea agradecer a las siguientes personas por sus contribuciones al guiar, revisar, diseñar y editar este informe: Roberto Zapata Quiroz (Secretaría de Energía), María José Alvarez Fonseca (Secretaría de Energía), Riccardo Bracho (Laboratorio Nacional de Energías Renovables [NREL]), Isabel McCan (NREL), Sophie Schrader (NREL), Liz Breazeale (NREL), Christopher Schwing (NREL), Jennifer Daw (NREL) y Adam Warren (NREL).

Lista de acrónimos

BAU	escenario práctico
BESS	sistema de almacenamiento de energía en baterías
COOPESPCOL	La Cooperativa de Pescadores de Puerto Cortés
CO ₂	dióxido de carbono
HNL	lempira hondureño
LCOE	costo nivelado de la energía
NREL	Laboratorio Nacional de Energías Renovables
PAUEH	Política de Acceso Universal a la Electricidad
PAUECEES	Plan de Acceso Universal a la Electricidad en Centros Educativos y Establecimientos de Salud
PUE	uso productivo de la energía
PV	fotovoltaica
REopt	Herramienta de optimización de energía renovable
SEN	Secretaría de Energía de Honduras
USD	dólar estadounidense

Resumen ejecutivo

Honduras enfrenta desafíos importantes en su sector energético, particularmente en las zonas rurales donde el acceso a la electricidad confiable, limpia y asequible sigue siendo limitado. La Secretaría de Energía de Honduras (SEN) administra la iniciativa emblemática de electrificación rural (Política de Acceso Universal a la Electricidad o PAUEH). La PAUEH es clave para abordar el acceso a la energía rural y contiene planes para implementar más de 170 soluciones distribuidas de minirredes solares e híbridas (*La Gaceta* 2021).

A fines de 2023, como primer paso para apoyar los esfuerzos de electrificación de la SEN, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) desarrolló una revisión bibliográfica de los documentos de políticas de electrificación de la SEN y llevó a cabo una serie de talleres de desarrollo de capacidad técnica con la SEN y otras partes interesadas del sector energético en Honduras, centrados en el uso de la herramienta de código abierto REopt¹ del NREL, para realizar evaluaciones tecnoeconómicas y desarrollar optimizaciones de menor costo para posibles sistemas de minirredes solares y de almacenamiento.

Luego de este desarrollo inicial de capacidades en modelado de minirredes, el NREL trabajó con la SEN para desarrollar una evaluación técnico-económica detallada para suministro de energía eléctrica a dos escuelas, un centro de salud y un hospital en una comunidad hipotética en el departamento (región) de Gracias a Dios. El equipo analizó este escenario hipotético para proporcionar información más amplia que pudiera aplicarse a otras comunidades rurales similares en la región, ayudando así a informar posibles estrategias escalables y adaptables. El equipo utilizó el análisis para evaluar también el caso de negocios para aplicaciones de uso productivo de energía (PUE) de almacenamiento frigorífico para la cadena de valor de la pesca, y cómo la incorporación de estas cargas del PUE impactarían potencialmente tanto en la viabilidad de un sistema de almacenamiento de energía solar fotovoltaica y de baterías (PV+BESS), como en el desarrollo económico local.

En general, el análisis destacó el gran potencial de las soluciones PV+BESS y el PUE integradas para apoyar a las comunidades rurales de Gracias a Dios. Los hallazgos clave incluyen:

- **Las opciones de electricidad de base son caras y poco confiables.** El modelo estimó un costo nivelado de energía (LCOE) de alrededor de \$0.64/kWh para sistemas de generación electrógenos de pequeña escala destinados a suministrar energía eléctrica a las cargas de referencia de las escuelas, clínicas y hospitales. Esto todavía se considera energía costosa y conlleva riesgos para la calidad de la energía y posibles daños a equipos sensibles debido a los picos de voltaje.
- **Las pequeñas soluciones PV+BESS pueden soportar de manera rentable las cargas de referencia para las escuelas, clínicas y hospitales pequeños.** Si bien existe un costo inicial para el desarrollo y la implementación de la solución PV+BESS, los ahorros operativos provenientes de los costos de combustible del generador evitados disminuyen el costo general del ciclo de vida del sistema PV+BESS en comparación con los sistemas electrógenos individuales de pequeña escala de referencia y dan como resultado una

¹ Se puede acceder a la herramienta REopt en: <https://reopt.nrel.gov/tool>.

disminución del LCOE de aproximadamente \$0.04/kWh, así como emisiones de carbono evitadas de alrededor de 4.5 toneladas de dióxido de carbono (CO₂)/año.

- **Agregar cargas de PUE reduce significativamente el LCOE en comparación con el escenario base (BAU).** La solución PV+BESS optimizada con cargas PUE (Escenario 2A: El 50% de energía renovable logra un LCOE de \$0.42/kWh, un 34% inferior a los \$0.64/kWh del escenario base basado únicamente en generador (Escenario 1).
- **Aumentar la fracción de energía renovable no tiene un impacto significativo en los costos inicialmente, pero lograr objetivos más elevados en materia de energía renovable requiere una cuidadosa consideración de las compensaciones.** La fracción de energía renovable optimizada en costos para la solución PV+BESS + carga PUE es de alrededor del 50%, pero aumentar esa fracción al 70% solo aumentó el LCOE en \$0.02/kWh. Sin embargo, perseguir objetivos de energía renovable más elevados, como el 85% o el 100%, implica inversiones de capital más sustanciales, que conducen a un ligero aumento del LCOE, como se observa en el Escenario 2C con 85% de energía renovable (\$0.47/kWh) y el Escenario 2D con 100% de energía renovable (\$0.71/kWh). Estos escenarios ilustran que, si bien una mayor generación de energía renovable reduce la dependencia del diésel y las emisiones, es necesario equilibrar la inversión inicial con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo y los beneficios operativos.
- **El suministro de electricidad a escuelas, centros de salud y pequeñas empresas públicas y privadas puede ser un elemento clave para soluciones de electrificación más amplias.** Al implementar un sistema de "red de inicio" diseñado para brindar servicios esenciales específicos, como escuelas, clínicas de salud y empresas críticas para las operaciones diarias de la comunidad, este proyecto piloto puede sentar las bases de manera rentable para una minired más extensa que podría expandirse para incluir cargas y usuarios adicionales con el tiempo.
- **Las aplicaciones de PUE de almacenamiento frigorífico de la pesca reducen las pérdidas poscosecha y abren nuevas oportunidades de mercado.** Los PUE de fabricación de hielo y congelación pueden reducir las pérdidas poscosecha en casi un 14% y ayudar a desbloquear las ventas posteriores tanto a intermediarios como directamente a los mercados secundarios, lo que ayuda a aumentar los ingresos potenciales del mismo volumen de captura de pescado. Además, la propia fabricación de hielo proporciona una nueva fuente de ingresos a partir de la venta posterior del excedente de hielo.
- **El acceso a nuevos mercados y flujos de valor puede más que duplicar los márgenes de ingresos de las cooperativas pesqueras.** Agregar el PUE de almacenamiento frigorífico permite a las cooperativas pesqueras ganar 50% más (un promedio de 29.75 lempiras hondureñas [HNL]/lb. con almacenamiento frigorífico en comparación con 19.5 HNL/lb. sin almacenamiento frigorífico) en comparación con la línea de base para la misma captura de pescado. Los ingresos aumentan aún más mediante la venta de hielo. Hay costos adicionales de electricidad y pagos por los equipos PUE, pero son mucho menores que el aumento del ingreso. En total, los ingresos operativos netos aumentaron más del doble cuando se añadió el almacenamiento frigorífico.

- **La capacitación paralela es una necesidad clave, como lo es el enfoque en la inclusión para maximizar las posibles aplicaciones de PUE.** Es fundamental respaldar la implementación de PUE con una programación enfocada en el desarrollo de modelos de negocios/colaboración, así como capacitación tanto en la operación y el mantenimiento de los propios dispositivos PUE (en este caso, el congelador y la máquina de hielo), así como en el modelo de negocios más amplio. En este caso, esto incluye el desarrollo de vínculos con los mercados posteriores, la fijación de plazos y precios para la captura de pescado, la coordinación para la utilización de la capacidad de fabricación de hielo y de almacenamiento frigorífico, etc. Esta capacitación es especialmente necesaria para cerrar las brechas de oportunidades para los grupos marginados.
- **Se necesita financiamiento para el piloto, así como trabajar para agrupar sitios similares y crear un enfoque más programático.** El despliegue del piloto modelado es pequeño, por lo que existe potencial para combinar los despliegues de PV+BESS y PUE y apuntar a financiamiento concesional de socios de desarrollo o integrar la programación en iniciativas gubernamentales en curso; sin embargo, se pueden desbloquear más vías potenciales mediante el desarrollo de una cartera de proyectos potenciales y PUE acompañantes.

Al evaluar el potencial de implementar sistemas integrados PV+BESS para apoyar servicios comunitarios críticos como educación y atención de salud, así como el potencial para el desarrollo económico y empresarial posterior, este análisis representa un primer paso que puede ayudar a informar estrategias específicas para el desarrollo de proyectos piloto PV+BESS alineados con las prioridades nacionales y la planificación a nivel sectorial en el marco de la PAUEH.

Tabla de contenido

Resumen ejecutivo	v
1 Introducción	1
1.1 Estructura del informe	2
2 Enfoque	4
3 Sistemas PV+BESS para escuelas, clínicas y carga PUE	5
3.1 Metodología y supuestos	5
3.1.1 Estimación de los requisitos de producción de pescado, fabricación de hielo y refrigeración para la eficiencia energética de los peces	5
3.1.2 Descripción de las cargas de la minired	7
3.1.3 Modelado del comportamiento humano en condiciones de variabilidad de carga	8
3.1.4 Cargas PUE	9
3.1.5 Descripciones de situaciones hipotéticas	10
3.2 Resultados de REopt específicos del sitio	13
3.2.1 Resultados y análisis	13
3.2.2 Análisis	18
3.3 Limitaciones	19
3.4 Consideraciones clave	19
3.4.1 Red de arranque/cargas de anclaje para minirredes	19
3.4.2 Capacitación para operaciones sostenibles	20
3.4.3 Incorporando el conocimiento local y la participación comunitaria	20
4 Caso de negocio PUE para el almacenamiento frigorífico de productos pesqueros	21
4.1 Metodología y supuestos	21
4.2 Resultados	26
4.3 Limitaciones	28
4.4 Consideraciones clave	28
4.4.1 Modelos de negocio/colaboración	28
4.4.2 Capacitación técnica	29
4.4.3 Flujos de valor y PUE paralelos	29
4.4.4 Toma de decisiones y gobernanza dirigidas por la comunidad	30
4.4.5 Grupos marginados	30
5 Vías de financiamiento	32
6 Principales hallazgos y debate	34
7 Próximos pasos	37
Referencias	39
Apéndice A. Modelado de aparatos de abajo hacia arriba	40
Apéndice B. Panorama de las fuentes de financiamiento para proyectos solares	44

Lista de gráficos

Gráfico 1. Descripción general del enfoque de tres pasos	4
Gráfico 2. Ejemplo de modelado de variación de carga para una escuela con 7 a 10 aulas	8
Gráfico 3. Variación semanal de las cargas eléctricas de escuelas, instalaciones médicas y equipos PUE..	9
Gráfico 4. Cargas eléctricas de referencia y ajustadas por PUE durante una semana (de lunes a domingo)	10
Gráfico 5. Comparación del escenario base de REopt para (i) dimensionamiento del sistema; (ii) LCOE de minirredes; (iii) costo de capital.....	15
Gráfico 6. Comparación del escenario de referencia + PUE de REopt para (i) dimensionamiento del sistema; (ii) LCOE de minirredes; (iii) costo de capital.....	17

Lista de Tablas

Tabla 1. Supuestos clave para el modelado de escenarios REopt.....	12
Tabla 2. Comparación de modelos de escenarios de minirredes de referencia.....	14
Tabla 3. Línea base + PUE: Comparación de modelos de escenarios de minirredes	16
Tabla 4. Supuestos y elementos de entrada clave para la evaluación del modelo de negocio de almacenamiento frigorífico y pesca	21
Tabla 5. Comparación del año 1 entre capturas de peces e ingresos en los casos BAU y posteriores al proyecto.....	27
Tabla 6. Comparación de los impactos acumulativos para el año 1, el año 10 y el año 25 posteriores al proyecto.....	27
Tabla A-1. Supuestos de carga del aparato: Escuela pequeña (4 a 6 aulas).....	40
Tabla A-2. Supuestos de carga del aparato: Escuela grande (7 a 10 aulas).....	40
Tabla A-3. Supuestos de carga del aparato: Unidades de Atención Primaria en Salud Clinic	41
Tabla A-4. Supuestos de carga del aparato: Hospital Centro Integral de Salud	42

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Volumen anual de captura de peces	5
Ecuación 2. Captura diaria en temporada alta.....	6
Ecuación 3. Hielo diario necesario	6
Ecuación 4. Máquinas de hielo para satisfacer las necesidades de producción	6
Ecuación 5. Volumen de hielo producido diariamente	7
Ecuación 6. Congeladores para satisfacer las necesidades de almacenamiento frigorífico	7
Ecuación 7. Captura total de pescado vendible en el año (Y).....	24
Ecuación 8. Ingresos brutos totales.....	24
Ecuación 9. Costos anuales totales	25
Ecuación 10. Capital del préstamo.....	25
Ecuación 11. Pago anual del préstamo.....	25
Ecuación 12. Ingresos operativos anuales totales	25
Ecuación 13. Valor actual neto	25

1 Introducción

Honduras enfrenta desafíos importantes en su sector energético, particularmente en las zonas rurales donde el acceso a electricidad confiable, limpia y asequible sigue siendo limitado. De hecho, a pesar de los abundantes recursos energéticos renovables del país, como la irradiación solar, los recursos eólicos e hídricos, la tasa de electrificación se sitúa en torno al 85%, siendo las regiones rurales las más desatendidas (SEN 2022). El terreno accidentado, las poblaciones dispersas y las limitaciones financieras complican aún más los esfuerzos para ampliar la red eléctrica.

La Secretaría de Energía de Honduras (SEN) gestiona una iniciativa emblemática de electrificación rural denominada Política de Acceso Universal a la Electricidad (PAUEH), que aborda el acceso a la energía rural mediante la planificación del despliegue de más de 170 soluciones distribuidas de minirredes solares e híbridas (*La Gaceta* 2021). En este esfuerzo se incluye el “Plan de Acceso Universal a la Electricidad en Centros Educativos y Establecimientos de Salud” (PAUECEES), así como el Programa de Autosostenibilidad Mediante Usos Productivos de La Electricidad. en la República de Honduras.² Estos planes desarrollan objetivos específicos, análisis y una hoja de ruta para suministrar energía eléctrica a las instalaciones de atención médica y las escuelas rurales utilizando soluciones solares e híbridas. Los planes también destacan la oportunidad de aprovechar el suministro de electricidad a las escuelas e instalaciones de atención médica y los nuevos usos productivos de la energía (PUE) para ayudar en última instancia a expandir las soluciones de minirredes para atender a hogares y empresas en comunidades más amplias donde la expansión de la red no es rentable.

A finales de 2023, como primer paso para respaldar estos planes, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) llevó a cabo una serie de talleres de desarrollo de capacidades técnicas con la SEN y otras partes interesadas del sector energético en Honduras, centrados en el uso de la herramienta de código abierto REopt3 del NREL para realizar evaluaciones técnico-económicas y desarrollar optimizaciones de menor costo para posibles sistemas de minirredes solares + almacenamiento.⁴

Partiendo de esta base, el NREL trabajó para desarrollar una evaluación tecnoeconómica de la integración de sistemas fotovoltaicos (PV) y sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS) en comunidades específicamente para escuelas y clínicas. Sin embargo, este esfuerzo reflejó el informe publicado por la SEN, *Centros Educativos Priorizados, 2023*,⁵ que ya proporcionaba un análisis de alto nivel de las necesidades de electrificación en las comunidades rurales priorizadas de Honduras. Tras conversaciones con la Dirección General de Electricidad y Mercados de la SEN, la evaluación pasó a centrarse en la integración de cargas PUE junto con los sistemas PV+BESS para el suministro de electricidad de escuelas y centros de salud.

² Para mayor información, consultar <https://sen.hn/wp-content/uploads/2023/05/7.5.2-Informe-Socializacion-PAMUPE.pdf>.

³ Véase <https://reopt.nrel.gov/tool>.

⁴ Para obtener más información sobre los talleres, consulte <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/89643.pdf>.

⁵ No está disponible públicamente, pero se comparte directamente con NREL como antecedente para este informe.

