



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“IMPLEMENTACIÓN DE BOMBEO SOLAR
FOTOVOLTAICO PARA UN ANÁLISIS OPERACIONAL:
DIMENSIONAMIENTO DESDE UN ENFOQUE INTEGRAL
EN YUCATÁN”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.E.R. ALEJANDRO TONATIUH CASILLAS REYES

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ENERGÍAS RENOVABLES

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2024

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen Profesional y hubiere sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores de tesis, Dr. Ali Bassam y Dra. Amina El Mekaoui, por el apoyo, motivación y tiempo brindados para la realización de este documento de tesis. Por la confianza que tuvieron en mi para formar parte de un equipo de trabajo para el proyecto PRONACES 319191.

A los miembros de mi sínodo, por sus críticas constructivas y recomendaciones sobre este tema de investigación.

A mis compañeros de equipo de trabajo del proyecto PRONACES 319191, gente con mucha pasión y determinación.

A las comunidades mayas beneficiarias del proyecto PRONACES 319191: Ixil, Yaxunah, San José Tip-Ceh y Sotuta. Comunidades yucatecas de gente trabajadora, humilde y resiliente, que nos acobijaron con su hospitalidad y bondad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de posgrado

Dedico este trabajo a mi pareja, Patricia Yañez, por su motivación y paciencia incondicional durante el transcurso del posgrado; a mis padres y hermanos que siempre están orgullosos y pendientes de mis logros académicos, profesionales y personales.

RESUMEN

El presente trabajo se centró en un análisis operacional para la implementación de un bombeo solar fotovoltaico considerando un enfoque integral para el estado de Yucatán mediante la implementación de una metodología dividida en tres fases con la cual se obtuvo una perspectiva y problemática real de la comunidad, así como el análisis del sistema con los mejores indicadores de factibilidad tecno-económica. En la primera fase se implementó una encuesta de conocimientos, actitudes y prácticas (encuesta CAP) con dos secciones, la primera sección se divide en dos ejes orientados a la situación socio-económica y socio-demográfico de la comunidad, y la segunda sección se divide en cuatro ejes orientados a conceptos del medio ambiente, cambio climático, recursos naturales y energías renovables, como resultado se obtuvo una cartografía energética que describe la situación de comunidad, así como las estrategias que se tomaron para fomentar la aceptación social. De acuerdo con la cartografía energética, se identificó la necesidad de un sistema de bombeo solar fotovoltaico (BSF) para impulsar sus actividades económicas. En la segunda fase, se propuso la evaluación de dos sistemas de bombeo solar fotovoltaico, un sistema convencional y otro sistema implementando un Variador de Frecuencia (VFD), dispositivo que permite realizar arranques con rampas de aceleración que disminuyen picos de potencia. Dichas tecnologías fueron evaluadas mediante el software de optimización híbrida de recursos energéticos múltiples (HOMER) para la optimización de los cinco diferentes escenarios propuestos, con el fin de obtener el escenario y tecnología con mejor factibilidad tecno-económica considerando los siguientes criterios: energético, económico y ambiental. Como última fase, se implementaron acciones para fomentar la aceptación social y la implementación participativa de la comunidad hacia el proyecto de bombeo solar propuesto. Tal como los talleres de capacitación para la tecnología propuesta, la edición de manuales de operación y mantenimiento con lenguaje y diseños simples, estas acciones son propuestas desde un enfoque de acompañamiento para así garantizar la sustentabilidad del proyecto y durabilidad.

ABSTRACT

The present work focused on an operational analysis for the implementation of a photovoltaic solar pump considering a comprehensive approach for the state of Yucatán through the implementation of a methodology divided into three phases with which a real perspective and problems of the community were obtained. as well as the analysis of the system with the best indicators of techno-economic feasibility. In the first phase, a survey of knowledge, attitudes and practices (KAP survey,) was implemented with two sections, the first section is divided into two axes oriented to the socio-economic and socio-demographic situation of the community, and the second section is divided into four axes oriented to concepts of the environment, climate change, natural resources and renewable energies, as a result an energy cartography was obtained that describes the community situation, as well as the strategies that were taken to promote social acceptance. According to the energy mapping, the need for a solar photovoltaic water pumping system (SPVWPS) was identified to boost its economic activities. In the second phase, the evaluation of two photovoltaic solar pumping systems was proposed, a conventional system and another system implementing a Variable Frequency Drive (VFD), a device that allows starting with acceleration ramps that reduce power peaks. These technologies were evaluated using the hybrid optimization of multiple energy resources (HOMER) software for the optimization of the five different proposed scenarios, to obtain the scenario and technology with the best techno-economic feasibility considering the following criteria: energy, economic and environmental. As the last phase, actions were implemented to foster social acceptance and participatory community implementation towards the proposed solar pumping project. Such as training workshops for the proposed technology, the edition of operation and maintenance manuals with simple language and designs, these actions are proposed from a support approach to guarantee the sustainability of the project and durability.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE FÍGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	3
Planteamiento del problema.....	8
Objetivo general	11
Objetivos específicos.....	11
Marco metodológico	12
CAPITULO 1	14
1 SISTEMAS HIBRÍDOS DE ENERGÍAS RENOVABLES	14
1.1 Bombeo solar fotovoltaico (BSF)	16
1.2 Componentes del BSF	17
1.3 Clasificación del BSF.....	18
1.4 Avances tecnológicos del BSF	19
CAPITULO 2	22
2 DIAGNÓSTICO DE LA COMUNIDAD	22
2.1 Información de la comunidad	22
2.2 Diseño de encuesta CAP	23
2.2.1 Muestra mínima	25
2.2.2 Cálculo de la muestra mínima.....	26
2.2.3 Selección de viviendas a nivel manzana.....	27
2.2.4 Selección de viviendas de estudio	27
2.3 Análisis de encuesta CAP	28
2.3.1 Situación sociodemográfica	28

2.3.2	Situación socioeconómica.....	31
2.3.3	CAP Medio ambiente y comunidad	33
2.3.4	CAP Cambio climático	34
2.3.5	CAP Recursos naturales.....	36
2.3.6	CAP Energía renovables.....	37
2.4	Cartografía energética.....	41
CAPITULO 3.....		44
3 DIMENSIONAMIENTO TÉCNICO		44
3.1	Levantamiento en sitio.....	44
3.2	Evaluación de escenarios de bombeo	45
3.3	Aplicación metodológica.....	51
3.3.1	Indicadores energéticos	51
3.3.2	Indicador ambiental.....	52
3.3.3	Indicadores económicos	52
3.4	Análisis de resultados.....	53
3.4.1	Resultados de la comparación de los indicadores energéticos	54
3.4.2	Resultados de la comparación del indicador ambiental.....	55
3.4.3	Resultados de la comparación de los indicadores económicos.....	56
CAPITULO 4.....		58
4 ACEPTACIÓN SOCIAL.....		58
4.1	Talleres de capacitación.....	58
4.2	Encuesta de satisfacción social.....	59
4.2.1	Horarios de operación.....	60
4.2.2	Actividades donde se utiliza el BSF	60
4.2.3	Expectativas del sistema BSF.....	60
4.2.4	Limitaciones del sistema	61
4.2.5	Complejidad de operación del sistema BSF.....	62
4.2.6	Ahorro económico mensual	62
4.2.7	Recomendación del sistema y participación en futuros proyectos sobre energías renovables.....	63
4.2.8	Comentarios u observaciones.....	64
4.3	Áreas de oportunidad	64
4.3.1	Corto periodo de operación.....	64

4.3.2	Factor de seguridad	65
4.3.3	Alto costos de los sistemas.....	65
CONCLUSIONES		66
RECOMENDACIONES Y TRABAJOS A FUTURO.....		68
REFERENCIAS.....		69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1. Las tres dimensiones de aceptación social para la innovación de las energías renovables (Harrouz et al., 2020).....	6
Figura. 2. Marco para empoderar el contexto sociocultural local para una transición energética equitativa (El Mekaoui et al., 2020).....	7
Figura. 3. Marco Metodológico para la implementación de un bombeo solar fotovoltaico desde un enfoque integral.....	13
Figura. 4. Esquema básico de un bombeo solar acoplado con baterías y bomba sumergible.....	17
Figura. 5. Clasificación de algoritmos MPPT para BSF.....	21
Figura. 6. Ubicación geográfica de la comunidad de Ixil en Yucatán, México (INEGI, 2024).....	23
Figura. 7. Ejemplo de muestra mínima.....	25
Figura. 8. Mapa de distribución de la aplicación de encuestas CAP en la comunidad de Ixil, Yucatán.....	28
Figura. 9. Número de habitantes por familia.....	29
Figura. 10. Género de cada integrante de la familia.....	29
Figura. 11. Rango de edad de cada miembro de la familia.....	30
Figura. 12. Escolaridad de cada miembro de la familia.....	30
Figura. 13. Actividad laboral principal de cada miembro de la familia.....	31
Figura. 14. Gasto mensual promedio por familia.....	32
Figura. 15. Gasto bimestral promedio por el consumo eléctrico.....	32
Figura. 16. Fuente principal para el consumo de agua.....	33
Figura. 17. Actividades más frecuentes relacionados al uso del agua.....	33

Figura. 18. Preocupación sobre la falta de agua en el futuro.	34
Figura. 19. Impactos ambientales en su comunidad.	34
Figura. 20. Cambios en el medio ambiente en los últimos años.	35
Figura. 21. Principales recursos de la comunidad.	36
Figura. 22. Perspectiva de la escasez de recurso en la comunidad.	36
Figura. 23. Conocimiento de las energías renovables.	37
Figura. 24. Conocimiento de los tipos de energía renovable.	38
Figura. 25. Uso de fuentes naturales para producir energía.	38
Figura. 26. Uso de fuentes renovables como una solución al ahorro energético y económico.	39
Figura. 27. Disponibilidad de fuentes de energía renovable en la comunidad.	39
Figura. 28. Aceptación del uso de paneles solares.	40
Figura. 29. Preocupación por la falta de energía en el futuro.	40
Figura. 30. Cartografía energética de la comunidad de Ixil.	41
Figura. 31. Comunidad de Ixil y ubicación de sistemas de bombeo solar instalados.	45
Figura. 32. Diagrama esquemático de la metodología empleada para el dimensionado del BSF propuesto y el cálculo de los indicadores.	46
Figura. 33. Perfiles de consumos energéticos del sistema de bombeo del presente estudio para dos diferentes casos.	47
Figura. 34. Gráficas de los resultados de los indicadores energéticos obtenidos para cinco escenarios de los dos diferentes casos de BFS: (a) fracción renovable y (b) energía generada por el generador auxiliar.	54
Figura. 35. Gráfica de los resultados correspondientes al indicador ambiental obtenidos para cinco escenarios de los dos diferentes casos de BSF.	55

Figura. 36. Gráficas de los resultados de los indicadores económicos obtenidos para cinco escenarios de los dos diferentes casos de BSF: (a) costo presente neto y (b) costo nivelado de energía.	56
Figura. 37. Taller de presentación de propuesta.	59
Figura. 38. Taller de capacitación para la operación del sistema BSF.	59
Figura. 39. Actividades donde se utiliza el BSF.	60
Figura. 40. Expectativas sobre el sistema BSF.	61
Figura. 41. Limitaciones del sistema.	61
Figura. 42. Nivel de complejidad de operación del BSF.	62
Figura. 43. Ahorro económico mensual.	62
Figura. 44. Recomendación del sistema.	63
Figura. 45. Futura participación en proyectos sobre energías renovables.	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes de bombeo solar fotovoltaico.....	4
Tabla 2. Clasificación de sistemas de bombeo solar fotovoltaico (Sontake & Kalamkar, 2016).....	18
Tabla 3. Descripción de los objetivos de las secciones incluidas en la encuesta CAP.	24
Tabla 4. Características tecno-económicas del bombeo solar fotovoltaico convencional para una proyección de 20 años.	49
Tabla 5. Características tecno-económicas del bombeo solar fotovoltaico con variador de frecuencia para una proyección de 20 años.....	50

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el reporte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), donde se observan serios cambios en el clima de la tierra en todas las regiones. Muchos de estos cambios no tienen precedentes en miles de años y algunos de estos cambios ya se están produciendo, como el aumento continuo del nivel del mar y el calentamiento global acelerado. En el informe presentado en Ginebra, se plantean estimaciones sobre las posibilidades de sobrepasar el nivel de calentamiento global de 1.5 °C en las próximas décadas, y se concluye que, al menos que las emisiones de gases de efecto invernadero se reduzcan de manera inmediata, rápida y a gran escala, mantener el calentamiento cerca de 1.5 °C o incluso a 2 °C será un objetivo imposible (IPCC, 2021).