En concreto, con este análisis, se desarrolló una evaluación técnico-económica detallada para suministrar electricidad a dos escuelas, un centro de salud y un hospital en una comunidad hipotética dentro del departamento (región) de Gracias a Dios, que tiene la tasa de electrificación más baja de Honduras (*La Gaceta* 2021). También se evaluó el modelo de negocios para aplicaciones PUE de almacenamiento frigorífico para la cadena de valor de la pesca y cómo la incorporación de estas cargas PUE impactarían potencialmente tanto en la viabilidad de las soluciones PV+BESS como en el desarrollo económico local. Este aspecto del análisis es particularmente relevante para las comunidades costeras de Gracias a Dios, donde la pesca es una actividad importante dentro de la economía local y la falta de cadenas de frío es una barrera crítica para el desarrollo económico local de la pesca.

Si bien el análisis se centró en los factores técnicos y económicos, también reconoce la importancia de considerar las tradiciones locales, los valores de la comunidad y las prácticas culturales en el diseño e implementación de los esfuerzos de electrificación. Se reconoce la necesidad de aportes locales y participación equitativa de todos los miembros de la comunidad, incluidas las mujeres, las poblaciones indígenas y los pueblos nativos. La integración de estas consideraciones tanto en las soluciones técnicas como en los roles, responsabilidades y procesos de toma de decisiones puede contribuir a una mayor apropiación comunitaria y al éxito a largo plazo de los proyectos de electrificación.

Al evaluar la implementación de sistemas fotovoltaicos integrados con BESS, con este análisis se pretende desarrollar en última instancia una serie de proyectos que garanticen un suministro de energía constante y respalden las necesidades locales de una escuela, una clínica y aplicaciones PUE para el desarrollo económico. Este análisis representa un primer paso que puede ayudar a informar estrategias específicas para desarrollar un proyecto piloto PV+BESS alineado con las prioridades nacionales y la planificación a nivel sectorial en el marco de la PAUEH.

1.1 Estructura del informe

El informe está estructurado de la siguiente manera:

- **Enfoque:** Descripción general del enfoque de varios pasos para la evaluación técnico-económica, incluida la participación de las partes interesadas, el análisis de los sistemas PV+BESS y la evaluación del caso comercial del PUE.
- **Sistemas PV+BESS para escuelas, clínicas y carga PUE:** Se detalla la metodología, supuestos e insumos clave, resultados y consideraciones clave para el análisis tecnoeconómico de alto nivel de posibles minirredes fotovoltaicas con almacenamiento para respaldar tanto las cargas de referencia para las escuelas, la clínica y el hospital, como las cargas estimadas para las posibles necesidades de almacenamiento frigorífico para respaldar la producción pesquera en la comunidad hipotética de Gracias a Dios.
- **Argumento comercial PUE para el almacenamiento frigorífico de productos pesqueros:** Esta sección proporciona un análisis de alto nivel de un posible caso de negocios de PUE de almacenamiento frigorífico para la implementación de almacenamiento frigorífico para apoyar a los grupos de pescadores en la cooperativa Gracias a Dios, incluyendo metodología y supuestos, resultados, limitaciones clave y consideraciones.

- **Vías de financiamiento:** Análisis de alto nivel sobre posibles vías de financiamiento para la minired PV+BESS inicial y el equipamiento PUE.
- **Principales hallazgos y discusión:** Síntesis de las consideraciones y conclusiones clave de los análisis solar y PUE anteriores.
- **Próximos pasos:** Una descripción general de los posibles próximos pasos para el análisis de seguimiento y el apoyo para avanzar y escalar posibles proyectos piloto de electrificación integrada y PUE en Honduras.

2 Enfoque

El proyecto siguió un enfoque de tres pasos para desarrollar la evaluación técnico-económica general de la electrificación de escuelas y centros de salud y las posibles aplicaciones PUE paralelas para el almacenamiento frigorífico en la cadena de valor de la pesca (Gráfico 1).

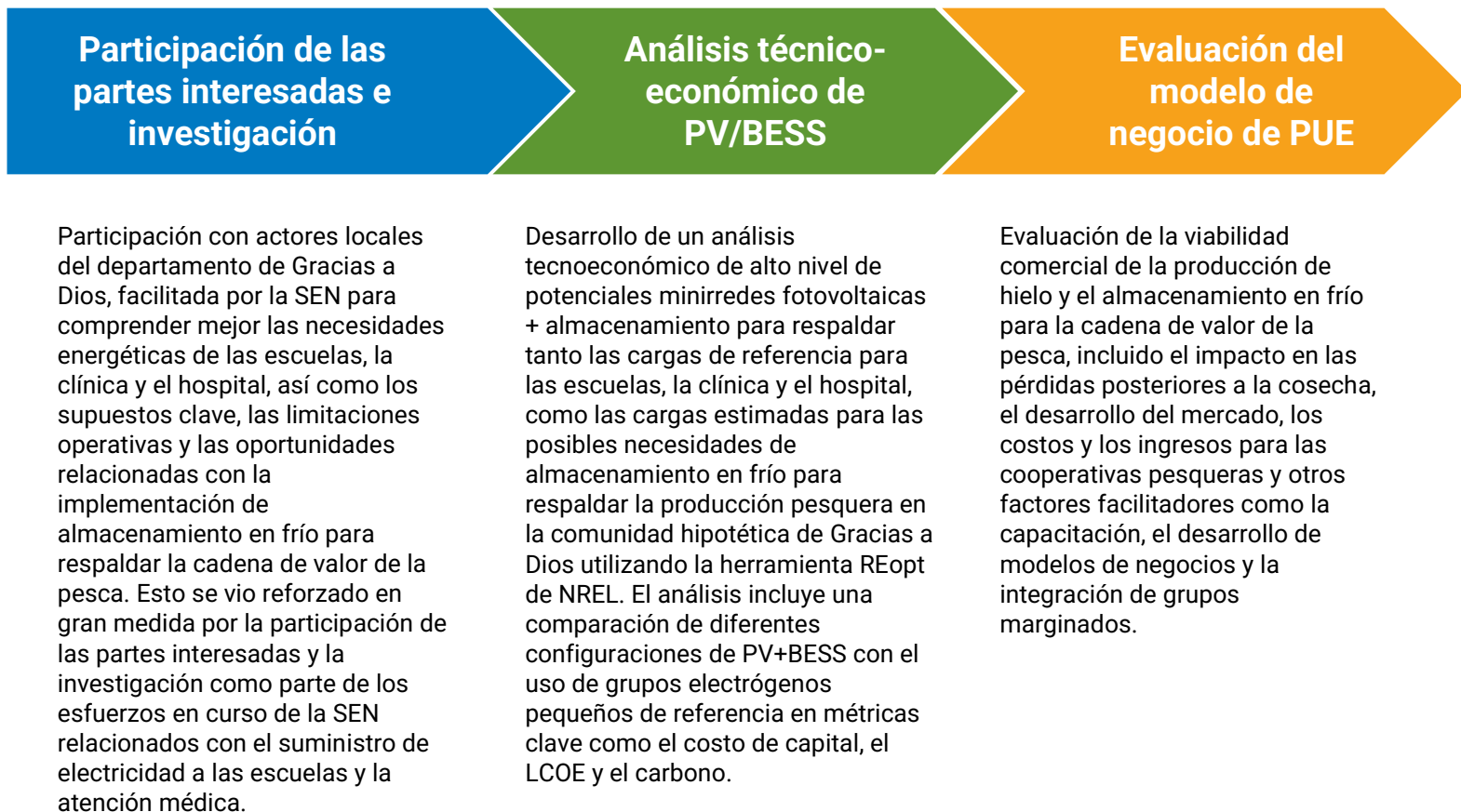


Gráfico 1. Descripción general del enfoque de los tres pasos

Dado el nivel de detalle tanto del análisis tecnoeconómico de PV+BESS como de la evaluación del modelo de negocios PUE, cada sección detalla sus propias metodologías, supuestos, resultados, limitaciones y consideraciones clave específicas, que luego se sintetizan en la sección de análisis al final. Los detalles y aprendizajes del paso de investigación y participación de las partes interesadas (en particular, los aportes y supuestos clave sobre las necesidades de suministro de electricidad a los servicios de atención médica y educación de los procesos de la SEN en curso y los datos de la cadena de valor de la pesca de la conversación con las partes interesadas en Gracias a Dios) se describen en las metodologías de las secciones individuales.

3 Sistemas PV+BESS para escuelas, clínicas y carga PUE

En esta sección se presenta un análisis tecnoeconómico del potencial sistema PV+BESS con generadores diésel para soportar cargas de referencia y PUE en una comunidad hipotética en Gracias a Dios. Nuestro análisis se centra en satisfacer las necesidades energéticas de las escuelas, incluida una escuela pequeña (4 a 6 salas de usos múltiples como aulas, cocinas y espacios de oficinas) y una escuela mediana (7 a 10 salas de usos múltiples), así como instalaciones de atención médica como la Clínica de Unidades de Atención Primaria en Salud y el Hospital Centro Integral de Salud. Estas instalaciones conformarían la minired que proporcionaría refrigeración a los pescadores locales. En las secciones siguientes se detallan la metodología, los supuestos y aportaciones clave, los resultados y las consideraciones clave.

3.1 Metodología y supuestos

Se incorporaron datos de expertos locales, estudios de investigación y modelos de escenarios en el análisis utilizando la herramienta NREL REopt. Los supuestos clave incluyen el tamaño y los patrones de consumo de energía de varias instalaciones comunitarias y los requisitos de hielo y refrigeración basados en la producción pesquera local.

3.1.1 Estimación de los requisitos de producción de pescado, fabricación de hielo y refrigeración para la eficiencia energética de los peces

Con base en el estudio de caso de ejemplo de la cooperativa pesquera hondureña La Cooperativa de pescadores de Puerto Cortés (COOPESPCOL) (MiPesca 2020), en este estudio se asumió un promedio de 200 miembros de la cooperativa pesquera en la comunidad hipotética. Además, se asumió que la captura semanal de peces sería de aproximadamente 1,530 libras (lbs.), equivalente a 79,561 libras por año. Esto sirvió como base para calcular los sistemas de hielo y refrigeración necesarios.

Aproximamos la densidad de peces a la del agua, a 62.4 libras por pie cúbico³, lo que permite calcular el volumen de peces capturados anualmente de la siguiente manera en Ecuación 1:

Ecuación 1. Volumen anual de captura de peces

$$\text{Captura pesquera semanal} = 1,530 \text{ lbs.}$$

$$\text{Captura pesquera anual} = \frac{1,530}{\text{semana}} * 52 \frac{\text{semanas}}{\text{año}} = 79,561 \text{ lbs./año}$$

$$\text{Captura pesquera diaria} = \frac{1,530}{7 \text{ días}} = 218,57 \text{ lbs./día}$$

$$\text{Volumen diario (pie}^3\text{)} = \frac{218.57 \frac{\text{lbs.}}{\text{día}}}{62.4 \frac{\text{lbs.}}{\text{pie}^3}} = 3.5 \frac{\text{pie}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Volumen anual (pie}^3\text{)} = \frac{79,561 \frac{\text{lbs.}}{\text{día}}}{62.4 \frac{\text{lbs.}}{\text{pie}^3}} = 1,275 \frac{\text{pie}^3}{\text{año}}$$

El pico de la temporada de pesca se produce de agosto a enero, lo que equivale a 6 meses o aproximadamente 182 días. Se supone que durante este período se captura el 80% de la pesca anual. El 20% restante se captura durante el período de baja demanda (febrero a julio).⁶ Este ajuste afecta los cálculos de captura diaria de peces y se utiliza para dimensionar la necesidad de almacenamiento frigorífico (Ecuación):

Ecuación 2. Captura diaria en temporada alta

$$\text{Captura anual en temporada alta} = 0,80 \times 79,561 \text{ lbs.} = 63,648 \text{ lbs.}$$

$$\text{Captura diaria en temporada alta} = \frac{63,648 \text{ lbs.}}{182 \text{ días}} \approx 350 \text{ lbs. por día}$$

El requerimiento diario de producción de hielo se determina en función de la captura diaria promedio de peces y una relación hielo-pez típica de 1:1 para peces tropicales (1 libra de hielo por 1 libra de pescado) (Hanjabam y Raj, 2017).⁷ Los pescadores utilizan este hielo para mantener frescos los peces mientras pescan y para transportarlos de regreso a la comunidad. El requerimiento diario de hielo correspondiente se muestra en Ecuación 3.

Ecuación 3. Hielo diario necesario

$$\text{Requerimiento de hielo diario} = 350 \text{ lbs. de pescado por día} * \frac{1 \text{ lb. de hielo}}{1 \text{ lb. de pescado}} = 350 \text{ libras de hielo por día}$$

Para determinar la capacidad necesaria de la máquina de hielo, se supone que el dispositivo funciona de forma continua durante 24 horas, utilizando la máquina para fabricar hielo comercial [Euhomy](#) (Ubuy n.d.) con capacidad para producir 99 libras de hielo en 24 horas (Ecuación 4).

Ecuación 4. Máquinas de hielo para satisfacer las necesidades de producción

$$\text{Tasa de producción necesaria} = \frac{350 \text{ lbs. de hielo por día}}{99 \text{ lbs. de hielo por día}} \approx 3,5 \text{ máquinas de hielo}$$

$$\text{Número de máquinas de hielo necesarias} = 4$$

Los pescadores que se aventuran en el mar durante períodos prolongados o transportan pescado a mercados río abajo necesitan suficiente hielo para conservar su pesca y evitar que se esta se eche a perder. Es fundamental que el hielo permanezca disponible durante todos los viajes de pesca y comercialización para mantener la calidad del pescado. Para satisfacer esta necesidad, es esencial una producción continua de hielo, y éste debe almacenarse adecuadamente para garantizar un

⁶Basado en conversaciones con actores locales en Gracias a Dios.

⁷ Handling and chilled storage of fish (2017); disponible en: https://krishi.icar.gov.in/jspui/bitstream/123456789/25130/1/08_Handling.pdf

suministro constante. Suponiendo que el hielo tiene una densidad de aproximadamente 57.2 libras por pie cúbico (basado en la densidad de hielo normal), el volumen de hielo producido diariamente se muestra en Ecuación 5.

Ecuación 5. Volumen de hielo producido diariamente

$$\text{Volumen de hielo producido diariamente} = \frac{350 \text{ libras}}{57.2 \text{ pie}^3} \approx 6,1 \text{ pie}^3$$

Para almacenar al menos un día de producción y proporcionar un margen para cualquier contingencia, las unidades de almacenamiento de hielo (por ejemplo, refrigeradores o hieleras) deben poder almacenar al menos 6.1 pies cúbicos de hielo. Esto garantizaría que los pescadores tengan un suministro confiable de hielo para conservar su pesca durante largas horas en el mar, manteniendo así la calidad del pescado y el valor de mercado.

Para la refrigeración del pescado, se asumió que la pesca de cada día debe almacenarse durante 3 días antes de su venta. Esto significa que, en un día cualquiera, habrá pescado almacenado para tres días. Se supone el uso de un congelador con una capacidad de 27 pie^3 (GRS n. d.). El número de congeladores necesarios se calcula de la siguiente manera (Ecuación 6).

Ecuación 6. Congeladores para satisfacer las necesidades de almacenamiento frigorífico

$$\text{Necesidad diaria de almacenamiento en frío (pico)} = 350 \text{ lbs. de pescado por día} \times 3 \text{ días} = 1,048.35 \text{ lbs. de pescado}$$

$$\text{Volumen de almacenamiento en frío (pico)} = \frac{1,048.35 \text{ lbs.}}{62.4 \text{ lbs. por pie}^3} \approx 16,8 \text{ pie}^3$$

$$\text{Número de congeladores (pico)} = \frac{16.8 \text{ lbs. por pie}^3}{27 \text{ pie}^3 \text{ por congelador}} = 1 \text{ congeladores}$$

Esto garantiza que en cualquier momento haya suficiente capacidad de almacenamiento para manejar el pescado capturado durante 3 días, lo que permite a la comunidad administrar sus reservas de pescado de manera eficaz.

3.1.2 Descripción de las cargas de la minirred

Como se describió anteriormente, con este análisis se evaluó el potencial con minirredes PV+BESS con generadores diésel para cuatro usuarios finales: una escuela pequeña (4 a 6 aulas), una escuela grande (7 a 10 aulas), una clínica de atención médica y un hospital. Los datos de uso del dispositivo, incluido el consumo de energía, las horas de funcionamiento y la variabilidad del tiempo de inicio, se utilizan para modelar perfiles de carga realistas.