En el 2015, México asumió su responsabilidad global con un compromiso sólido de reducción de gases de efecto invernadero con el fin de llevar a cabo el acuerdo bajo la Convención del Cambio Climático, que se adoptó en la COP de París 2015. Las características geográficas de México y las condiciones sociales desfavorables que viven algunos sectores de su población lo hacen un país altamente vulnerable a los efectos adversos del cambio climático. En poco más de 100 años las temperaturas superficiales terrestres y marinas se han incrementado en todo el territorio (Gobierno de México, 2015). Entre uno de los objetivos de la Organización de las Naciones Unidas es el agua limpia y saneamiento, sin embargo, el ritmo anual del 1% de crecimiento del uso de agua y su escasez debida al cambio climático aumentarán la dependencia de las aguas subterráneas, que constituyen el 99% del agua dulce de la Tierra. También se menciona que “Las aguas subterráneas pueden proporcionar a las sociedades beneficios sociales, económicos y medioambientales, entre los que se cuenta la adaptación al cambio” (Naciones Unidas, 2022).

Actualmente, las aguas subterráneas aportan la mitad del volumen de agua extraída para uso doméstico por la población mundial y alrededor del 25% es para el riego, con el 38% para las tierras de regadío del planeta. Con respecto a América Latina y el

Caribe, las aguas subterráneas desempeñan un papel importante en los sistemas de abastecimiento hídrico en la mayoría de las ciudades de América Latina, aunque no siempre son la principal fuente de abastecimiento. También representan el 50% del agua utilizada por el sector industrial, por lo que, es necesario que los países se comprometan a desarrollar un marco adecuado y eficaz de gobernanza de las aguas subterráneas (Connor & Miletto, 2022).

En el estado de Yucatán, México, cuenta con un acuífero de gran extensión territorial y una profundidad de 100 metros, esto favorece al acceso relativamente simple al agua. Las zonas cercanas a la costa, el nivel del agua en el acuífero puede estar entre 8 a 9 metros de profundidad, mientras que, en las zonas del sur del estado, el agua puede estar entre 90 a 100 metros de profundidad. El estado de Yucatán también cuenta con un vasto recurso solar y eólico, lo que ha generado que sea un potencial estado de inversión para los megaproyectos sobre energías renovables. Sin embargo, existen casos de resistencia y oposición por parte de las comunidades al momento de realizar dichos proyectos por lo que es necesario la implementación de metodologías de dimensionamiento que tomen en cuenta el factor social para generar una aceptación.

Este tema de investigación estuvo vinculado con el proyecto PRONACES 319191: Comunidades Mayas Sustentables de la convocatoria FOP04-2020-01: “Para la elaboración de propuestas de proyectos de investigación e incidencia para transitar a un sistema energético social y ambientalmente sustentable”. En el cual se propuso una metodología integral dividida en tres fases: Diagnostico de la comunidad, Dimensionamiento técnico y Aceptación social.

Antecedentes

La energía solar fotovoltaica en México ha tenido aceptación y crecimiento considerable a nivel residencial, comercial e industrial en estos últimos años. Para el año 2020, México reportó una capacidad instalada de 5,630 MW de generación fotovoltaica (IRENA, 2021). Siendo esta una tecnología que ha generado confianza en su implementación en proyectos como una solución para la electrificación rural para comunidades fuera de la red. El marco jurídico y política de la actual administración, ubica la ejecución de la electrificación de comunidades rurales y zonas marginadas en las instituciones del sector del gobierno federal. El Programa Sectorial de Energía 2020 – 2024 (PROSENER) tiene como objetivo el disminuir la pobreza energética de la población con rezago social y económico, y promover la integración de poblaciones y comunidades en los proyectos del sector energético (INECC, 2021).

El concepto de pobreza energética nació en 1991, este concepto define la situación que viven algunos hogares en los países desarrollados cuyo bienestar es condicionado por un consumo bajo de energía debido a diversas razones, sean económicas o incluso medio ambientales, tanto del propio hogar como del entorno sociopolítico (Mas Consulting, 2014).

La transición energética se define como el conjunto de cambios en los modelos de producción, distribución y consumo de energía para hacerlos más sostenibles. El objetivo es transformar un sistema energético basado en los combustibles fósiles en un sistema de energético basado en las energías renovables.

World Energy Council (WEC) define la sostenibilidad energética como el equilibrio entre tres dimensiones principales: la seguridad energética, la sostenibilidad ambiental y la equidad social. En otras palabras, se trata de llevar el concepto de equilibrio sostenible entre las dimensiones económica, social y ambiental, al plano energético, reconociendo que la energía es clave y básica para el desarrollo de cualquier sociedad. La seguridad energética aborda una gestión efectiva y fiable de los recursos energéticos locales y externos; la equidad social procura que la energía sea accesible

y asequible para toda la población; y la sostenibilidad ambiental requiere la mitigación de los impactos negativos por medio del desarrollo de fuentes de energía limpias y bajas en emisiones de carbono (WEC, 2020).

Los sistemas de bombeo solar fotovoltaico representan una alternativa ideal para comunidades rurales con pobreza energética, generando una solución y transición energética de los sistemas de bombeo de agua basados en electricidad y Diesel. Estos sistemas han sido un campo de investigación prometedor desde los últimos 50 años. Estos sistemas abarcan diferentes áreas de la ingeniería, como la eléctrica, mecánica, electrónica, civil y computacional. Todas estas disciplinas impulsan a desarrollar sistemas óptimos y eficientes para satisfacer la demanda de agua del sector doméstico, industrial y agropecuario. En la Tabla 1, se presentan algunos casos de estudio de investigación y proyectos realizados sobre los sistemas de bombeo solar fotovoltaico.

Tabla 1. Antecedentes de bombeo solar fotovoltaico.

Año	Ubicación	Tipo de proyecto	Tipo de sistema	Comentarios
2013	Área Tepus / Indonesia	Estudio técnico experimental	Arreglo de 32 paneles (8s x 4p) con potencia de 3.2kW, con 2 bombas sumergibles con capacidad de 250 metros de carga dinámica (Setiawan et al., 2014).	El sistema fue capaz de distribuir agua hasta una distancia horizontal de 1,400 metros con una altura de 218.34 metros. Con un caudal de 0.4 – 0.9 LPS

2015	India	Estudio técnico experimental	Arreglo de 18 paneles de Cd-Te (9s x 2p) con potencia de 2.7kW, con variador de frecuencia DC/DC, Inversor, controlador de seguimiento de máximo punto de potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) experimental, y bomba sumergible trifásica de 2 HP (Korpale et al., 2016).	El sistema tubo un caudal de 1.15 LPS en la intensidad solar máxima. Con una eficiencia de 39% incorporando el sistema MPPT.
2016	Sonora, México	Operacional	Sistema de bombeo solar para efluentes de aguas residuales con interconexión a la red eléctrica, 3,920 paneles solares, cubren el 100% del consumo (CONAGUA, 2016)	La planta genera un promedio de 232 litros por segundo. Participación de CONAGUA y la agencia de protección ambiental de EUA.
2019	Oyo, Nigeria	Estudio técnico experimental	Arreglo de 2 paneles en serie, controlador modulador de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), banco de baterías y bomba de corriente directa (Bright Samson, 2019).	El sistema mantiene un caudal constante de 0.5 LPS entre un horario de 1 pm a 4 pm, realizan un análisis comparativo de solar, eléctrico y bombas a combustible.
2020	Yucatán, México	Operacional	Arreglo de 12 paneles (6s x 2p) con potencia de 3.24 kW, Variador de frecuencia y bomba sumergible de 3 HP.	Proyectos de riego solar de microaspersión área con un caudal de 120 LPM. Programa Sembrando Vida.
2021	Yucatán, México	Operacional	Suministro de instalación de sistema fotovoltaico con 64 paneles de 380 watts, equipo de bombeo de 20 HP con un gasto de 30.38 LPS	Comité técnico de fideicomiso fondo de fomento agropecuario del Estado de Yucatán. CONAGUA.

Además de los avances técnicos, también es importante el obtener una aceptación social relacionada con los proyectos renovables. Harrouz et al. (2020) realizaron un estudio que tuvo como objetivo presentar la aceptación social de un sistema de energía basado en energías renovables en la región de Adrar. El consideró que se deben atacar tres ejes principales para poder lograr una aceptación social de las energías renovables, Figura. 1.

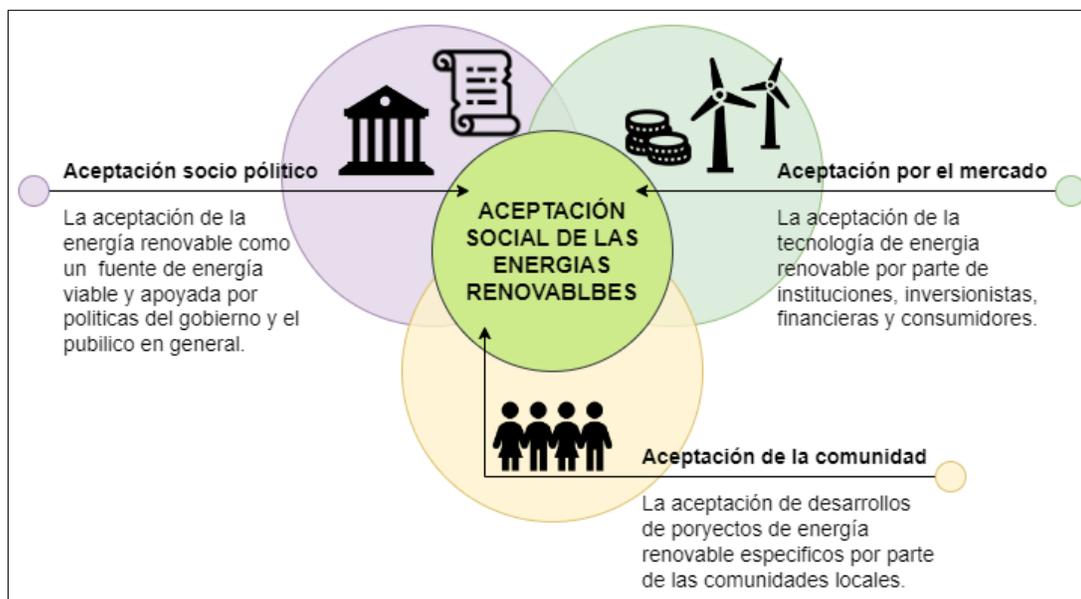


Figura. 1. Las tres dimensiones de aceptación social para la innovación de las energías renovables (Harrouz et al., 2020).

A pesar de que Argelia está clasificado como el segundo país con mayor capacidad de Energía Renovable instalada en el continente de África, hay un porcentaje negativo del 70% acerca del conocimiento de las Energías Renovables y su uso en la región.

El desarrollo sostenible es una combinación integrada de actores energéticos, económicos, sociales, ambientales y gubernamentales, lo que lo convierte en uno de los objetivos más desafiantes y subjetivos de las Naciones Unidas. Un proyecto de sustentabilidad que no considere ninguno de estos parámetros puede generar resistencia entre los diferentes actores de la sociedad.

De igual manera, se presentó un estudio de caso esclarecedor del desarrollo solar en el estado de Yucatán en México, para mostrar que el diagrama tradicional de tres ejes del desarrollo sostenible no logra acomodar las relaciones de poder locales y su papel en la toma de decisiones energéticas. Al final se recomienda un marco para empoderar los contextos socioculturales locales para una transición energética equitativa, Figura. 2.