Se determinaron las cargas de referencia para estas instalaciones utilizando un enfoque desde abajo hacia arriba. Esto implicó estimar las cargas eléctricas de los aparatos electrodomésticos disponibles, según lo guiado por PAUECEES y consultas con grupos de pescadores locales de Gracias a Dios. Los parámetros para cada aparato incluyen:

- **Consumo de energía:** El consumo promedio de energía (en vatios) cuando el aparato electrodoméstico está en uso.
- **Cantidad:** El número de cada tipo de aparato electrodoméstico presente.
- **Días de funcionamiento por semana:** ¿Cuántos días a la semana se utilizan habitualmente los electrodomésticos?
- **Horas de funcionamiento por día:** El número promedio de horas que los electrodomésticos están activos cada día.
- **Carga diaria máxima:** La carga máxima registrada durante las horas de funcionamiento.

En el Apéndice A se incluyen tablas de electrodomésticos para usos finales.

3.1.3 Modelado del comportamiento humano en condiciones de variabilidad de carga

Para representar con precisión las condiciones del mundo real, se incorporaron variaciones aleatorias en los tiempos de inicio de los electrodomésticos. Esta variabilidad refleja la naturaleza impredecible del comportamiento humano, reconociendo que las actividades no se adhieren estrictamente a un cronograma fijo. La variación de la hora de inicio introdujo aleatoriedad para simular este comportamiento. Los expertos locales brindaron comentarios sobre la hora de inicio y la variación basándose en el conocimiento local de cómo funcionan normalmente esos sitios.

Los parámetros definidos son:

- **Hora de inicio:** La hora de inicio típica para el uso del aparato.

Variación de la hora de inicio: La posible desviación de la hora de inicio típica, introduciendo aleatoriedad para simular patrones de uso reales. Por ejemplo, un microondas que se espera que comience a funcionar a las 12 p. m. con una variación de ± 1 hora podría comenzar de manera realista en cualquier momento entre las 11 a. m. y la 1 p. m.

Gráfico 2 presenta perfiles de carga energética semanales para varios dispositivos (*La Gaceta*, 2021), generados mediante código de modelado personalizado basado en aportes de expertos locales sobre la posible variación del tiempo de inicio de cada dispositivo. La carga total incluye tiempos de inicio aleatorios y restricciones de potencia máxima para reflejar patrones realistas de uso del dispositivo.



Gráfico 2. Ejemplo de modelado de variación de carga para una escuela con 7 a 10 aulas

El enfoque de modelado personalizado, desarrollado con la orientación de expertos locales, garantiza que los patrones de uso de energía reflejen con precisión las condiciones y comportamientos locales. Esta información es crucial para diseñar y optimizar sistemas energéticos, como las microrredes, para garantizar que puedan satisfacer las necesidades de la comunidad de manera eficiente. El uso de horarios de inicio aleatorios y restricciones de potencia ayuda a capturar la variabilidad en el uso diario, lo que proporciona una comprensión más integral de los desafíos y requisitos potenciales para la planificación del sistema energético.

3.1.4 Cargas PUE

Para las cargas PUE, se incluyó un congelador (250 W) y cuatro máquinas de hielo (un total de 1150 W) en el análisis, asumiendo que funcionan de forma continua durante todo el año. Durante las temporadas altas de pesca, se utilizan principalmente para la refrigeración de pescado, mientras que durante las temporadas bajas pueden utilizarse para otros usos, como el almacenamiento de pescado de lago o río, carne o productos agrícolas. Las cargas PUE se agregan a la carga general de los cuatro sitios.

Los perfiles de carga resultantes para los usuarios finales individuales y los PUE se ilustran en Gráfico 3 y Gráfico 4. Gráfico 3 presenta un gráfico de áreas apiladas que muestra una semana de cargas eléctricas en diferentes instalaciones y la carga constante de los electrodomésticos PUE. Gráfico 4 compara las cargas de referencia con las cargas ajustadas al PUE, lo que ilustra el impacto de la integración del PUE en la demanda energética general de la minirred.

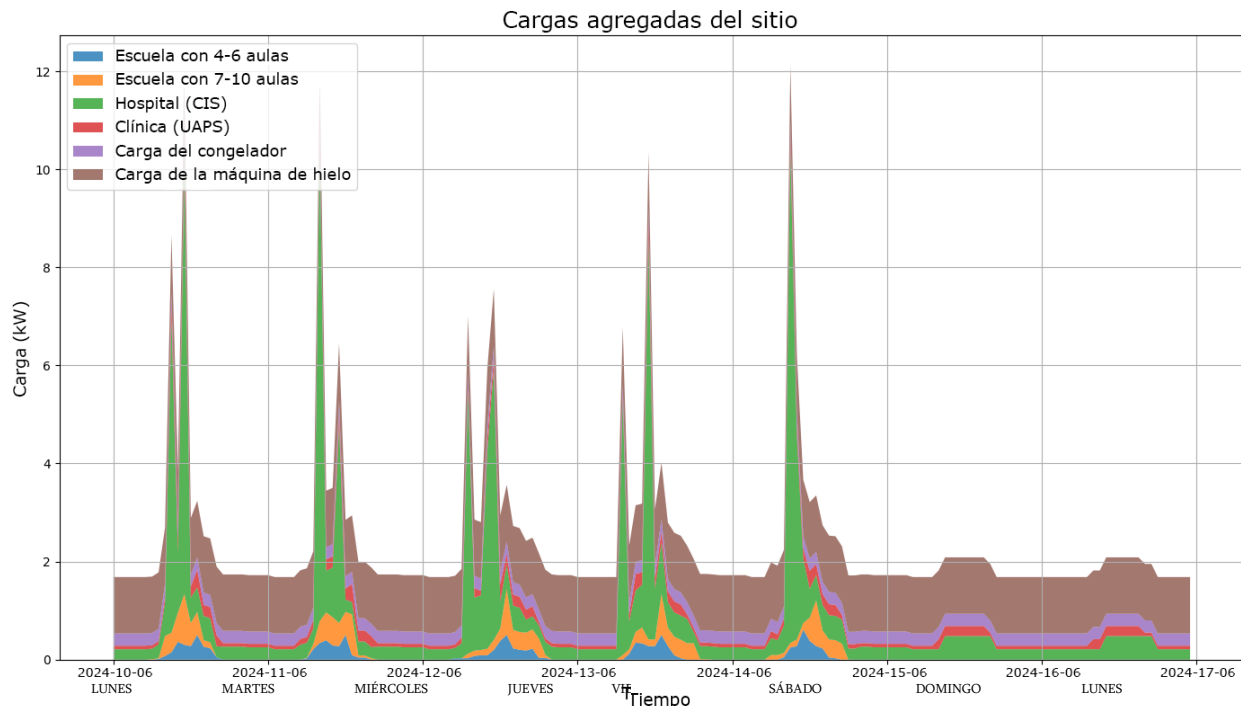


Gráfico 3. Variación semanal de las cargas eléctricas de escuelas, instalaciones médicas y equipos PUE

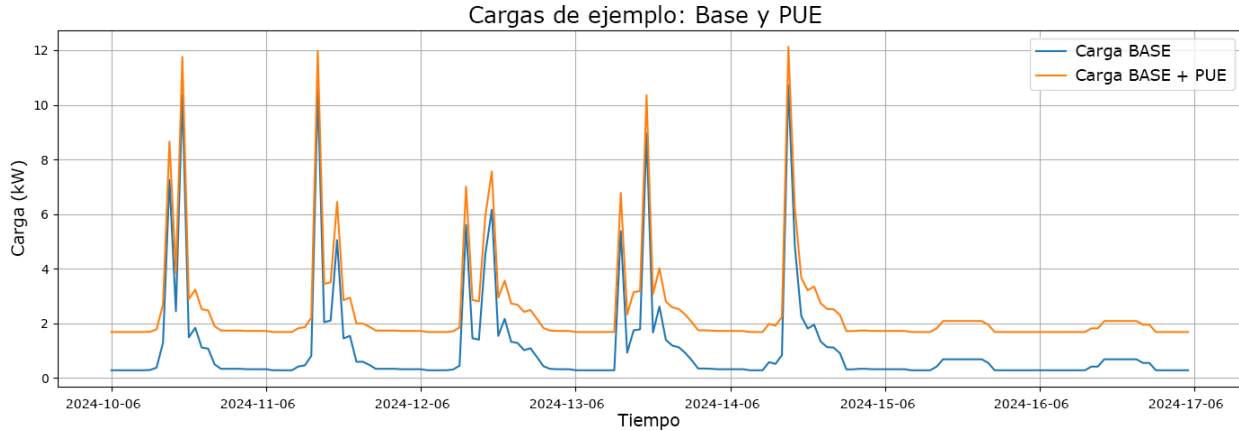


Gráfico 4. Cargas eléctricas de referencia y ajustadas por PUE durante una semana (de lunes a domingo)

3.1.5 Descripciones de situaciones hipotéticas

En este análisis, se exploraron varios escenarios para abordar las necesidades energéticas de las escuelas, una clínica, un hospital y las cargas PUE en la comunidad. Hay dos grupos de escenarios (carga habitual [BAU] servida por pequeños grupos electrógenos o una minirred renovable, y carga BAU+PUE servida por una minirred renovable). Para los dos grupos de escenarios de minirredes, también se consideraron cuatro configuraciones de minirredes diferentes para diferentes niveles de energía renovable (solución de costo puramente optimizado, mínimo 70 % renovable, mínimo 85 % renovable y 100 % renovable) para permitir una exploración más profunda de las compensaciones entre los objetivos de carbono y costos. Los escenarios se detallan a continuación.

- **Escenario 1: Grupos electrógenos de pequeña escala (carga BAU)**
 - Este escenario de referencia utiliza generadores diésel individuales de pequeña escala para satisfacer las demandas energéticas de una escuela pequeña (de 4 a 6 aulas), una escuela grande (de 7 a 10 aulas), una clínica de atención médica y un hospital. Este escenario representa el enfoque BAU sin incorporar fuentes de energía renovables.
- **Escenario 1A: Minirred fotovoltaica + BESS + generador (carga BAU)**
 - Un sistema de minirred híbrido que combina paneles fotovoltaicos, BESS y generadores diésel. Esta configuración tiene como objetivo equilibrar el uso de energía renovable con la generación diésel, reduciendo así el consumo de combustible y las emisiones asociadas y garantizando al mismo tiempo un suministro energético confiable.
- **Escenario 1B: Minirred fotovoltaica + BESS + generador (carga BAU, 70 % energía renovable)**
 - Similar al Escenario 1A, este escenario incluye una restricción para lograr al menos un 70% de generación de energía renovable. Se trata de capacidad adicional de energía fotovoltaica y BESS para alcanzar este objetivo, reduciendo la dependencia del combustible diésel y disminuyendo las emisiones.

- **Escenario 1C: Minired fotovoltaica + BESS + generador (carga BAU, 85 % energía renovable)**
 - Basándose en el Escenario 1B, este escenario aumenta la generación de energía renovable al 85%. La configuración incluye capacidad adicional de PV y BESS para lograr esta mayor generación de energía renovable, minimizando aún más el uso de diésel y las emisiones y al mismo tiempo aumentando ligeramente los costos de capital y el LCOE.
- **Escenario 1D: Mini-red fotovoltaica + BESS + generador (carga BAU, energía 100 % renovable)**
 - Este escenario lleva la generación de energía renovable al 100%, eliminando por completo la dependencia de los generadores diésel. Implica las mayores capacidades de PV y BESS para satisfacer todas las demandas de energía, lo que refleja una importante inversión de capital y un mayor LCOE, pero con el beneficio de cero emisiones al eliminar los generadores diésel.
- **Escenario 2A: Minired fotovoltaica + BESS + generador (carga BAU + PUE)**
 - Este escenario amplía la carga BAU al integrar cargas PUE adicionales, incluidas instalaciones de refrigeración y fabricación de hielo, que aumentan la demanda general de energía. El escenario evalúa el impacto de estas cargas adicionales en la configuración del sistema, los costos y las métricas ambientales.
- **Escenario 2B: Minired fotovoltaica + BESS + generador (carga BAU + PUE, 70 % energía renovable)**
 - Basándose en el Escenario 2A, este escenario requiere que el 70% de las necesidades energéticas se satisfagan mediante fuentes renovables. La inclusión de cargas PUE, junto con una alta fracción de energía renovable, tiene como objetivo maximizar la utilización de energía renovable y reducir la dependencia de los generadores diésel.
- **Escenario 2C: Minired fotovoltaica + BESS + generador (carga BAU + PUE, 85 % energía renovable)**
 - Este escenario aumenta el objetivo de energía renovable al 85% para la carga BAU + PUE. La configuración del sistema incluye capacidades adicionales de PV y BESS para lograr este objetivo de mayor generación renovable, reduciendo aún más la dependencia del diésel y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) mientras aumenta ligeramente el LCOE.
- **Escenario 2D: Minired fotovoltaica + BESS + generador (carga BAU + PUE, energía 100 % renovable)**
 - Este escenario logra un objetivo de generación de energía 100% renovable para la carga BAU + PUE, eliminando el uso de combustible diésel. Implica la mayor inversión en capacidades fotovoltaicas y BESS, lo que da como resultado cero emisiones por la eliminación de los generadores diésel, pero con los mayores costos de capital y LCOE entre los escenarios.

Tabla 1 Presenta los supuestos clave utilizados en todos los escenarios, incluidos datos específicos de la ubicación y parámetros financieros. Estas suposiciones son fundamentales para garantizar comparaciones precisas y consistentes entre diferentes configuraciones de sistemas.

Tabla 1. Supuestos clave para el modelado de escenarios REopt

Categoría	Detalles	Valores	Fuente
Ubicación	Latitud	15.806481	Latitud de Gracias a Dios, Honduras
	Longitud	-84.298769	Longitud de Gracias a Dios, Honduras
Financiero	Tasa de aumento de costos de operaciones y mantenimiento	3%	Tasa de inflación anual esperada
	Tasa de aumento del costo de la electricidad	4.8%	Promedio regional
	Tasa de aumento del costo del combustible del generador	4%	Promedio regional
	Tasa de impuesto	25%	Tasa impositiva comercial promedio regional (PWC 2024)
	Tasa de descuento	12%	Promedio regional
	Análisis de años	25	Ciclo de vida de la energía fotovoltaica
Fotovoltaico	Costo de instalación por kW (dólar estadounidense [USD])	2,500	Modelo de costos de sistemas solares fotovoltaicos para América Latina y Canadá de Wood Mackenzie, 2024
BESS	Costo de instalación por kW (USD)	775	Línea base tecnológica anual del NREL, 2024 (NREL n.d.)
	Costo de instalación por kWh (USD)	388	Línea base tecnológica anual del NREL, 2024 (NREL n.d.)
	Costo de reemplazo por kW (USD) en el año 10	440	Línea base tecnológica anual del NREL, 2024 (NREL n.d.)
	Costo de reemplazo por kWh (USD) en el año 10	220	Línea base tecnológica anual del NREL, 2024 (NREL n.d.)
Generador	Costo del combustible por galón (USD)	3.76	Precios locales para Juticalpa: 92.18 HNL por galón
	Costo de instalación por kW (USD)	1,200	Monitor de almacenamiento de energía Wood Mackenzie 2024
	Costo de reemplazo por kW (USD) en el año 10	1,000	Monitor de almacenamiento de energía Wood Mackenzie 2024

Si bien en este análisis se utiliza un costo de combustible específico (\$3.76 por galón), los precios del combustible diésel en Honduras pueden variar drásticamente según la región e incluso diariamente, especialmente en áreas remotas como La Mosquitia en Gracias a Dios. Esta región, a la que se puede acceder principalmente por agua y aire, a menudo experimenta importantes fluctuaciones de precios debido a factores como la falta de una regulación consistente, los altos costos de transporte y la dinámica del mercado local. El costo del combustible diésel utilizado aquí debe considerarse como una instantánea, teniendo en cuenta que los costos reales podrían fluctuar considerablemente. En análisis futuros, cuando se

seleccionen comunidades específicas, será importante considerar estos factores y tener en cuenta los desafíos logísticos, como el transporte y almacenamiento de combustible. Además, esta inestabilidad de precios subraya los beneficios potenciales de las soluciones de energía renovable en zonas remotas donde los sistemas dependientes del diésel pueden enfrentar costos operativos impredecibles.

Los escenarios se evalúan en relación con varias métricas, incluido el tamaño de PV (kW-DC), el tamaño de la batería (kW), la capacidad de la batería (kWh), la capacidad adicional del generador (kW), el costo de capital inicial (\$), la generación de energía renovable (%), las emisiones anuales de CO₂ (toneladas), las emisiones de CO₂ del ciclo de vida (toneladas), la carga anual (kWh), el costo total del ciclo de vida (\$) y el LCOE de la minired (\$/kWh).