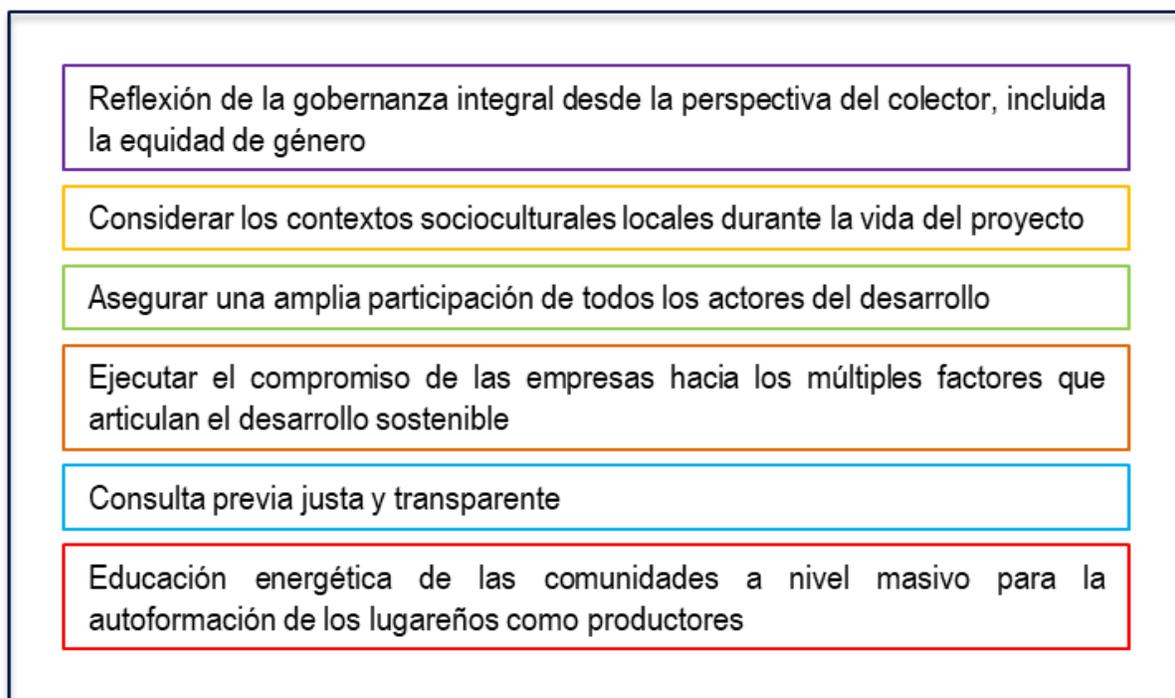


Figura. 2. Marco para empoderar el contexto sociocultural local para una transición energética equitativa (El Mekaoui et al., 2020).

Planteamiento del problema

Desde la época de la revolución industrial, la comunidad rural ha estado marginada en cuanto a la creación de riqueza, sufriendo carencia de infraestructuras energéticas, industriales y de transporte. Sin embargo, los cambios tecnológicos y sociales que se están produciendo a nivel global pueden dotar al medio rural de mejores posibilidades y un protagonismo muy especial. Por una parte, en él se encuentran las áreas naturales y seminaturales las cuales se tienen que garantizar el menor impacto ambiental. Por otra parte, allí se dispone de un acceso privilegiado a las fuentes de energía renovable, como la solar, eólica, hidráulica, biomasa y otras. Las nuevas tecnologías de generación in situ a media y pequeña escala permiten evitar la dependencia de un suministro energético, que hasta ahora ha sido de alto impacto ambiental y muy costoso. Se abren nuevas y rentables posibilidades de acceder a la energía en el medio rural. De esta forma, se obtendrá un impacto muy positivo en las actividades económicas y la calidad de vida de la población. Sin embargo, las comunidades rurales oponen una resistencia a los proyectos renovables, debido a que, muchos de estos proyectos no consideran el impacto social y las comunidades se sienten utilizadas (El Mekaoui et al., 2020).

Para la primera década del siglo XXI, la cobertura eléctrica nacional llegó al 96.6 % en México, sin embargo, suministrar energía eléctrica a alrededor de 3.5 millones de personas que aún no tenían acceso, el 60 % de las cuales pertenecen a comunidades indígenas, parecía una tarea particularmente difícil. Esto se debía a que la mayor parte de estas personas vive en comunidades pequeñas en lugares alejados que enfrentan otras dificultades graves, entre ellas la falta de servicios e infraestructura básica como caminos, agua, telecomunicaciones, escuelas y atención a la salud. El Gobierno reconoció que, debido al crecimiento demográfico, la cantidad de personas sin acceso a electricidad aumentaría en un 20 % en los siguientes 10 años, transformándose en una cuestión urgente (Banco Mundial, 2017). La base de datos que fue proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), contiene datos demográficos y geográficos de 4,722

comunidades en 27 estados de la república que no cuentan con servicio de energía eléctrica y que están alejados de las redes de distribución. La distancia promedio a la red eléctrica es de 63.8 km y la media de 59.2 km (INECC, 2021), lo que ocasiona la necesidad de utilizar generadores eléctricos como principal fuente de energía, sin embargo, conlleva al consumo de fuentes fósiles y emisión de agentes contaminantes.

Una propuesta atractiva es la implementación de las energías renovables como la energía eólica y solar, debido a su madurez como tecnología renovable y sus antecedentes de implementación en otros lugares. Sin embargo, se ha visto que la implementación de estas tecnologías en el área rural de Yucatán tiene un grado de negación por parte de las comunidades. Tal es el caso en Muna, Yucatán, donde organizaciones civiles y voceros de comunidades mayas denunciaron en rueda de prensa y en el marco de un foro la expansión de megaproyectos solares en la Península, “que arrasan con las tierras de comunidades y pueblos mayas”, donde el representante manifestó: “El problema en Yucatán con estos proyectos es que existe una carencia de información enorme, lo único que se sabe siempre es lo que se conoce como los supuestos beneficios económicos, pero no los problemas que se puedan generar” (Diario de Yucatán, 2019). También se argumentó que “Los proyectos eólicos y fotovoltaicos están generando un incremento en la violencia, pobreza, ruptura del tejido social, cultural y familiar en las comunidades. También están generando especulación con las tierras, despojos con amenazas y violencia” (Articulación Yucatán, 2019).

Por otra parte, a pesar de que existan apoyos gubernamentales para proyectos sociales, el no considerar una metodología desde un enfoque social adecuada ocasiona que la mayor parte de estos proyectos terminen abandonados. Tal es el caso en el estado de Quintana Roo, en donde José Delgado González, presidente de productores de calabaza, informó que en la ribera del río Hondo hay por lo menos 10 invernaderos que permanecen en el abandono, lo que provoca que no haya perecederos para abastecer la demanda local y sobre todo, que lleguen más baratos a la mesa del consumidor (Castillo, 2021).

El propósito del presente trabajo consiste en desarrollar un dimensionamiento de un sistema de bombeo solar fotovoltaico, en combinación con diferentes fuentes y tecnologías renovables, para evaluar el mejor escenario mediante indicadores energético, económico y ambiental, considerando un enfoque social, con el motivo de obtener el escenario con la mejor factibilidad técnica-económica posible, y fomentar la aceptación social mediante la participación de la comunidad beneficiaria.

Objetivo general

Desarrollar una metodología integral para la implementación de un sistema de bombeo solar, considerando aspectos técnicos y sociales para una comunidad rural en el estado de Yucatán.

Objetivos específicos

- Obtener una cartografía energética mediante el diagnóstico de la comunidad considerando indicadores sociales, económicos, ambientales.
- Diseñar un sistema de bombeo solar considerando diferentes escenarios de implementación para la mejor factibilidad técnica-económica posible.
- Fomentar la aceptación social y la implementación participativa de la comunidad hacia el proyecto, mediante talleres y manuales de capacitación sobre la operación y mantenimiento del sistema.