3.2 Resultados de REopt específicos del sitio

En esta sección se presenta una evaluación del desempeño técnico y económico de varias configuraciones de minirredes para una carga comunitaria agregada, incluyendo dos escuelas (una con 4 a 6 aulas y otra con 7 a 10 aulas), una clínica de salud y un hospital en la región noreste de Honduras. Dada la dependencia que la comunidad tiene por la pesca, la integración de PUE, como la refrigeración de pescado y la fabricación de hielo, es crucial para apoyar las actividades económicas locales.

3.2.1 Resultados y análisis

Nuestro análisis de los escenarios de minirredes revela información clave sobre el desempeño técnico y económico de diferentes configuraciones. El objetivo principal es identificar la solución de energía limpia más rentable y sostenible para una comunidad fuera de la red con una actividad económica distinta, como la pesca, que requiere energía confiable para aplicaciones PUE. Los resultados del modelado REopt para estos escenarios se resumen en

Tabla 2 (datos de referencia) y Tabla 3 (datos de referencia + PUE) y se visualizan en Gráfico 5 (escenarios de referencia) y Gráfico 6 (escenarios de referencia + PUE), detallando:

- **Dimensionamiento del sistema:** Incluye las capacidades instaladas de energía fotovoltaica, almacenamiento de baterías y generadores diésel en diferentes escenarios.
- **LCOE de minirredes:** LCOE para cada escenario, destacando los beneficios en términos de costos por la integración de energía renovable.
- **Costo de capital:** Inversión inicial requerida para cada escenario, observándose mayores costos iniciales en escenarios con mayores porcentajes de generación de energía renovable e integración de PUE.

Tabla 2. Comparación de modelos de escenarios de minirredes de referencia

Escenario	1. Base: Solo GENERADOR	1A. Base: GENERADOR + FV+BESS	1B. Base: 70% Energía renovable - GENERADOR + PV+BESS	1C. Base: 85% Energía renovable - GENERADOR + PV+BESS	1D. Base: 100% Energía Renovable - GENERADOR + PV+BESS
Tamaño de PV (kW-CC)	-	5	5	7	11
Tamaño de la batería (kW)	-	14	14	13	14
Capacidad de la batería (kWh)	-	18	18	17	41
Capacidad del generador adicional (kW)	15	3	2	2	1
Costo neto de capital (USD) ⁸	\$21,240	\$32,090	\$33,700	\$37,110	\$54,270
Costo anual de operación y mantenimiento (USD)	\$300.00	\$99.08	\$109.13	\$139.41	\$190.38
Costo anual del combustible del generador (USD)	\$2,660	\$995.60	\$797.26	\$405.75	\$26.37
Generación de energía renovable (%) del total	-	63	70	85	99
Emisiones anuales de CO ₂ (toneladas)	7.25	2.71	2.17	1.11	0.07
Emisiones de CO ₂ durante el ciclo de vida (toneladas)	181.25	67.8	54.29	27.63	1.8
Carga anual de microrred (kWh)	9,276.6	9,276.6	9,276.6	9,276.6	9,276.6
Costo total del ciclo de vida (USD)	\$42,800	\$40,060	\$40,290	\$41,030	\$55,740
LCOE de microrredes (USD/kWh)	0.64	0.60	0.60	0.62	0.85

⁸ El costo de capital neto no incluye la adquisición, instalación ni operación y mantenimiento de tanques de almacenamiento de combustible. Esto supone que la infraestructura de almacenamiento de combustible existente está disponible y que solo se considera el suministro de combustible al generador en los costos operativos.

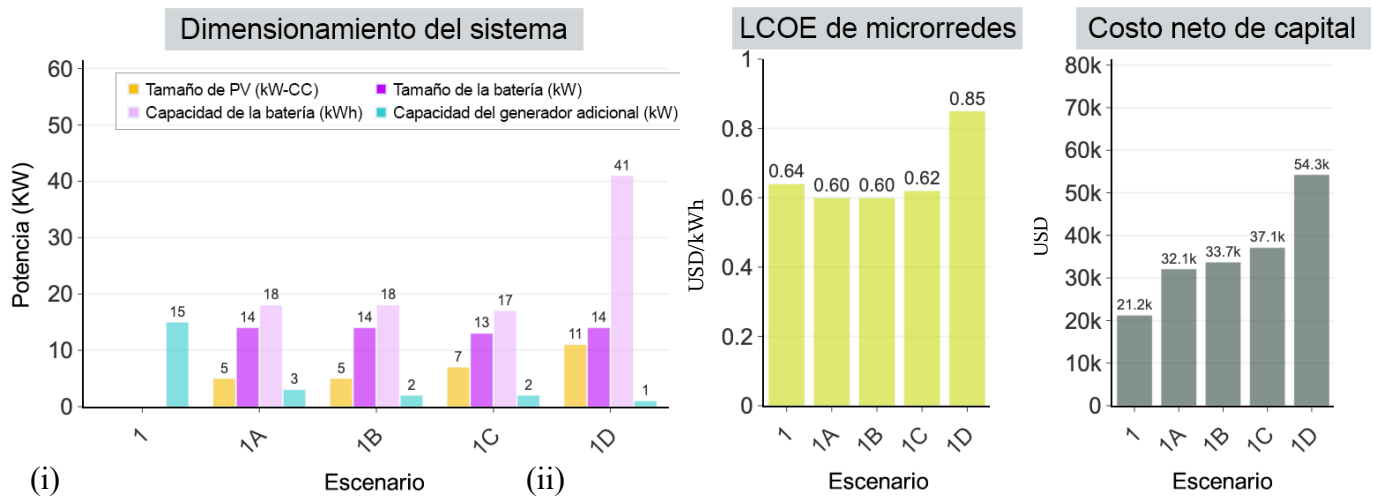


Gráfico 5. Comparación del escenario base de REopt para (i) dimensionamiento del sistema; (ii) LCOE de microrredes; (iii) costo de capital

Escenario 1: Los grupos electrógenos de pequeña escala (carga BAU) sirven como base con dependencia de generadores diésel. Este escenario no tiene generación de energía renovable, lo que resulta en un LCOE de \$0.64/kWh con costos significativos de combustible para el generador de \$2660 al año y 7.25 toneladas de emisiones anuales de CO₂. El costo total del ciclo de vida es de \$42,800 con un costo de capital neto de \$21,240, lo que resalta las cargas financieras y ambientales asociadas con la dependencia del diésel.

Escenario 1A: PV+BESS + Generator Mini-Grid (BAU Load) introduce un sistema híbrido con 5 kW de PV, 14 kW/18 kWh de BESS y un generador diésel de 3 kW. Esta configuración logra una generación de energía renovable del 63%, reduciendo los costos de combustible del generador a \$995.60 anuales y las emisiones de CO₂ a 2.71 toneladas. El LCOE disminuye a \$0.60/kWh y el costo total del ciclo de vida es de \$40,060, con un costo de capital neto de \$32,090, lo que refleja los beneficios de integrar energías renovables.

Escenario 1B: Minirred fotovoltaica, BESS y generador (carga BAU, 70% de energía renovable): el objetivo es generar un 70% de energía renovable manteniendo la capacidad fotovoltaica en 5 kW y ajustando el BESS a 14 kW/18 kWh, al tiempo que se reduce la capacidad del generador diésel a 2 kW. Este escenario mantiene un LCOE de \$0.60/kWh, con reducciones adicionales en los costos de combustible del generador a \$797.26 anuales y emisiones de CO₂ a 2.17 toneladas. El costo total del ciclo de vida es de \$40,290 y el costo de capital neto es de \$33,700, lo que demuestra que se puede lograr una mayor generación de energía renovable con un modesto aumento en los costos iniciales.

Escenario 1C: Minirred FV+BESS + Generador (carga BAU, 85% de energías renovables) aumenta la capacidad FV a 7 kW y ajusta el BESS a 13 kW/17 kWh. Este escenario logra un objetivo de generación de energía renovable del 85%, reduciendo el LCOE a \$0.62/kWh. Los costos del combustible para generadores diésel caen significativamente a \$405.75 al año, y las emisiones anuales de CO₂ disminuyen a 1.11 toneladas. El costo total del ciclo de vida es de

\$41,030, con un costo de capital neto de \$37,110, lo que indica un enfoque equilibrado entre la reducción de costos y emisiones.

Escenario 1D: Minirred FV+BESS + Generador (carga BAU, 100% energía renovable) representa un escenario de generación de energía 100% renovable con 11 kW de FV y 14 kW/41 kWh de BESS.⁹ Esta configuración reduce significativamente los costos de combustible del generador (\$26.37 anuales) y las emisiones de CO₂ (0.07 toneladas). Sin embargo, el LCOE aumenta a \$0.85/kWh debido a las mayores inversiones de capital, con un costo total del ciclo de vida que alcanza los \$55,740 y un costo de capital neto de \$54,270, lo que refleja las compensaciones para lograr una dependencia total de las energías renovables.

Tabla 3. Línea base + PUE: Comparación de modelos de escenarios de minirredes

Escenario	1. Base: Solo GEN	2A. Línea base + PUE: GEN + PV + BESS	2B. Línea base + PUE: 70% de energía renovable: GEN + PV + BESS	2C. Línea base + PUE: 85% Energía renovable: GEN + PV + BESS	2D. Línea base + PUE: Energía 100% renovable: GEN + PV + BESS
Tamaño de PV (kW-CC)	-	8	12	15	22
Tamaño de la batería (kW)	-	12	13	13	12
Capacidad de la batería (kWh)	-	15	21	32	82
Capacidad del generador adicional (kW)	15	5	3	2	1
Costo neto de capital (USD)	\$21,240	\$40,230	\$49,970	\$60,940	\$99,670
Costo anual de operación y mantenimiento (USD)	\$300.00	\$177.24	\$222.79	\$272.82	\$403.45
Costo anual del combustible del generador (USD)	\$2,660	\$2,980	\$1,780	\$897.27	\$56.04
Generación de energía renovable (%)	-	50	70	85	99
Emisiones anuales de CO ₂ (toneladas)	7.25	8.12	4.85	2.44	0.15
Emisiones de CO ₂ durante el ciclo de vida (toneladas)	181.25	202.91	121.36	61.1	3.82
Carga anual de microrred (kWh)	9,276.6	20,620.8	20,620.8	20,620.8	20,620.8
Costo total del ciclo de vida (USD)	\$42,800	\$63,300	\$64,560	\$69,370	\$102,790
LCOE de microrredes (USD/kWh)	0.64	0.42	0.44	0.47	0.71

⁹ Aunque el Escenario 1D apunta al 100% de energía renovable, el objetivo se ajustó al 99% en REopt para evitar resultados inviables. El generador permanece en el sistema, pero su consumo de combustible y su tamaño son lo suficientemente mínimos como para ser descartados.

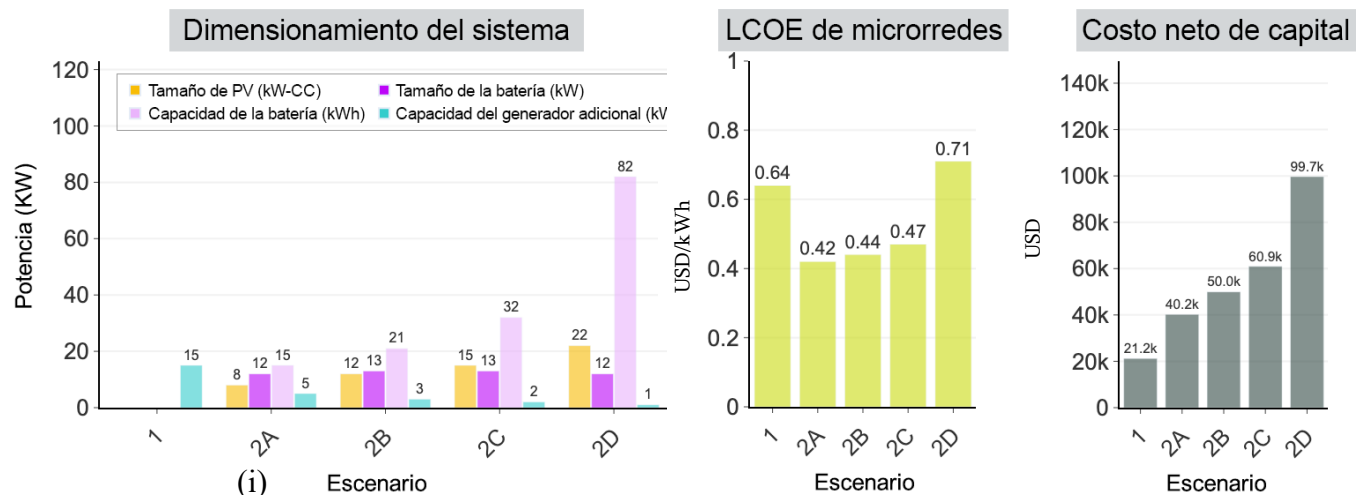


Gráfico 6. Comparación del escenario de referencia + PUE de REopt para (i) dimensionamiento del sistema; (ii) LCOE de minirredes; (iii) costo de capital

Escenario 2A: La minirred FV+BESS + generador (BAU + carga PUE) presenta un sistema híbrido con 8 kW de FV, 12 kW/15 kWh de BESS y un generador diésel de 5 kW para soportar cargas PUE adicionales. Este escenario logra una generación de energía renovable del 50%, lo que resulta en un LCOE de \$0.42/kWh. Los costos de combustible del generador aumentan a \$2,980 anualmente debido a la mayor carga, y las emisiones de CO₂ aumentan a 8.12 toneladas anuales. El costo total del ciclo de vida es de \$63,300, con un costo de capital neto de \$40,230, lo que refleja los costos adicionales de la integración de PUE.

Escenario 2B: Minirred FV+BESS + Generador (BAU + Carga PUE, 70% de energía renovable) tiene como objetivo generar un 70% de energía renovable con 12 kW de FV y 13 kW/21 kWh de BESS, junto con un generador diésel de 3 kW. El LCOE aumenta ligeramente a \$0.44/kWh, pero los costos de combustible del generador disminuyen a \$1,780 al año y las emisiones de CO₂ caen a 4.85 toneladas al año. El costo total del ciclo de vida es de \$64,560, con un costo de capital neto de \$49,970, lo que indica el equilibrio logrado entre costo, carga e integración renovable.

Escenario 2C: La minirred FV+BESS + generador (BAU + carga PUE, 85% de energías renovables) aumenta la capacidad FV a 15 kW y la del BESS a 13 kW/32 kWh. Este escenario alcanza el 85% de generación de energía renovable, con un LCOE de \$0.47/kWh. Los costos de combustible del generador disminuyen aún más a \$897.27 por año, y las emisiones de CO₂ se reducen a 2.44 toneladas por año. El costo total del ciclo de vida es de \$69,370 y el costo de capital neto es de \$60,940, lo que refleja el impacto de una mayor integración de energías renovables en los costos y las emisiones.

Escenario 2D: Minirred FV+BESS + Generador (BAU + Carga PUE, 100% Energía Renovable) representa un escenario de energía 100% renovable con 22 kW de FV y 12

kW/82 kWh de BESS, eliminando la necesidad de un uso significativo del generador.¹⁰ Esto da como resultado el costo de combustible para generador más bajo de \$56.04 al año y emisiones de CO₂ de 0.15 toneladas al año. Sin embargo, el LCOE aumenta a \$0.71/kWh, con un costo total del ciclo de vida que alcanza los \$102,790 y un costo de capital neto de \$99,670, lo que ilustra la inversión sustancial necesaria para una dependencia total de la energía renovable y al mismo tiempo respaldar la PUE.

3.2.2 Análisis

Los resultados demuestran los beneficios económicos y ambientales de integrar la energía renovable con la generación diésel tradicional en minirredes, particularmente cuando se consideran aplicaciones PUE. Estos beneficios son evidentes en las reducciones en el LCOE en los escenarios que incorporan PV y BESS, especialmente cuando se combinan con cargas PUE como refrigeración y fabricación de hielo.

Si bien los costos iniciales son más altos para los sistemas con mayor generación de energía renovable y capacidades de PUE, estas configuraciones ofrecen menores costos operativos y beneficios ambientales que conducen a reducciones significativas en el LCOE. Por ejemplo, en los escenarios de referencia, hay una disminución notable en el LCOE de \$0.64/kWh en el Escenario 1 (solo diésel) a \$0.60/kWh en los Escenarios 1A y 1B, que integran PV y BESS. La tendencia continúa en los escenarios base + PUE: El escenario 2A logra un LCOE bajo de \$0.42/kWh, lo que demuestra la ventaja económica de agregar energía renovable incluso con una mayor demanda de energía debido a la PUE.

La comparación del Escenario 1 con el Escenario 2D ilustra que, si bien la integración de una mayor generación de energía renovable y PUE requiere una inversión de capital inicial significativamente mayor, aún conduce a un aumento marginal en el LCOE en comparación con la línea de base. En concreto, el Escenario 2D, que representa un escenario de generación de energía 100% renovable con integración total de PUE, da como resultado un costo de capital neto de \$99,670. Este escenario prevé un ligero aumento del LCOE a \$0.71/kWh en comparación con el LCOE base de \$0.64/kWh en el escenario de solo diésel. Sin embargo, este aumento marginal en el LCOE puede verse compensado por los beneficios de reducir la dependencia del combustible diésel, minimizar los costos operativos y reducir las emisiones. Esto respalda el argumento de que los mayores costos iniciales asociados con una mayor generación de energía renovable y la integración de PUE se justifican por la reducción significativa de la dependencia del diésel y los correspondientes ahorros ambientales y operativos.

Los hallazgos resaltan el potencial para reducir los costos de energía mediante la integración de tecnologías renovables, particularmente cuando se combinan con PUE. Además de los beneficios económicos, el impacto ambiental también se reduce significativamente, como se ve en las reducciones drásticas en las emisiones de CO₂ en escenarios con mayor generación de energía

¹⁰ Aunque el Escenario 2D apunta al 100% de energía renovable, el objetivo se ajustó al 99% en REopt para evitar resultados inviables. El generador permanece en el sistema, pero su consumo de combustible y su tamaño son lo suficientemente mínimos como para ser descartados.

renovable. El paso de las 7.25 toneladas de emisiones anuales de CO₂ del Escenario 1 a las 0.15 toneladas de CO₂ del Escenario 2D subraya las ventajas ambientales con la integración de las energías renovables.

Las siguientes secciones profundizan en los beneficios socioeconómicos más amplios que la PUE puede ofrecer, en particular al apoyar actividades económicas locales como la pesca mediante la construcción de una minired que pueda soportar la energía necesaria para la refrigeración y la fabricación de hielo. Al proporcionar energía confiable para cargas PUE esenciales, estos sistemas pueden mejorar la productividad y tienen el potencial de mejorar los medios de vida y el desarrollo económico.

3.3 Limitaciones

Los resultados del análisis demuestran el potencial significativo de reducción de costos que supone la integración de PUE con fuentes de energía renovables en sistemas de miniredes fuera de la red. Sin embargo, existen varias limitaciones y consideraciones que justifican un análisis más profundo para obtener una comprensión integral de los beneficios y desafíos asociados con estos sistemas, entre ellos, los siguientes:

- **Exclusión de los costos de desarrollo y modernización de la red de distribución:** El análisis no tiene en cuenta los costos potenciales asociados con la expansión y modernización de la infraestructura de distribución y transmisión existente para respaldar los nuevos sistemas de miniredes, que pueden afectar significativamente los costos totales de implementación y operación, especialmente en regiones remotas.
- **Precisión de las estimaciones de carga:** Los datos de carga, basados en el uso de sistemas proporcionados por el PAUECEES, pueden no reflejar completamente las variaciones estacionales en la demanda de energía o los aumentos futuros debido al suministro de electricidad, lo que podría afectar la precisión de los escenarios modelados.
- **Incertidumbre en los datos de costos de la tecnología:** Los datos de costos de paneles fotovoltaicos, BESS y generadores pueden variar significativamente según las condiciones del mercado, incluida la dinámica de la cadena de suministro, las tarifas y los costos laborales locales.

Estas limitaciones resaltan la necesidad de un análisis más detallado y localizado para garantizar que los sistemas de miniredes propuestos no solo sean técnicamente factibles sino también económicamente viables para la comunidad. Los trabajos futuros deberían tener en cuenta estos factores e involucrar a las partes interesadas de la comunidad local en el proceso de planificación e implementación para diseñar soluciones que satisfagan mejor las necesidades y condiciones locales.

3.4 Consideraciones clave

3.4.1 Red de arranque/cargas de anclaje para miniredes

El concepto de "red de arranque" se refiere a la configuración inicial de un sistema de minired diseñado para atender cargas de anclaje específicas dentro de una comunidad. En este contexto, las cargas de anclaje podrían incluir servicios esenciales como escuelas, centros de salud y negocios fundamentales para las operaciones diarias de la comunidad. Esta práctica se centra en

establecer un suministro de energía confiable a través de energía fotovoltaica distribuida fuera de la red y BESS. La configuración inicial tiene como objetivo proporcionar energía constante y asequible, sentando las bases para una minired más extensa que podría ampliarse para incluir cargas y usuarios adicionales con el tiempo.

Para una posible integración futura, es esencial aclarar el diseño y las estrategias operativas de la minired. El sistema debe ser escalable, permitiendo la incorporación de nuevas cargas a medida que crecen las necesidades energéticas de la comunidad. La integración de sistemas avanzados de gestión energética será crucial para optimizar el funcionamiento de los activos solares y de almacenamiento, garantizar una distribución eficiente de la energía y minimizar el desperdicio.

3.4.2 Capacitación para operaciones sostenibles

Un elemento clave para el despliegue de los sistemas híbridos PV+BESS es garantizar que se realicen esfuerzos paralelos para capacitar al personal local en la operación y el mantenimiento de estos sistemas. Esto no solo mejoraría la resiliencia operativa, sino que también mejoraría la aceptación y el apoyo de la comunidad, lo que aumenta la sostenibilidad social del proyecto. Dependiendo de cómo se financie el programa, podría ser una asociación con un programa existente de desarrollo de fuerza laboral para técnicos solares o capacitación directa de un desarrollador o institución local. Por ejemplo, se podría prever un programa de capacitación combinado que incluya tanto el sistema PV+BESS como el sistema PUE (como se destaca en la sección siguiente).

3.4.3 Incorporando el conocimiento local y la participación comunitaria

La SEN ha identificado la integración del conocimiento local, las tradiciones y los valores comunitarios como una prioridad máxima para el éxito de los proyectos de electrificación rural. La SEN ha destacado la importancia de garantizar que las soluciones energéticas no solo cumplan los requisitos técnicos sino que también estén profundamente arraigadas en las prácticas culturales y las estructuras de gobernanza de las comunidades a las que sirven. Este enfoque es fundamental para fomentar la sostenibilidad a largo plazo, ya que promueve la apropiación y alinea los proyectos energéticos con las condiciones sociales, económicas y ambientales únicas de las poblaciones locales.

En consonancia con estas prioridades, este proyecto ha comenzado a adoptar un enfoque centrado en la comunidad al involucrar a líderes locales, residentes y otras partes interesadas. Para construir sobre esta base y garantizar una participación comunitaria integral, es necesario seguir trabajando. Los esfuerzos futuros deberían centrarse en definir funciones y responsabilidades para la gestión del sistema de maneras culturalmente apropiadas, incorporando aportes locales en los procesos de toma de decisiones y gobernanza. Se debe prestar especial atención a mejorar la participación de todos los miembros de la comunidad, incluidas las mujeres, las poblaciones indígenas y los pueblos nativos que pueden haber estado subrepresentados en las consultas iniciales.

4 Caso de negocio PUE para el almacenamiento frigorífico de productos pesqueros

Esta sección proporciona un análisis de alto nivel de un posible caso de negocios de PUE con implementación de almacenamiento frigorífico para apoyar a los grupos de pescadores en la cooperativa Gracias a Dios. En las secciones siguientes se detallan la metodología, los supuestos y aportaciones clave, los resultados y las consideraciones clave.

4.1 Metodología y supuestos

Para este análisis inicial, se modelaron dos dispositivos de almacenamiento frigorífico diferentes para apoyar a la cooperativa pesquera Gracias a Dios: (1) un congelador horizontal (27 ft³); y (2) cuatro máquinas para fabricar hielo (cada una con una capacidad de 99 lb/día), como se detalla anteriormente. Todas las suposiciones y aportaciones se incluyen en Tabla 4 y luego se analizan en detalle con las ecuaciones correspondientes a continuación. Todos los aportes y suposiciones son preliminares y se basan en conversaciones con un grupo local en Gracias a Dios, otros estudios de casos e investigaciones y puntos de referencia conservadores.

Todos los parámetros están diseñados para ser flexibles y pueden ajustarse en el modelo de Excel adjunto.

Tabla 4. Supuestos y elementos de entrada clave para la evaluación del modelo de negocio de almacenamiento frigorífico y pesca

Métrico	Valor	Unidades	Fuente/Notas
Número de pescadores	200	Gente	
Tasa de conversión (HNL a USD)	24.769	HNL–USD	Convertidor de divisas de Xe.com (2024), publicado el 15 de julio de 2024
Tasa de descuento	12%	%	Análisis de REopt arriba
Captura de peces			
Captura anual de peces	79,560	Libras	Un perfil sobre COOPESPCOL destacó una captura de pescado de 1,530 libras de pescado cada semana, lo que se traduce en 79,560 libras por año si la cooperativa en Gracias a Dios tiene un tamaño similar (MiPesca 2020).
BAU: Pérdidas poscosecha	15%	%	Se estima que las pérdidas poscosecha en la pesca en pequeña escala hondureña se sitúan entre el 10% y el 20%.
Pérdidas poscosecha posteriores al proyecto	3%	%	COOPESPCOL (MiPesca 2020)
Disminución anual de las capturas de peces	0.3	%	Estimación conservadora basada en proyecciones de pérdida de pesca debido al cambio climático, la sobrepesca, la degradación del hábitat y otros factores
Precio del pescado (local)	15	HNL/ libra.	Basado en 15 HNL/lb. de conversaciones con actores locales en Gracias a Dios

Métrico	Valor	Unidades	Fuente/Notas
Precio del pescado (Intermediario)	30	HNL/ libra.	Basado en 30 HNL/lb. de conversaciones con actores locales en Gracias a Dios
Precio del pescado (mercado secundario)	50	HNL/ libra.	Basado en 50 HNL/lb. de conversaciones con actores locales en Gracias a Dios
BAU: % de capturas vendidas localmente	70%	%	Basado en conversaciones con actores locales en Gracias a Dios y observaciones de otros mercados
BAU: % de capturas vendidas a intermediarios	30%	%	Basado en conversaciones con actores locales en Gracias a Dios y observaciones de otros mercados
BAU: % de capturas vendidas a mercados secundarios	0%	%	Basado en conversaciones con actores locales en Gracias a Dios y observaciones de otros mercados
Post-Proyecto: % de capturas vendidas localmente	35%	%	65%/35% de ventas secundarias vs. locales divididas para COOPESPCOL (supone que el 35% todavía se vende a intermediarios y el 30% ahora se vende directamente a mercados secundarios después del almacenamiento frigorífico y la fabricación de hielo) (MiPesca 2020)
Post-Proyecto: % de capturas vendidas a intermediarios	40%	%	65%/35% de ventas secundarias vs. locales divididas para COOPESPCOL (supone que el 40% todavía se vende a intermediarios y el 25% ahora se vende directamente a mercados secundarios después del almacenamiento frigorífico y la fabricación de hielo) (MiPesca 2020)
Post-Proyecto: % de capturas vendidas a mercados secundarios	25%	%	65%/35% de ventas secundarias vs. locales divididas para COOPESPCOL (supone que el 40% todavía se vende a intermediarios y el 25% ahora se vende directamente a mercados secundarios después del almacenamiento frigorífico y la fabricación de hielo) (MiPesca 2020)
Supuestos del proyecto PUE/solar			
Año de inversión	2025	Año	Supone la instalación de equipos solares y PUE en 2025
Duración del proyecto solar	25	Años	Basado en el supuesto general de distribución solar para REopt
Vida útil del equipo PUE	7	Años	Vida útil asumida del equipo PUE
Número de máquinas para fabricar hielo	4	Unidades	Necesidad modelada a partir de la evaluación del hielo anterior
Costo de capital para la máquina de hielo	\$500	USD	Ubuy (n.d.)
Número de congeladores	1	Unidades	Necesidad modelada a partir de la evaluación de almacenamiento frigorífico anterior
Costo de capital para congeladores	\$1,200	USD	Congelador típico disponible en Centroamérica (GRS n.d.)
Agregador de Logística/Aduanas	50%	%	Supuesto conservador basado en otros mercados

Métrico	Valor	Unidades	Fuente/Notas
Plazo del préstamo	3	Años	Basado en la muestra de préstamo de capital para la Cooperativa COOPESPCOL (MiPesca 2020)
Interés del préstamo (anual)	24%	%	Basado en la muestra de préstamo de capital para la Cooperativa COOPESPCOL (MiPesca 2020)
Pagos por año	12	Pagos	Pagos mensuales del préstamo
Consumo eléctrico anual para almacenamiento frigorífico PUE	12,264	kWh	Cálculos de REopt anteriores
Tarifa de electricidad	0.65	USD/kWh	Tarifa asumida para la solución solar + almacenamiento planificada basada en una tarifa de \$0.60–\$0.75/kwh en Puerto Lempira
Costos de pesca	5.45	HNL/lb de captura de pescado	Basado en un estimado de \$0.5/kg para la pesca en pequeña escala. Los costos de pesca incluyen una variedad de costos, como equipo, mantenimiento de embarcaciones/flotas, combustible, etc.
Otros costos de BAU	\$2,400	USD/año	Estimación simple de \$200 por mes para factores no incluidos en los costos de pesca anteriores
Otros costos posteriores al proyecto	\$4,800	USD/año	Estimación simple de 2x BAU para tener en cuenta el aumento de los costos de transporte y otros costos con el modelo comercial ampliado
Aumento anual de los costos	3%	%	Supuesto conservador
Fabricación de hielo			
Relación hielo-pescado	1:1		Relación típica de 1:1 entre hielo y pescado para peces tropicales (1 libra de hielo por 1 libra de pescado) (Hanjabam y Raj, 2017)
Producción de hielo utilizada para la recolección y el transporte de pescado	80%	%	Estimación basada en la necesidad de hielo calculada; el resto del hielo se vende a los mercados locales.
Costo del hielo	\$0.90	Dólar estadounidense/libra.	Basado en una estimación de \$2 a \$5 por bolsa a partir de conversaciones con partes interesadas locales en Gracias a Dios

Se desarrolló un modelo anual simple basado en el rendimiento de la captura de peces para estimar el impacto potencial de la integración de las PUE de almacenamiento frigorífico y producción de hielo para la hipotética cooperativa pesquera de 200 miembros en Gracias a Dios. Este modelo asumió una captura de peces de 79,560 libras por año tanto para el caso BAU como para el caso posterior al proyecto. Se supuso que la captura de pescado crudo disminuiría a una tasa simplificada del 0.3% anual debido a una combinación de factores que incluyen el cambio climático, la sobrepesca, etc.¹¹ Después se aplicaron las pérdidas poscosecha. En el modelo BAU, se asumió que las pérdidas poscosecha serían del 15%, pero con el almacenamiento frigorífico del proyecto, se asumió que las pérdidas se reducirían al 3%. Finalmente, se asumió

¹¹ Es más probable que la pérdida real de pesca sea una función gradual o en cascada a medida que se alcanzan los umbrales o límites del hábitat.

que el 5% de la captura de pescado sería consumido por la propia cooperativa pesquera y, por lo tanto, no se vendería en el mercado (Ecuación 7).

Ecuación 7. Captura total de pescado vendible en el año (Y)

$$\text{Captura pesquera total comercializable}_{(Y)} = \text{Captura de pescado crudo}_{(Y-1)} * (1 - \text{Disminución de peces}) * (1 - \text{Pérdidas poscosecha}) * (1 - \text{Autoconsumo})$$

La captura total de pescado vendible se asignó a diferentes segmentos del mercado, cada uno con diferentes puntos de precio para el pescado (los precios se basan en las conversaciones con un grupo local en Gracias a Dios):

- **Local:** Pescado vendido directamente a los consumidores locales en los mercados de Gracias a Dios (precio: 15 HNL/lb.; precio base: 60% de las capturas de peces; post-proyecto: 35% de la captura de pescado)
- **Intermediarios:** Pescado vendido a intermediarios del mercado para su venta final en otros mercados (precio: 30 HNL/lb.; precio base: 40% de las capturas de peces; después del proyecto: 40% de la captura de pescado)
- **Mercados secundarios:** Pescado vendido directamente a mercados secundarios de mayor valor (precio: 50 HNL/lb.; BAU 0% de captura de peces; post-proyecto: 25% de las capturas de pescado).

Se supone que el almacenamiento frigorífico permite a los pescadores locales vender mayores proporciones de sus capturas de pescado a segmentos de mayor valor, incluso directamente a mercados secundarios. El ingreso bruto total por la venta de la captura de pescado se estima multiplicando la captura total vendible de pescado por la proporción de captura de pescado vendida a un segmento de mercado determinado por el precio por kg para ese segmento de mercado. La PUE de la máquina de hielo y el congelador se diseñó principalmente para el almacenamiento frigorífico de la captura de pescado (relación hielo-peso del pescado 1:1), pero se asumió que el 80% de la producción de hielo se utilizaría para el transporte y almacenamiento de la captura de pescado, dejando el 20% de la producción de hielo para venderse a un precio supuesto de \$0.90/lb en los mercados locales, creando así un flujo de ingresos adicional para la cooperativa pesquera (Ecuación 8).