Marco metodológico

Se propuso una metodología integral, es decir que incluye aspecto ambiental, económico y social, la cual se dividió en tres fases:

Fase 1: Diagnóstico de la comunidad. Se identificaron las variables directas e indirectas mediante la implementación de una encuesta CAP a la comunidad, considerando aspectos sociales, económicos, ambientales y culturales sobre los conocimientos energéticos y como resultado se obtuvo una cartografía energética y una problemática real vista por la comunidad.

Fase 2: Dimensionamiento técnico. Con base a la cartografía energética se propuso la evaluación de dos sistemas de bombeo solar fotovoltaico, uno convencional y el otro con variador de frecuencia con el fin evaluar su desempeño. A su vez dichas tecnologías fueron evaluadas en diferentes escenarios utilizando el software de optimización híbrida de recursos, HOMER, con el fin de realizar un análisis de factibilidad tecno-económica considerando los siguientes criterios: energético, económico y ambiental.

Fase 3: Aceptación social. Con base a la cartografía energética se implementaron acciones para fomentar la aceptación social y la implementación participativa de la comunidad hacia el proyecto de bombeo solar propuesto. Tales como talleres de capacitación hacia tecnología propuesta, la edición de manuales de operación y mantenimiento con lenguaje y diseños simples, estas acciones fueron propuestas desde un enfoque de acompañamiento para así garantizar la sustentabilidad del proyecto y durabilidad.

Se presenta un esquema de las fases correspondientes de la metodología a emplear y se explica detalladamente en que consiste cada fase, ver Figura. 3.

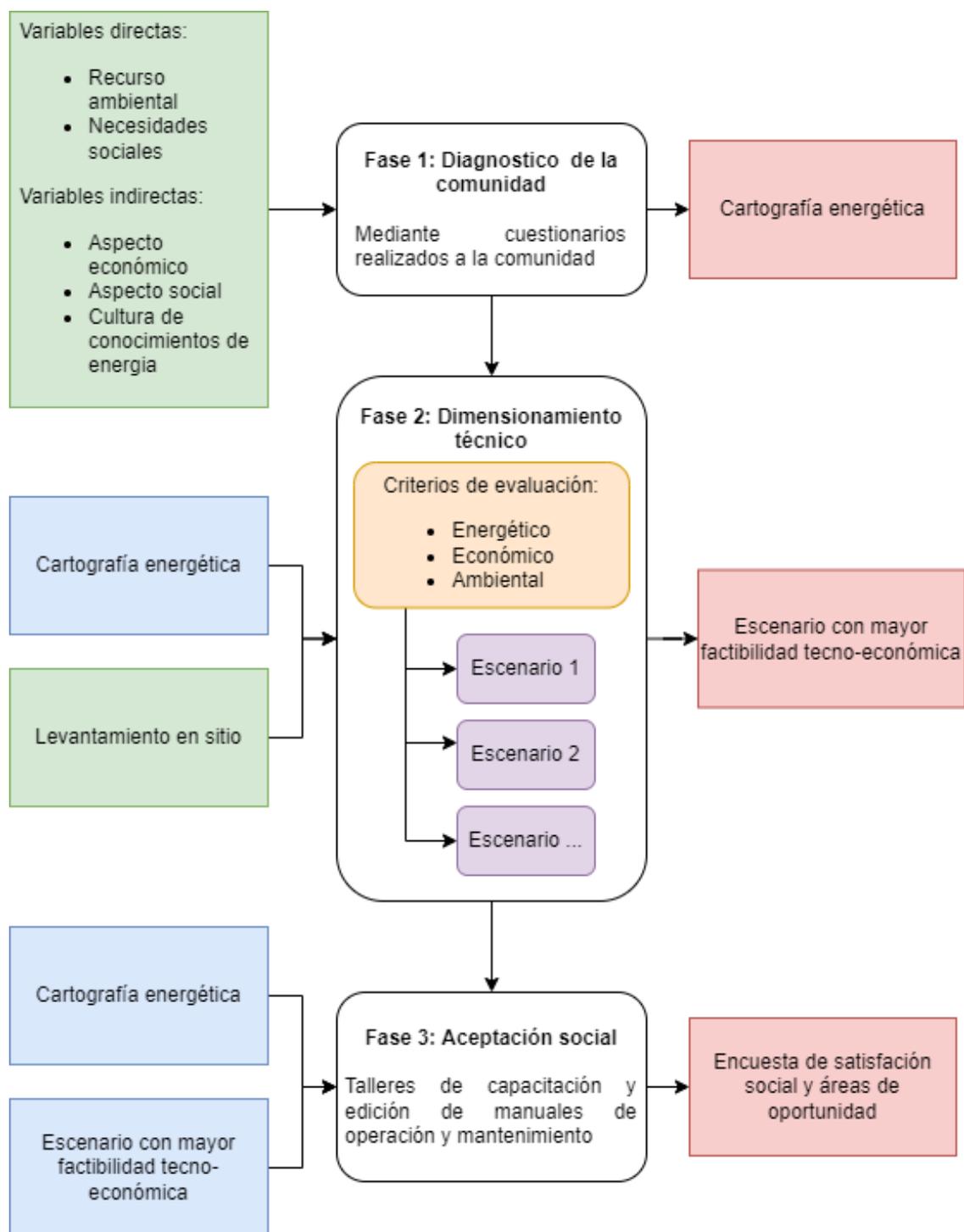


Figura. 3. Marco Metodológico para la implementación de un bombeo solar fotovoltaico desde un enfoque integral

CAPITULO 1

1 SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGÍAS RENOVABLES

La energía solar y eólica representan dos de las fuentes más prominentes para la generación de energía no convencional, o energía renovable (Noorollahi et al., 2021; Temiz & Dincer, 2021). Por esta razón, actualmente el uso de la combinación de diferentes fuentes de energía renovable se ha popularizado debido a su naturaleza modular y al ser amigable con el medio ambiente (Agyekum et al., 2020). Sin embargo, hay que considerar que las energías renovables son intermitentes, de manera que se debe contemplar un sistema de almacenamiento o un sistema de respaldo auxiliar (Udeh et al., 2022). Un ejemplo de ello son las baterías y los sistemas de generación convencional, los cuales pueden ser utilizados conectados a la red o aislados (Raghuwanshi & Arya, 2020), y se denominan Sistemas Híbridos de Energía Renovable (SHER) (Ben Ali et al., 2020).