Ecuación 8. Ingresos brutos totales

$$\text{Ingresos brutos totales}_{(Y)} = \text{Captura pesquera total comercializable}_{(Y)} * [(\text{Mercados locales Prop} * \text{Precio del mercado local}) + (\text{Intermediarios Prop} * \text{Precio del intermediario}) + (\text{Mercado secundario Prop} * \text{Precio del mercado secundario})] + \frac{\text{Relación HIELO:Pescado} * \text{Captura pesquera}}{\text{Hielo para la captura pesquera Prop}} * \text{Precio del hielo}$$

Se calcularon los costos totales asumiendo un costo de pesca (incluyendo una variedad de factores tales como combustible, operaciones y mantenimiento, equipo, etc.) de \$0.22/lb. de captura de pescado o alrededor de 5.45 HNL/lb. de captura de pescado así como otros costos fijos de \$2,400 por año en el caso BAU y \$4,800 en el caso Post-Proyecto (tomando en cuenta

mayores costos de transporte y otros costos para apoyar el negocio aguas abajo). Se supuso que tanto los costos de pesca como los fijos crecerían un 3% anual. En el escenario Post-Proyecto, agregamos costos adicionales por consumo de electricidad y pago del préstamo para equipos PUE. Para el consumo de electricidad, en el análisis utilizamos un valor de consumo anual de 12,264 kWh por año (ver el análisis de REopt arriba) y asumimos una tarifa de electricidad promedio de \$0.65/kWh. También se supuso que la tarifa eléctrica aumentaría en el mismo 3% anual.

Se asumió un préstamo amortizado simple para la compra del equipo PUE (un congelador, cuatro máquinas de hielo) con un plazo de préstamo de 3 años y una tasa de interés anual del 24% (Ecuación 9). Se asumió que el préstamo cubriría el costo total de capital del equipo PUE más un adicional conservador del 50% para logística y aduanas. Se asumió que se necesitarían nuevos préstamos para comprar nuevos equipos de PUE al final de los 7 años asumidos para la vida útil de la PUE (Ecuación 10, Ecuación 11).

Ecuación 9. Costos anuales totales

$$\text{Costos anuales totales}_{(Y)} = [\text{Captura pesquera total}_{(Y)} * \text{Costos pesqueros} * (1 + \text{Aumento del costo})^Y + \text{Otros costos fijos} * (1 + \text{Aumento del costo})^Y + \text{Captura pesquera comercializable total}_{(Y)} * \text{Tasa de consumo eléctrico PUE} * \text{Tasa de electricidad} * (1 + \text{Aumento del costo})^Y + \text{Reembolso del préstamo}]$$

Ecuación 10. Capital del préstamo

$$\text{Capital del préstamo} = (\# \text{ de máquinas para fabricar hielo} * \text{Costo de la máquina para fabricar hielo} + \# \text{ de congeladores} * \text{Costo del congelador}) * (1 + \text{Logística y Aduanas})$$

Ecuación 11. Pago anual del préstamo

$$\text{Reembolso del préstamo}_{(Y)} = 12 * \text{Capital del préstamo} * \frac{\text{Tasa de interés} * (1 + \text{Tasa de interés})^{\text{Tenor} * 12}}{(1 + \text{Tasa de interés})^{\text{Tenor} * 12} - 1}$$

Para los escenarios BAU y Post-Proyecto, el ingreso operativo se estimó restando los costos totales del ingreso bruto total (Ecuación 12).

Ecuación 12. Ingresos operativos anuales totales

$$\text{Ingresos operativos totales}_{(Y)} = \text{Ingresos brutos totales}_{(Y)} - \text{Costos totales}_{(Y)}$$

El valor actual neto de los ingresos operativos se calculó descontando los flujos totales de ingresos operativos según una tasa de descuento del 12% (Ecuación 13).

Ecuación 13. Valor actual neto

$$\text{Valor actual neto} = \frac{\text{Ingresos operativos totales}_{(Y)}}{(1 + \text{Tasa de descuento})^{t-1}}$$

Los resultados se aproximan al \$5/5 HNL o 5 libras más cercano para mejorar la claridad del análisis.

4.2 Resultados

En el caso BAU para el año 1, la captura total de pescado se estimó en 79,560 libras, de las cuales se estimó que ~11,935 libras se perdieron después de la cosecha (más de \$7,225 de pérdida si se valora al precio del mercado local) y 3,380 libras fueron consumidas por la propia cooperativa, lo que dejó 64,245 libras de captura total de pescado vendible. Se estimó que el 70% de la captura total vendible, o 44,970 libras, se vendió a los mercados locales por un ingreso bruto de 674,570 HNL, y el 30% restante (19,270 libras) se vendió a intermediarios por un ingreso bruto de 578,200 HNL. En total, el pescado se vendió a 19.5 HNL/lb. El ingreso bruto total para el primer año se estimó en 1,252,770 HNL, o alrededor de \$50,580. Los costos de pesca se estimaron en 446,540 HNL y otros costos operativos en 61,230 HNL para un total de 507,770 HNL, o alrededor de \$20,500. Los ingresos operativos totales de la cooperativa se estimaron en alrededor de 745,000 HNL, o alrededor de \$30,080.

En comparación, el caso del primer año posterior al proyecto tuvo la misma captura de peces y autoconsumo, pero solo se perdieron aproximadamente 2385 libras después de la cosecha (pérdidas de aproximadamente \$1,445 si se valoran al precio del mercado local), lo que resultó en una captura total de peces vendibles mucho mayor de alrededor de 73,315 libras. Se estima que solo el 35% de la captura total vendible, o 25,560 libras, se vendió en los mercados locales por un ingreso bruto menor de 384,900 HNL. Sin embargo, el 40% de la captura comercializable (29,325 libras) se vendió a intermediarios por un ingreso bruto de 879,775 HNL y el 25% (18,330 libras) se vendió directamente a mercados secundarios por un ingreso bruto de 916,430 HNL. En general, en los mercados secundarios el pescado se vendió en promedio un 52% más caro, a 29.75 HNL/lb. La producción de hielo se estimó en 99,450 libras, de las cuales se estimó que el 20%, o alrededor de 19,890 libras, se venderían para otros usos, lo que agregaría un ingreso adicional de 443,390 HNL. El ingreso bruto total para el primer año casi se duplicó y alcanzó un estimado de 2,624,500 HNL, o alrededor de \$105,960.

Los costos de pesca se estimaron nuevamente en 446,540 HNL, pero otros costos aumentaron a 122,460 HNL. El pago anual del préstamo para las soluciones PUE se estimó en 55,975 HNL, y se estimó que los aparatos PUE consumirían 12,264 kWh de electricidad, con un costo estimado de 203,370 HNL. Los costos totales para el primer año se estimaron en 802,110 HNL, o alrededor de \$32,385. En el escenario posterior al proyecto, los ingresos operativos generales de la cooperativa aumentaron más del doble y alcanzaron aproximadamente HNL 1,822,390, o \$73,575.

Se estima que en el primer año en general el proyecto PUE aumentará la captura total de peces comercializables en un 14% o alrededor de 9,070 libras, principalmente al reducir las pérdidas posteriores a la cosecha. El proyecto PUE también permite a la cooperativa vender esa captura de pescado a mercados de mayor valor, al tiempo que sigue proporcionando pescado a los mercados locales. Todo esto ayuda a aumentar los ingresos operativos en un 145%, o aproximadamente \$43,500, y los ingresos operativos por pescador en \$217. En Tabla 5 se muestra una comparación general de la captura de pescado del año 1, los flujos a diferentes segmentos del mercado y los ingresos de la cooperativa.

Tabla 5. Comparación del año 1 entre capturas de peces e ingresos en los casos BAU y posteriores al proyecto

Métrico	BAU	Post-Proyecto	% Cambio con respecto a BAU
Captura total de peces (libras)	79,560	79,560	0%
Pérdidas poscosecha (lbs.)	11,935	2,385	-80%
Captura total de peces vendibles (libras)	64,245	73,315	14%
Pescado a los mercados locales (lbs.)	44,970	25,660	-43%
Pescado a intermediarios (lbs.)	19,275	29,325	52%
Pescado a mercados secundarios (lbs.)	-	18,330	N/A
Ingresos brutos totales por venta de pescado (USD)	\$50,580	\$88,080	74%
Ingresos brutos totales por ventas de hielo (USD)	-	\$17,900	N/A
Ingresos operativos totales de la asociación (USD)	\$30,080	\$72,515	141%
Ingresos operativos totales por pescador (USD)	\$150	\$363	141%

Con el tiempo, se espera que los valores de captura disminuyan mientras que los costos aumenten, lo que hace que los ingresos de la cooperativa disminuyan con el tiempo, en igualdad de condiciones, pero la PUE cambia significativamente los ingresos de la cooperativa. La PUE también crea un flujo de ingresos estable para la solución PV+BESS y ayuda a reducir el LCOE, como se destacó anteriormente. Tabla 6 destaca los impactos acumulativos del caso posterior al proyecto.

Tabla 6. Comparación de los impactos acumulativos para el año 1, el año 10 y el año 25 posteriores al proyecto

Métrico	Año 1	Año 10	Vida útil completa del proyecto solar (25 años)
Aumento de los ingresos brutos por venta de pescado (USD)	\$37,480	\$369,780	\$904,025
Ingresos brutos por venta de hielo (USD)	\$17,900	\$176,615	\$431,780
Aumento del ingreso operativo respecto a BAU (USD)	\$42,440	\$414,885	\$925,980
Valor actual neto del proyecto (USD)	\$72,515	\$437,785	\$567,540
Valor actual neto por pescador (USD)	\$363	\$2,190	\$2,840
Reducción de pérdidas poscosecha (lbs.)	9,550	94,195	230,280
Reducción de pérdidas poscosecha (USD)	\$5,780	\$57,045	\$139,460
Consumo de electricidad procedente de energía solar (kWh)	12,265	122,640	306,600
Ventas de electricidad (USD)	\$8,210	\$94,130	\$299,360

4.3 Limitaciones

Los cálculos anteriores tienen como objetivo proporcionar un análisis preliminar de alto nivel del modelo de negocio de PUE de almacenamiento frigorífico, pero se deben refinar varios factores en el alcance y análisis posteriores, incluidos, entre otros:

- **Datos primarios limitados de Gracias a Dios:** Se estimaron varias variables clave para el análisis con base en otros perfiles pesqueros publicados o valores conservadores del equipo de análisis, incluyendo la captura anual de peces, las divisiones del mercado, los costos de pesca, otros costos operativos, etc., pero más datos primarios de la cooperativa pesquera local serían valiosos para mejorar estas estimaciones, especialmente para los costos operativos.
- **Vínculos de mercado y modelos de negocio establecidos:** Para el análisis, se asumió que la cooperativa pesquera podría comenzar a vender hielo a los mercados locales y pescado directamente a los mercados posteriores en su totalidad en el año 1, mientras que puede llevar desde unos meses hasta un año para que una cooperativa pueda operar modelos de negocios PUE en su totalidad y crear los vínculos con los mercados posteriores.
- **Modelo de negocio simplificado:** Para el análisis inicial, se asumió un modelo de negocios muy simplificado para la cooperativa mediante el cual los ingresos totales y los costos totales se compartían equitativamente entre los miembros, lo que permitía que los cálculos se centraran en los flujos financieros generales y crearan un único punto de pago para elementos como el préstamo y la electricidad. Sin embargo, se deberían modelar muchas estructuras diferentes de ingresos y de reparto de costos.
- **Estructura de préstamo simplificada:** Para el análisis, se asumió que las instituciones de microfinanzas locales ofrecerían un préstamo amortizado muy simplificado para cubrir el equipo PUE, que luego sería reembolsado con el tiempo por la cooperativa. Sin embargo, la disponibilidad de financiamiento para electrodomésticos y la capacidad de acceder a ese financiamiento por parte de cooperativas locales pueden ser una barrera crítica para la implementación de PUE en los mercados emergentes.

4.4 Consideraciones clave

Si bien el análisis preliminar anterior destaca un fuerte potencial para las aplicaciones PUE de almacenamiento frigorífico para respaldar tanto los medios de vida de los pescadores como una mejor viabilidad de la solución PV+BESS, se deben explorar varias consideraciones en análisis futuros.

4.4.1 Modelos de negocio/colaboración

Para implementar con éxito las aplicaciones PUE modeladas, se deben establecer los modelos de negocio y de colaboración de soporte. Estos modelos podrían funcionar potencialmente de muchas maneras, desde integrarse en una estructura cooperativa existente (por ejemplo, ampliando un modelo simple de ingresos y costos compartidos) hasta establecer nuevas estructuras o colaboraciones más complicadas. Los parámetros clave que deben determinarse antes de la implementación de PUE incluyen:

- Estructura de gobernanza/toma de decisiones, incluidos elementos como la utilización de los activos de PUE y la cantidad y el momento de la venta de las diferentes capturas de peces a diferentes flujos de mercado
- Enfoque de los vínculos y la participación en los mercados posteriores
- División y manejo de ingresos y costos de PUE
- Funciones y responsabilidades, por ejemplo, operación y mantenimiento de los activos, pago de electricidad y otros costos, mercados posteriores, etc.

De las conversaciones iniciales se desprende que es probable que el proyecto PUE planificado pueda integrarse en asociaciones y cooperativas existentes, pero será necesario determinar exactamente cómo, con una participación más detallada de las partes interesadas, antes de su implementación. Si se utilizan asociaciones existentes, un aspecto clave será comprender cómo funcionan esas asociaciones existentes, en particular con respecto a la inclusión y las oportunidades para las mujeres y otros grupos marginados (véase la Sección 4.4.5).

4.4.2 Capacitación técnica

Como se destacó anteriormente, las aplicaciones de PUE en comunidades con acceso limitado a la energía a menudo requieren capacitación paralela adicional para que los socios locales sean sostenibles y exitosas en el largo plazo. Esto deberá incluir capacitación tanto sobre las operaciones y el mantenimiento de los propios aparatos PUE (en este caso, el congelador y la máquina de hielo), como sobre el modelo de negocios más amplio, incluido, en este caso, el desarrollo de vínculos de mercado posteriores, el cronograma y los precios de las capturas de pescado, la coordinación para el uso de la capacidad de fabricación de hielo y de almacenamiento frigorífico, etc. Esta capacitación es especialmente necesaria para cerrar las brechas de oportunidades para los grupos marginados, como se analiza en la Sección 4.4.5. La capacitación PUE o empresarial debe integrarse en el proyecto más amplio de implementación de la solución PV+BESS y el equipo PUE en Gracias a Dios.

4.4.3 Flujos de valor y PUE paralelos

Para este análisis inicial, solo se exploraron las dos aplicaciones de almacenamiento frigorífico y el flujo de valor del pescado, pero vale la pena explorar una variedad de otros flujos de valor y aplicaciones para apoyar el desarrollo socioeconómico en Gracias a Dios, así como la viabilidad de la solución solar. En primer lugar, dada la estacionalidad y las restricciones estacionales para la pesca, es probable que las soluciones de almacenamiento frigorífico puedan (y quizás deban hacerlo desde un punto de vista financiero) considerar respaldar otros flujos de valor, por ejemplo, en la agricultura durante los meses intermedios para la pesca. Además, las aplicaciones de almacenamiento frigorífico pueden ayudar a probar modelos comerciales y de colaboración para la comunidad y para el propietario del activo PV+BESS, que luego pueden adaptarse para respaldar otros modelos PUE (por ejemplo, para aplicaciones comerciales como producción y procesamiento agrícola [bombeo, molienda, trituración, secado, trillado, descascarillado, descortezado, prensado, etc.], carpintería, soldadura, bombeo de agua, telecomunicaciones y atención médica).

4.4.4 Toma de decisiones y gobernanza dirigidas por la comunidad

Además del enfoque en los flujos de valor paralelos, como se describe en la Sección 4.4.3, es crucial que los roles y responsabilidades para la gestión de los sistemas PUE se determinen a través de un proceso colaborativo con la comunidad. Puede ser útil que la comunidad tome la iniciativa a la hora de decidir cómo se asignarán estos roles, garantizando que el proyecto refleje las estructuras de gobierno local y las prácticas culturales. Este enfoque no solo fortalece la propiedad local, sino que también garantiza que los sistemas PUE sean sostenibles y estén alineados con los objetivos a largo plazo de la comunidad.

Para apoyar esto, el proyecto proporciona algunas consideraciones iniciales sobre cómo podrían estructurarse estos roles. Sin embargo, durante el desarrollo real del proyecto, la comunidad, con el apoyo de entidades gubernamentales como SEN y la asistencia técnica según sea necesario, debe evaluar y seleccionar los roles y responsabilidades para su contexto. Este enfoque participativo permite que la comunidad se haga cargo del proceso de toma de decisiones, garantizando que las prioridades locales estén en primer plano mientras la comunidad se beneficia de la orientación y el apoyo de expertos cuando sea necesario. Al empoderar a la comunidad para dar forma al modelo operativo, el proyecto sienta las bases para el éxito a largo plazo y la autosuficiencia.

Como se destacó anteriormente, este elemento de toma de decisiones y gobernanza comunitaria sería un componente central para cualquier esfuerzo de implementación de la Fase 2.

4.4.5 Grupos marginados

Teniendo en cuenta la importancia de la toma de decisiones liderada por la comunidad descrita en la sección anterior, es igualmente crucial garantizar que las intervenciones de acceso a la energía (especialmente para los proyectos PUE) estén diseñadas para tener en cuenta y ser sensibles a las consideraciones de género y otros grupos marginados. Esto ayudaría a evitar la exacerbación de las desigualdades existentes y aprovecharía la intervención para generar nuevas oportunidades.

A nivel mundial, si bien las mujeres representan la mitad de la fuerza laboral total en las cadenas de valor de la pesca, constituyen un porcentaje desproporcionadamente grande de las personas empleadas en los segmentos informales, menor remunerados, menos estables y menos calificados de la fuerza laboral. En la pesca, las mujeres representan el 18% de la fuerza laboral en el sector primario y el 50% en los componentes previos y posteriores a la cosecha de la cadena de valor. Así como las mujeres no son un grupo homogéneo, los diferentes roles de las mujeres en todo el sector pesquero varían ampliamente; sin embargo, las mujeres en el sector tienden a:

- Tener cargas de trabajo significativamente mayores
- Tener mayor riesgo de sufrir violencia de género
- Tener acceso limitado a información, servicios de extensión y financieros, infraestructura, protección social y empleo decente
- Tener acceso limitado a recursos físicos y de capital

- Ser excluidas de los puestos de toma de decisiones y de liderazgo.
- Recibir menos beneficios de sus actividades y tener menos derechos y privilegios
- Tener un control limitado sobre los mercados, cómo se fijan los precios y las interacciones dentro de las cadenas de valor (FAO 2022).

Para un proyecto como el analizado anteriormente, los activos de PUE y acceso a la energía representan un cambio sustancial al status quo, pero también un riesgo de exacerbar aún más las desigualdades al concentrar los beneficios y el poder de decisión en aquellos que ya lo tienen. Por lo tanto, será importante que la comunidad interactúe con las mujeres locales activas en la cadena de valor de la pesca para identificar los desafíos y oportunidades clave para integrarlas en el modelo de negocios de la PUE, por ejemplo, en la operación/coordiación de la PUE de almacenamiento frigorífico, la gobernanza para la toma de decisiones sobre la captura de pescado y los vínculos de mercado posteriores para el pescado. Esto puede requerir capacitaciones paralelas adicionales como las destacadas anteriormente, en particular si se pasa de roles informales a flujos de mercado más formalizados. Es probable que esto sea importante porque los roles tradicionales o existentes en la venta o procesamiento informal de pescado en los mercados locales pueden verse afectados negativamente por el proyecto, ya que se venderá menos pescado a nivel local.

Este elemento del proyecto debería explorarse de forma proactiva en cualquier esfuerzo futuro.

5 Vías de financiamiento

Como se destacó anteriormente, desde la perspectiva del desarrollo de un proyecto, se pueden lograr ahorros de costos y un mayor impacto al combinar la solución híbrida PV+BESS con el desarrollo de PUE y el modelo comercial y la capacitación asociados. En conjunto, centrarse en un solo sitio probablemente supondría un esfuerzo relativamente pequeño (menos de \$100,000).

Esto, combinado con la naturaleza de un proyecto centrado en las escuelas y las cargas de atención médica en comunidades no electrificadas, sugiere una necesidad de centrarse en identificar socios para proporcionar capital concesional o de subvención (por ejemplo, socios de desarrollo, filantropías, donaciones corporativas, etc.) y/o explorar la posibilidad de utilizar algún financiamiento gubernamental (por ejemplo, a través de los esfuerzos en curso PAUEH o PAUECEES). Un desarrollador del sector privado también podría estar interesado en la oportunidad, pero para establecer esa asociación, puede ser necesario desarrollar una solicitud formal de propuestas e incentivos de apoyo, dada la dificultad en la logística y los mercados menos establecidos en Gracias a Dios. También puede resultar difícil desarrollar interés en una aplicación para un solo sitio. En el Apéndice B se puede encontrar una descripción general de alto nivel de los posibles modelos de financiamiento para proyectos y desarrolladores solares.

De todas formas, el objetivo de las asociaciones iniciales sería conseguir apoyo para un proyecto piloto que luego pudiera fundamentar y probar el modelo de negocios para que se pudiera desarrollar un enfoque programático más combinado para una cartera de sitios, que podría ser más atractivo para los actores del sector privado o para proyectos más grandes con bancos de desarrollo y capital filantrópico.

Sin embargo, una vía más probable para construir alianzas puede ser proponer un enfoque más programático desde el principio. Esto podría incluir, por ejemplo, estudios de viabilidad, diseño técnico y adquisiciones para múltiples sitios PV+BESS en Gracias a Dios y otros departamentos, junto con estimulación y capacitación de PUE para la cadena de valor de la pesca (como se modela aquí) y otras cadenas de valor importantes como la atención de la salud, la producción y el procesamiento agrícola (por ejemplo, bombeo de agua, molienda, trilla, secado, despulpado, etc.), agua y telecomunicaciones. De esta manera, aumentarían tanto el monto total del ticket como el potencial de impacto y aprendizaje (especialmente sobre enfoques para potenciar los medios de vida a través de la electrificación integrada), lo que podría abrir vías para la colaboración con diferentes socios para el desarrollo.

Por ejemplo, se podrían realizar mayores esfuerzos para alinearse con la programación nacional existente en materia de energía, economía azul y desarrollo económico rural de socios como Estados Unidos. Agencia para el Desarrollo Internacional,¹² Banco Interamericano de

¹² Para obtener más información sobre el trabajo de la U.S. Agency for International Development con Honduras, consulte <https://www.usaid.gov/honduras>.

Desarrollo,¹³ Banco Mundial,¹⁴ Alianza Energética Global para las Personas y el Planeta¹⁵, Banco Centroamericano de Integración Económica,¹⁶ MiPesca (a través del Fondo Nórdico de Desarrollo),¹⁷ FMO,¹⁸ Programa Mundial de Alimentos,¹⁹ GOAL Blue Economy,²⁰ y otros.

Este esfuerzo de construcción de alianzas es fundamental para los próximos pasos posteriores a este análisis, como se analiza en la Sección 6. También se necesitan algunos análisis y debates adicionales para ayudar a delimitar y enmarcar mejor la oportunidad y desarrollar propuestas específicas para diferentes vías de financiamiento potenciales.

¹³ La información sobre el Banco Interamericano de Desarrollo en Honduras está disponible en <https://www.iadb.org/en/who-we-are/country-offices/honduras>.

¹⁴ Consulte <https://www.worldbank.org/en/country/honduras/overview> para obtener una descripción general del Banco Mundial en Honduras.

¹⁵ La información sobre el programa está disponible en: <https://energyalliance.org/latin-america-caribbean/>.

¹⁶ Consulte <https://www.bcie.org/en/member-countries/founders/republic-of-honduras> para obtener más información.

¹⁷ Más información sobre el Fondo Nórdico de Desarrollo MiPesca está disponible en: <https://www.ndf.int/newsroom/mipescaproject-in-for-long-haul-in-honduras.html>.

¹⁸ Información sobre el Fondo de Acceso a la Energía del FMO: https://www.fmo.nl/1/en/library/download/urn:uuid:1ff382c3-0129-4445-aa07-0f74fdc98bbd/access_to_energy-fund-strategy.pdf.

¹⁹ Para obtener más información sobre el Programa Mundial de Alimentos, consulte <https://www.wfp.org/countries/honduras>.

²⁰ Más información sobre GOAL Resiliencia de la Economía Azul está disponible en: <https://unctad.org/system/files/non-official-document/dite-ted-31062022-UNOC-side-GOAL-brochure-v1.pdf>.

6 Principales hallazgos y debate

Los análisis anteriores resaltan el fuerte potencial de las soluciones PV+BESS y PUE integradas para apoyar la electrificación de las comunidades rurales en Gracias a Dios. Los hallazgos clave incluyen:

- **Las opciones de electricidad de base son caras y poco confiables.** El modelo estimó un LCOE de alrededor de \$0,64/kWh para grupos electrógenos de pequeña escala destinados a suministrar energía a las cargas de referencia de escuelas, clínicas y hospitales. Esto todavía se considera energía costosa y conlleva riesgos para la calidad de la energía y posibles daños a equipos sensibles debido a picos de voltaje.
- **Las pequeñas soluciones PV+BESS pueden soportar de manera rentable las cargas de referencia para escuelas, clínicas y hospitales pequeños.** Si bien existe un costo inicial para el desarrollo y la implementación de la solución PV+BESS, los ahorros operativos provenientes de los costos de combustible del generador evitados disminuyen el costo general del ciclo de vida del sistema PV+BESS en comparación con los grupos electrógenos individuales de pequeña escala de referencia y dan como resultado una disminución del LCOE de aproximadamente \$0.04/kWh, así como emisiones de carbono evitadas de alrededor de 4.5 toneladas de CO₂/año.
- **Agregar cargas de PUE reduce el LCOE en comparación con la línea base BAU.** La solución PV+BESS optimizada con cargas PUE (incluido el almacenamiento frigorífico) logra un LCOE de \$0.42/kWh, significativamente inferior a los \$0.64/kWh de la línea de base con solo generador.
- **Aumentar el porcentaje de generación de energía renovable no tiene un impacto significativo en los costos inicialmente, pero alcanzar objetivos más elevados en materia de energía renovable requiere una cuidadosa consideración de las compensaciones.** La fracción de energía renovable optimizada en costos para la solución PV+BESS + carga PUE es de alrededor del 50%, pero aumentar esa fracción al 70% solo aumentó el LCOE en \$0.02/kWh. Sin embargo, perseguir objetivos de energía renovable más elevados, como el 85% o el 100%, implica inversiones de capital más sustanciales, que conducen a un ligero aumento del LCOE, como se observa en el Escenario 2C con 85% de energía renovable (\$0.47/kWh) y el Escenario 2D con 100% de energía renovable (\$0.71/kWh). Estos escenarios ilustran que, si bien una mayor generación de energía renovable reduce la dependencia del diésel y las emisiones, es necesario equilibrar la inversión inicial con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo y los beneficios operativos.
- **El suministro de electricidad a escuelas, centros de salud y pequeñas empresas públicas y privadas puede ser un elemento clave para soluciones de electrificación más amplias.** Al implementar un sistema de "red de inicio" diseñado para brindar servicios esenciales específicos, como escuelas, clínicas de salud y empresas críticas para las operaciones diarias de la comunidad, este proyecto piloto puede sentar las bases de manera rentable para una minired más extensa que podría expandirse para incluir cargas y usuarios adicionales con el tiempo.

- **Las aplicaciones PUE de almacenamiento frigorífico pueden reducir las pérdidas poscosecha y abrir nuevas oportunidades de mercado.** La PUE de fabricación de hielo y congelación puede reducir las pérdidas poscosecha en casi un 14% y ayudar a desbloquear las ventas posteriores a intermediarios y directamente a los mercados secundarios, lo que ayuda a aumentar los ingresos potenciales del mismo volumen de captura de pescado. Además, la propia fabricación de hielo proporciona una nueva fuente de ingresos a partir de la venta posterior del excedente de hielo.
- **El acceso a nuevos mercados y flujos de valor puede más que duplicar los márgenes de ingresos de las cooperativas pesqueras.** La incorporación del PUE de almacenamiento frigorífico permite a las cooperativas pesqueras ganar un 50% más (un promedio de 29.75 HNL/lb. con almacenamiento frigorífico en comparación con 19.5 HNL/lb. sin almacenamiento frigorífico) en comparación con la línea de base para la misma captura de pescado. Los ingresos aumentan aún más con la venta de hielo. Hay costos adicionales de electricidad y pagos por los equipos PUE, pero son mucho menores que el aumento del ingreso. En total, los ingresos operativos netos aumentaron más del doble cuando se añadió el almacenamiento frigorífico.
- **La capacitación paralela es una necesidad clave, como lo es el enfoque en la inclusión para maximizar las posibles aplicaciones de PUE.** La implementación de dispositivos PUE debe estar respaldada por una programación enfocada en el desarrollo de modelos de negocios/colaboración, así como también por capacitación sobre la operación y el mantenimiento de los dispositivos PUE en sí (en este caso, el congelador y la máquina de hielo) y el modelo de negocio más amplio. En este caso, eso incluye el desarrollo de vínculos con los mercados posteriores, la fijación de precios y plazos para las capturas de pescado, la coordinación para la utilización de la capacidad de fabricación de hielo y de almacenamiento frigorífico, etcétera. Esta capacitación es especialmente necesaria para cerrar las brechas de oportunidades para los grupos marginados.
- **Es necesario asegurar el financiamiento piloto, y la agrupación de sitios similares podría crear un enfoque más programático.** El despliegue piloto modelado es pequeño, por lo que existe el potencial de combinar los despliegues PV+BESS y PUE y apuntar a financiamiento concesional de socios de desarrollo o integrar la programación en iniciativas gubernamentales en curso. Sin embargo, se pueden desbloquear más vías potenciales mediante el desarrollo de una cartera de proyectos potenciales y las PUE que los acompañan.

Los resultados presentados en este informe pretenden ser puntos de datos indicativos iniciales que puedan utilizarse para fundamentar debates y análisis de seguimiento más específicos y diseños piloto. El análisis del proyecto se centró en una comunidad hipotética y, por lo tanto, tuvo limitaciones clave para los datos localizados específicos de Gracias a Dios sobre los costos del equipo eléctrico y la mano de obra, así como sobre la estructura de costos específica y la dinámica operativa de las cooperativas pesqueras locales. El uso de una comunidad hipotética en este análisis permite generar conocimientos que son ampliamente aplicables en comunidades rurales similares de la región. Este enfoque proporciona una base para debates y posibles soluciones que pueden adaptarse y perfeccionarse para contextos locales específicos, incluidos los de Gracias a Dios y más allá. Además, el análisis inicial se centró en el costo de capital para la generación, pero es probable que existan algunas dinámicas más amplias que deban

considerarse para la implementación de sistemas PV+BESS efectivos incluso si funcionan como una red de arranque.

A pesar de las limitaciones, este análisis destaca una oportunidad importante para implementar sistemas PV+BESS en comunidades rurales para impulsar un mejor acceso a la energía limpia para servicios comunitarios críticos y catalizar oportunidades para el desarrollo económico local y los medios de vida a través de aplicaciones PUE personalizadas que respalden cadenas de valor locales críticas. El análisis también destaca un camino importante para la electrificación rural en línea con las prioridades nacionales planificadas en el PAUEH y el Plan de Acceso Universal a la Electricidad en Centros Educativos y Establecimientos de Salud.

7 Próximos pasos

Como se destacó anteriormente, al evaluar el potencial de implementar sistemas integrados PV+BESS para apoyar servicios comunitarios críticos como educación y atención de salud y el potencial para el desarrollo económico y empresarial posterior, este análisis representa la primera de múltiples fases que pueden ayudar a informar estrategias específicas para desarrollar proyectos piloto PV+BESS alineados con las prioridades nacionales y la planificación a nivel sectorial en el marco del PAUEH.