Existen diferentes tipos de sistemas híbridos de energía tales como el compuesto por un sistema eólico-solar, solar-diésel, eólico-hidro, eólico-diésel, o cualquier combinación de estos considerando otro tipo de fuentes de energía renovable, como biomasa, biocombustibles, entre otros (Jahangir & Cheraghi, 2020). El diseño de un sistema o la elección de las fuentes de energía depende de varias consideraciones. Los factores que afectan la elección de la tecnología de energía híbrida también indican las ventajas o desventajas del uso de un SHER, principalmente factores energéticos, ambientales y económicos. En la literatura existen diferentes trabajos que reportan estudios sobre sistemas híbridos y además obtienen resultados optimizados. Uno de ellos es reportado por (Sreeraj et al., 2010) que propusieron un método que se basa en el enfoque del espacio de diseño y se puede utilizar para determinar las condiciones para las cuales la hibridación del sistema es rentable. El método propuesto

se implementó para diseñar un sistema de energía aislado para una aldea india que utiliza el sistema de batería solar fotovoltaica-eólica. Los resultados reportaron que el costo de la energía de un sistema fotovoltaico/batería fue de \$ 0.38 USD/kWh y lo mismo para el sistema de batería eólica fue de 0.24 USD/kWh. El sistema de generación de energía eólica es una fuente barata de energía eléctrica en comparación con la energía solar fotovoltaica, pero la variabilidad de la energía disponible del viento es mayor que la energía solar fotovoltaica. Otro estudio fue llevado a cabo por (Saiprasad et al., 2018) donde presentan un sistema híbrido que comprende un sistema fotovoltaico y eólico conectado a la red, considerando baterías como sistema de almacenamiento para la interconexión a una comunidad llamada Aralvaimozhi, India. Además, los autores emplearon HOMER y iHOGA como softwares de optimización del SHER. Los resultados indicaron valores optimizados de Costo Presente Neto (CPN) igual a \$ 51290 USD y un Costo de Energía (COE, por sus siglas en inglés) de 0.068 \$ USD/kWh. (Harajli et al., 2020) presentaron un estudio de un sistema híbrido solar fotovoltaico/diésel para evaluar el desempeño energético, ambiental, financiero y económico utilizando datos e información recopilados de los palestinos, libaneses, y los sectores comerciales y/o industriales iraquíes. Los resultados demostraron que los sistemas híbridos fotovoltaicos/diésel tienen un desempeño energético, ambiental y económico muy beneficioso en los tres países, mientras que su desempeño financiero también es positivo para Palestina y el Líbano. Finalmente, un estudio más reciente fue desarrollado por (Sharma et al., 2021) los cuales propusieron un plan de energía sostenible para la utilización óptima de los recursos de energía eléctrica disponibles para un pueblo con deficiencia energética. El pueblo elegido fue Nangal, cerca de Barnala, Punjab, India. Se propuso un SHER cuyo desempeño se evaluó mediante la implementación del software de modelo híbrido de optimización (HOMER). Los hallazgos revelaron que el costo de energía calculado y el costo presente neto total fueron \$ 0.032/kWh y \$ 76,837 USD, respectivamente, mediante la evaluación paramétrica del sistema SHER propuesto. Se prevé que el modelo propuesto pueda ser una hoja de ruta para futuros ingenieros de investigación en el diseño de una utilización de energía eficaz para las aldeas.

1.1 Bombeo solar fotovoltaico (BSF)

El agua limpia y saneamiento es el sexto objetivo de la ONU para poder alcanzar un futuro sostenible para todos. Siendo este recurso necesario para la sobrevivencia, desde un nivel de uso doméstico hasta gran escala para sistemas de riego, construcción y producción de energía. La calidad de vida en cualquier comunidad depende de la cantidad y calidad del recurso de agua disponible. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), una persona requiere de 100 litros de agua al día para satisfacer sus necesidades, tanto de consumo como de higiene (CONANP, 2019).

Un sistema de Bombeo Solar Fotovoltaico (BSF) es una alternativa renovable ideal, basada del sistema tradicional de bombeo por combustibles fósiles, para la extracción y distribución del agua para zonas donde no se cuente con red de distribución eléctrica. Ha sido un campo de estudio prometedor por los últimos 50 años. En la década de 1970, se hicieron esfuerzos para realizar la exploración y estudio de la factibilidad económica y la practicidad del BSF (Aliyu et al., 2018).

En los últimos años se han propuesto diferentes tipos de sistemas de bombeo solar fotovoltaico, estos diseños dependen del tipo de necesidad que se requiera y la inversión con la que se dispone, cada tipo de sistema presenta tanto ventajas como desventajas. La clasificación de los sistemas de bombeo solar fotovoltaico depende de los componentes de los que se conforman, sin embargo, los principales componentes son los módulos fotovoltaicos, el controlador de carga, banco de baterías, inversor de corriente y equipo de bombeo. Entre las ventajas del BSF, se incluye los bajos costos de operación y mantenimiento, fácil instalación, larga vida útil, libre de contaminantes, mayor eficiencia y algunos sistemas tienen la capacidad de iniciar y parar de manera automática. Estos sistemas pueden ser empleados tanto para uso doméstico como para sistemas de riego a gran escala (Bright Samson, 2019).

1.2 Componentes del BSF

Los principales componentes del BSF se muestran en la Figura. 4 y se describen a continuación (Li et al., 2017):

- Módulos fotovoltaicos: son los encargados de coleccionar la energía solar para ser aprovechado como energía eléctrica.
- Controlador de carga: dispositivo encargado de regular el voltaje de los paneles a un voltaje constante para ser almacenado en las baterías o aprovechado para cargas en corriente continua.
- Banco de baterías: sistema de almacenamiento de energía eléctrica para disponer en condiciones de menor radiación solar.
- Inversor de corriente: dispositivo encargado de convertir la corriente directa en corriente alterna.
- Equipo de bombeo: equipo hidromecánico para la extracción y distribución del agua, ente pueden ser la bomba de superficie o la bomba sumergible.