Los posibles próximos pasos y necesidades de seguimiento para el trabajo de la Fase 2 incluyen:

- **Identificación de socios financieros para posibles proyectos piloto:** Como se destacó anteriormente, es esencial comenzar a identificar posibles fuentes de financiamiento para apoyar el desarrollo y la implementación continuos de posibles proyectos de electrificación y PUE. Esto podría incluir la búsqueda de subvenciones, préstamos e inversiones de organizaciones internacionales, agencias gubernamentales y socios del sector privado.
- **Una participación más sólida de las partes interesadas con las comunidades locales:** Se necesitan discusiones más enfocadas y detalladas con comunidades potenciales y líderes comunitarios dentro de Gracias a Dios para evaluar las posibles necesidades de electrificación y las oportunidades para apoyar flujos de valor locales a través de PUE. Estos debates también pueden evaluar la voluntad, la capacidad y la preparación de estas comunidades para participar en un proyecto y proporcionar información y apoyo locales valiosos.
- **Diseño y análisis más personalizados y localizados:** Es necesario recopilar datos más localizados y granulares (por ejemplo, a partir de la participación de las partes interesadas) para adaptar mejor el análisis de posibles soluciones híbridas PV+BESS, así como los enfoques para la PUE y el desarrollo empresarial.
- **Evaluación de otros flujos de valor de PUE:** Como se destacó anteriormente, la evaluación de los casos de negocios para otras corrientes de valor de PUE como telecomunicaciones, procesamiento y producción agrícola, carpintería/metallurgia, impresión y servicios informáticos, entre otros, puede resaltar el potencial para apoyar el desarrollo económico posterior y mejorar la economía potencial de las soluciones solares planificadas. Un menú más amplio de opciones y modelos de negocio para las PUE puede ayudar a generar aceptación comunitaria al adaptar el apoyo a las necesidades locales, expandir el potencial de aprendizaje y potencialmente incorporar diferentes socios y financiadores.
- **Desarrollar una evaluación para una minirred completa:** Los análisis iniciales presentados anteriormente resaltan un camino para desarrollar redes de arranque para cargas de anclaje que luego podrían ampliarse para servir a otros hogares, empresas e instituciones en una comunidad objetivo. Un posible próximo paso sería desarrollar una evaluación completa de la minirred que considere un conjunto más amplio de implicaciones técnicas, económicas y sociales de la implementación de una minirred, asegurando que satisfaga las necesidades de todos los miembros de la comunidad y maximice los beneficios de los sistemas energéticos integrados.

El trabajo de la Fase 2 sentaría las bases para ampliar y replicar el enfoque de la Fase 3 para apoyar el aprendizaje crítico y el desarrollo de proyectos para el acceso a la energía en Honduras y en la región más amplia de América Latina y el Caribe.

Referencias

Brealey, R. A., Myers, S. C., y Allen, F. (2020). *Principles of Corporate Finance* (13th ed.). McGraw-Hill Education.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2022. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9df19f53-b931-4d04-acd3-58a71c6b1a5b/content/sofia/2022/gender-equality-in-fisheries.html>.

GRS. N.d. “Congelador comercial GRS GF 750.” Consultado el 8 de octubre de 2024. <https://gt.grsenlinea.com/products/congelador-tapa-cerrada-27-pies-dos-puertas>.

Hanjabam y Raj. 2017. “Handling and chilled storage of fish”. https://krishi.icar.gov.in/jspui/bitstream/123456789/25130/1/08_Handling.pdf

International Energy Agency (IEA). (2019). *World Energy Investment 2019*. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2019>.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Renewable Energy: A Guide for Communities*. IRENA. Disponible en: <https://www.irena.org/publications>.

La Gaceta. 2021. “SEN Política de Acceso Universal a la Electricidad para Honduras.” <https://www.tsc.gob.hn/web/leyes/PCM-120-2021.pdf>.

MiPesca. 2020. “Perfil de Negocios—Cooperativa de Pescadores Puerto Cortes.” <https://www.goalglobal.org/wp-content/uploads/2021/05/GOAL-Honduras-MiPesca-Perfil-de-negocios-COOPESPCOL.pdf>.

NREL. n.d. “Annual Technology Baseline.” <https://atb.nrel.gov/>.

PWC. 2024. “Honduras: Corporate—Taxes on corporate income.” Última modificación el 18 de julio de 2024. <https://taxsummaries.pwc.com/honduras/corporate/taxes-on-corporate-income>.

SEN. 2022. *Informe de Cobertura y Acceso a la Electricidad*. <https://sen.hn/wp-content/uploads/2023/11/ICEH-CP.pdf>.

Ubuy. N.d. “Euhomy Commercial Ice Maker.” Consultado el 8 de octubre de 2024. <https://www.ubuy.hn/en/product/8W7PKDIMQ-euhomy-commercial-ice-maker-machine-99lbs-24h-stainless-steel-under-counter-ice-machine-with-33lbs-ice-storage-capacity-freestanding-ice-maker>.

U.S. Department of Energy: <https://www.energy.gov/eere/solar/equity-financing-renewable-energy-projects>.

Xe.com Currency Converter. 2024. “1 USD to HNL—Convert US Dollars to Honduran Lempiras.” Consultado el 15 de julio de 2024. <https://www.xe.com/currencyconverter/convert/?Amount=1&From=USD&To=HNL>.

Apéndice A. Modelado de aparatos de abajo hacia arriba

La Tabla A-1, Tabla A-2, Tabla A-3, y Tabla A-4 muestran los detalles de los aparatos de abajo hacia arriba para cada uno de los cuatro usos finales.

Tabla A-1. Supuestos de carga del aparato: Escuela pequeña (4 a 6 aulas)

Aparato	Potencia (W)	Cantidad	Días por semana	Horas por día	Vatios máximos por día	Hora de inicio	Variación de la hora de inicio	Uso entre semana	Uso de fin de semana
Lámparas LED	9	12	1	3	46	18	1	VERDADERO	FALSO
Televisor LED de 40 pulgadas	75	2	5	2	214	10	4	VERDADERO	FALSO
Computadora portátil	65	4	5	6	1,114	9	4	VERDADERO	FALSO
Computadora de escritorio	65	1	5	6	279	9	3	VERDADERO	FALSO
Impresora	350	1	3	0.2	30	10	2	VERDADERO	FALSO
Sistema de sonido	45	1	2	2	26	9	1	VERDADERO	FALSO
Microondas	800	1	5	0.4	229	12	1	VERDADERO	FALSO
Cargador de teléfono celular	8	6	4	2	55	10	4	VERDADERO	FALSO
Antena y receptor de satélite	20	1	5	7	100	9	1	VERDADERO	FALSO
Módem Wi-Fi	20	2	5	7	200	9	1	VERDADERO	FALSO

Tabla A-2. Supuestos de carga del aparato: Escuela grande (7 a 10 aulas)

Aparato	Potencia (W)	Cantidad	Días por semana	Horas por día	Vatios máximos por día	Hora de inicio	Variación de la hora de inicio	Uso entre semana	Uso de fin de semana
Lámparas LED	9	20	1	3	77	18	1	VERDADERO	FALSO
Televisor LED de 40 pulgadas	75	2	5	2	214	10	2	VERDADERO	FALSO
Computadora portátil	65	7	5	6	1,950	9	4	VERDADERO	FALSO
Computadora de escritorio	65	2	5	6	557	9	3	VERDADERO	FALSO
Impresora	350	2	3	0.2	60	10	2	VERDADERO	FALSO
Sistema de sonido	45	1	3	2	39	9	1	VERDADERO	FALSO

Aparato	Potencia (W)	Cantidad	Días por semana	Horas por día	Vatios máximos por día	Hora de inicio	Variación de la hora de inicio	Uso entre semana	Uso de fin de semana
Microondas	800	2	5	0.4	457	12	1	VERDADERO	FALSO
Cargador de teléfono celular	8	9	4	8	82	10	4	VERDADERO	FALSO
Antena y receptor de satélite	20	1	5	7	100	9	1	VERDADERO	FALSO
Módem Wi-Fi	20	2	5	7	200	9	1	VERDADERO	FALSO

Tabla A-3. Supuestos de carga del aparato: Unidades de Atención Primaria en Salud Clínic

Aparato	Potencia (W)	Cantidad	Días por semana	Horas por día	Vatios máximos por día	Hora de inicio	Variación de la hora de inicio	Uso entre semana	Uso de fin de semana
Lámparas LED para clínicas	9	3	5	8	154	10	2	VERDADERO	FALSO
Lámparas LED para exteriores	9	4	5	1	26	10	4	VERDADERO	FALSO
Computadora portátil	65	1	5	3	139	9	4	VERDADERO	FALSO
Impresora	350	1	3	0.05	8	9	3	VERDADERO	FALSO
Microondas	800	1	5	1	143	12	1	VERDADERO	FALSO
Cargador de teléfono celular	8	3	4	0.25	27	9	2	VERDADERO	FALSO
Nebulizador	40	1	5	1	57	8	1	VERDADERO	FALSO
Lupa con lámpara	10	1	2	8	1	10	4	VERDADERO	FALSO
Refrigerador de vacunas (110 litros)	72	1	7	24	671	0	0	VERDADERO	VERDADERO
Ventilador	250	1	7	8	1071	9	1	VERDADERO	VERDADERO

Tabla A-4. Supuestos de carga del aparato: Hospital Centro Integral de Salud

Aparato	Potencia (W)	Cantidad	Días por semana	Horas por día	Vatios máximos por día	Hora de inicio	Variación de la hora de inicio	Uso entre semana	Uso de fin de semana
Lámparas LED para clínicas	9	6	5	8	309	8	2	VERDADERO	FALSO
Lámparas LED para exteriores	9	6	5	1	39	10	4	VERDADERO	FALSO
Computadora portátil	65	2	5	3	279	9	4	VERDADERO	FALSO
Impresora	350	1	3	0.05	8	10	2	VERDADERO	FALSO
Microondas	800	1	5	0.25	143	13	1	VERDADERO	FALSO
Cargador de teléfono celular	8	5	4	2	46	9	1	VERDADERO	FALSO
Nebulizador	40	2	5	2	114	10	4	VERDADERO	FALSO
Lupa con lámpara	10	2	2	0.2	1	9	1	VERDADERO	FALSO
Camilla anatómica	350	2	5	0.5	250	9	1	VERDADERO	FALSO
Electrocardiografía	100	2	5	0.25	36	10	2	VERDADERO	FALSO
Monitor de signos vitales	20	1	5	12	171	9	1	VERDADERO	FALSO
Agitador de tubos	10	2	5	1	14	10	1	VERDADERO	FALSO
Centrífuga	20	1	5	1	14	9	2	VERDADERO	FALSO
Centrífuga de hematocrito	250	1	5	1	179	10	1	VERDADERO	FALSO
Microcentrífuga	280	1	5	1	200	9	2	VERDADERO	FALSO
Espectrofotómetro	120	1	5	1	86	10	1	VERDADERO	FALSO
Lavadora de vidrio	7,000	1	5	1	5,000	9	2	VERDADERO	FALSO
Compresor médico	750	1	5	3	1,607	10	1	VERDADERO	FALSO
Autoclave de 50 a 70 litros	3,000	2	5	1	4,286	9	2	VERDADERO	FALSO

Aparato	Potencia (W)	Cantidad	Días por semana	Horas por día	Vatios máximos por día	Hora de inicio	Variación de la hora de inicio	Uso entre semana	Uso de fin de semana
Esterilizador de 23 a 30 litros de agua	2,000	2	5	1	2,857	10	1	VERDADERO	FALSO
Refrigerador de vacunas	28	1	7	24	671	0	0	VERDADERO	VERDADERO
Refrigerador para áreas especiales	46	4	7	24	1,096	0	0	VERDADERO	VERDADERO
Ventilador	391	2	6	8	2,142	9	1	VERDADERO	VERDADERO

Apéndice B. Panorama de las fuentes de financiamiento para proyectos solares

B.1 Modelos de financiamiento convencionales

Financiamiento de capital: El financiamiento de capital implica la inversión de fondos a cambio de la propiedad parcial de activos. Este método permite la propiedad comunitaria a través de contribuciones: los residentes locales o las partes interesadas invierten en el proyecto y, a cambio, obtienen una parte de la propiedad. Este modelo puede mejorar la participación de la comunidad y garantizar que los beneficios del proyecto se compartan entre quienes invierten (Brealy et. al 2020).

Subvenciones y premios: Las subvenciones y premios son fondos que se conceden y que no es necesario devolver. Estos pueden provenir de diversas fuentes, incluidos subsidios gubernamentales o programas de ayuda al clima y al desarrollo. Las subvenciones son especialmente útiles para financiar las etapas iniciales de los proyectos, incluidos estudios de viabilidad, proyectos piloto y actividades de desarrollo de capacidades. Proporcionan un colchón financiero que puede ayudar a las comunidades y a los desarrolladores a emprender proyectos innovadores sin la carga del reembolso (IRENA, 2020).

Financiamiento de deuda: El financiamiento mediante deuda implica tomar préstamos de fondos que se devuelven con intereses a lo largo del tiempo. Este modelo no afecta la propiedad, lo que lo convierte en una opción popular para proyectos que necesitan un capital inicial significativo pero desean conservar el control de la propiedad. Las fuentes comunes de financiamiento de deuda incluyen préstamos de bancos e instituciones financieras, que a menudo pueden reducirse con un pago inicial. Este modelo es adecuado para proyectos con flujos de ingresos predecibles que puedan garantizar un reembolso oportuno.

B.2 Proveedores de financiamiento convencionales

Proveedores de acciones: El financiamiento de capital puede provenir tanto de entidades públicas como privadas. Las entidades públicas podrían incluir programas gubernamentales destinados a promover la energía renovable o el desarrollo comunitario. Los inversores privados podrían ser personas o empresas que buscan invertir en proyectos sostenibles. Estos inversores aportan el capital necesario a cambio de una participación en el éxito del proyecto (Departamento de Energía de EE.UU.).

Proveedores de deuda: El financiamiento de la deuda suele ser proporcionada por instituciones financieras como bancos, así como instituciones de financiamiento del desarrollo y fondos climáticos. Estas organizaciones prestan dinero con la expectativa de devolverlo con intereses. Evalúan el riesgo del proyecto y su potencial de éxito antes de proporcionar los fondos necesarios (IEA, 2019).

Proveedores de subvenciones y premios: Las subvenciones y premios pueden ser otorgados por una variedad de entidades, tales como:

- **Gobiernos y agencias gubernamentales:** Los gobiernos nacionales y locales a menudo tienen programas para apoyar proyectos de energía renovable, particularmente en áreas marginadas.

- **Instituciones de financiamiento del desarrollo y fondos climáticos:** Estas organizaciones se centran en financiar proyectos que tienen un impacto positivo significativo en los objetivos climáticos y de desarrollo.
- **Organizaciones no gubernamentales y fundaciones privadas:** Muchas organizaciones no gubernamentales y fundaciones ofrecen subvenciones para proyectos que se alinean con sus misiones, como mejorar el acceso a la energía o promover el desarrollo sostenible.
- **Desarrolladores de proyectos de energía renovable:** Algunos desarrolladores pueden ofrecer subvenciones o premios como parte de sus iniciativas de responsabilidad social corporativa o para apoyar proyectos que se alineen con sus intereses comerciales.
- **Plataformas de financiamiento colectivo:** Estas plataformas permiten recaudar pequeñas cantidades de dinero de muchas personas, generalmente a través de Internet. El crowdfunding puede ser una forma eficaz de reunir el apoyo de la comunidad y recaudar fondos para componentes específicos del proyecto.

B.3 Modelos de financiamiento alternativos

Fondos rotatorios verdes: Los fondos rotatorios verdes implican reinvertir en el fondo los ahorros de costos provenientes de proyectos energéticos. Este modelo requiere capital inicial, que puede provenir de instituciones financieras gubernamentales, organizaciones no gubernamentales o contribuciones de la comunidad. El fondo se utiliza para financiar proyectos que generen ahorros de costes, como mejoras de eficiencia energética o instalaciones de energía renovable. Los ahorros se utilizan luego para devolver los fondos, creando un ciclo de financiamiento sostenible.

Préstamos con garantía fiscal: Los préstamos de capital fiscal aprovechan los incentivos fiscales para hacer que las inversiones sean más atractivas para los financistas privados. Estos incentivos pueden provenir de programas gubernamentales nacionales o locales diseñados para promover la energía renovable. La garantía de créditos fiscales reduce el riesgo financiero para los inversores, facilitando la atracción de capital privado para los proyectos.

Contratos de ejecución de servicios de energía o de servicios públicos de energía: Los contratos de ejecución de servicios de energía o de servicios públicos de energía implican asociaciones con empresas de servicios de energía para financiar proyectos de energía. Los ahorros generados por estos proyectos se utilizan para pagar el costo de implementación. Los contratos de desempeño de servicios energéticos pueden agrupar proyectos de energía distribuida con otras medidas de eficiencia energética, garantizando soluciones energéticas integrales. Los contratos de servicios energéticos de empresas de servicios públicos son similares, pero normalmente son contratos de fuente limitada entre una agencia y una empresa de servicios públicos para servicios de energía y reducción de la demanda. Ambos modelos garantizan que los ahorros en costos de energía se amorticen con el proyecto durante el plazo del contrato, brindando sostenibilidad financiera sin costos iniciales.

Estos modelos de financiamiento alternativos ofrecen formas flexibles e innovadoras de financiar proyectos de energía renovable, garantizando que las comunidades puedan acceder al capital necesario para mejorar su infraestructura energética y promover el desarrollo sostenible.