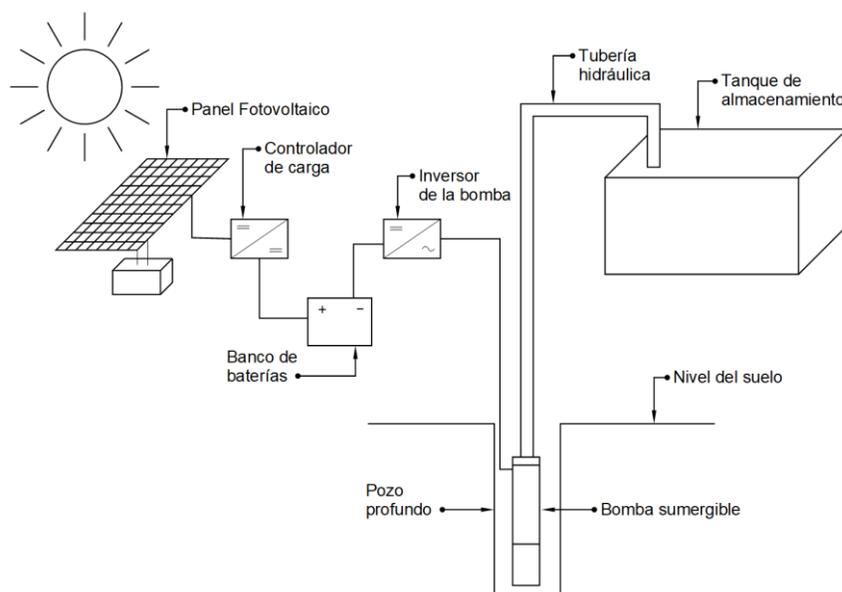


Figura. 4. Esquema básico de un bombeo solar acoplado con baterías y bomba sumergible.

1.3 Clasificación del BSF

En los últimos años se han propuesto diferentes tipos de sistemas de bombeo solar fotovoltaico, estos diseños dependen del tipo de necesidad que se requiera y la inversión con la que se dispone, cada tipo de sistema presenta tanto ventajas como desventajas. La clasificación de los sistemas de bombeo solar fotovoltaico depende de los componentes de los que se conforman. En la Tabla 2 se presentan la descripción de cada categoría.

Tabla 2. Clasificación de sistemas de bombeo solar fotovoltaico (Sontake & Kalamkar, 2016).

Tipo de clasificación	Subgrupo	Descripción
Tipo de almacenamiento de energía	Acoplado a baterías	Sistema de bombeo solar fotovoltaico que cuenta con una batería o un banco de baterías para prolongar la duración del bombeo del agua. Este sistema asegura el bombeo durante periodos de radiación baja, días nublados y durante la noche. Sin embargo, el uso de esto incrementa el costo, complejidad y reduce la eficiencia global.
	Controlador directo	La energía generada por los paneles fotovoltaicos es directamente suministrada a la bomba, el sistema solo bombea agua durante el día cuando la energía solar está disponible. El flujo de agua depende de la cantidad de radiación incidente, por lo que es necesario contar con un tanque de almacenamiento agua.
Tipo de alimentación de la bomba	Bomba con motor DC	Existen dos tipos de motores DC, el motor convencional DC con escobillas y los motores sin escobillas. Entre los dos tipos, los motores sin escobillas son los preferidos por su bajo costo de mantenimiento, alta eficiencia, operación silenciosa, tamaño compacto y alta rentabilidad. Estos pueden trabajar acoplados a baterías o controlador directo.
	Bomba con motor AC	Las bombas con motor AC tienen que usar un inversor adecuado para poder convertir la corriente DC del panel a corriente AC para la bomba. La ventaja es que estos equipos pueden trabajar en conjunto con la red eléctrica

		de manera simultánea, al igual que es una tecnología con amplio mercado.
Tipo de bomba	Bomba de superficie	Las bombas de superficie pueden tener un motor de corriente DC o corriente AC. Son equipos económicos en comparación con una bomba sumergible, sin embargo, su capacidad de nivel de succión esta entre 6 a 8 metros de profundidad, lo cual lo hace ideal si el nivel del agua a bombear esta debajo de esas profundidades
	Bomba de pozo profundo	Esta es la bomba más común en implementar en los sistemas de bombeo solar, por su alta eficiencia y las distancias a las que se puede instalar para bombear, se consideran para pozos profundos de 3 hasta 10 pulgadas de diámetro.
Tipo de fuente de seguimiento y paneles fijos	Sistema con arreglos y paneles fijos	Son arreglos de paneles fotovoltaicos que están montadas en estructuras metálica fijadas a un ángulo de inclinación con el mejor valor de radiación promedio disponible. El costo de estas estructuras fijas es bajo comparado con un sistema de seguimiento solar.
	Sistema con seguimiento solar	Los sistemas de seguimiento solar buscan obtener el mejor ángulo de incidencia a lo largo del año. Ayudando que la bomba arranque temprano en la mañana y funcione eficiente hasta el final de la tarde, aumentando así la producción total del sistema de bombeo en casi un 25 a 50 %

1.4 Avances tecnológicos del BSF

Uno de los componentes más importantes del BSF es el inversor de corriente, en un principio este equipo solo se encargaba de convertir la corriente directa en corriente alterna para el funcionamiento de la bomba, sin embargo, con el paso del tiempo este equipo ha recibido grandes cambios tecnológicos debido a los avances en electrónica de potencia y control siendo ahora un controlador de potencia más complejo, teniendo la capacidad de administrar la potencia disponible y regular su salida para la operación de la bomba, permitiendo utilizar bombas de corriente directa o corriente alterna.

Debido a que las características fotovoltaicas son de naturaleza no lineal, el principal desafío es extraer la máxima cantidad de potencias en diferentes condiciones atmosféricas. Un controlador de potencia regula los niveles de voltaje y trabaja en coordinación con un algoritmo de control de seguimiento de punto máxima de potencia (MPPT, por sus siglas en inglés). Se han desarrollado diversos algoritmos MPPT y se pueden clasificar en términos generales en algoritmo convencional/tradicional y algoritmo evolutivo (Mao et al., 2020), Figura. 5. El algoritmo tradicional tiene la ventaja de que no utilizan cálculos complejos, por lo que son simples y fáciles de implementar, sin embargo, su rendimiento es limitado por la velocidad de seguimiento, las oscilaciones de estado estable y la configuración de la potencia pico local durante las condiciones de sombreado parcial. Debido a estas limitaciones, se aplican algoritmos evolutivos basados en principios inspirados en la naturaleza con características de convergencia rápida, capacidad para manejar sombreado parcial y alta eficiencia. Los algoritmos evolutivos se pueden subdividir en técnicas de inteligencia artificial (IA) y métodos bio-inspirados. La lógica difusa y la red neuronal artificial (RNA) que se incluyen en las técnicas de IA son populares, mientras que los métodos bio-inspirados como el algoritmo genético, optimización por enjambre de partículas, la evaluación diferencial, el algoritmo de búsqueda de colonias de abejas, la optimización de colonias de hormigas, el algoritmo de luciérnagas y la búsqueda aleatoria, etc. han evolucionado recientemente (Muralidhar & Rajasekar, 2021).

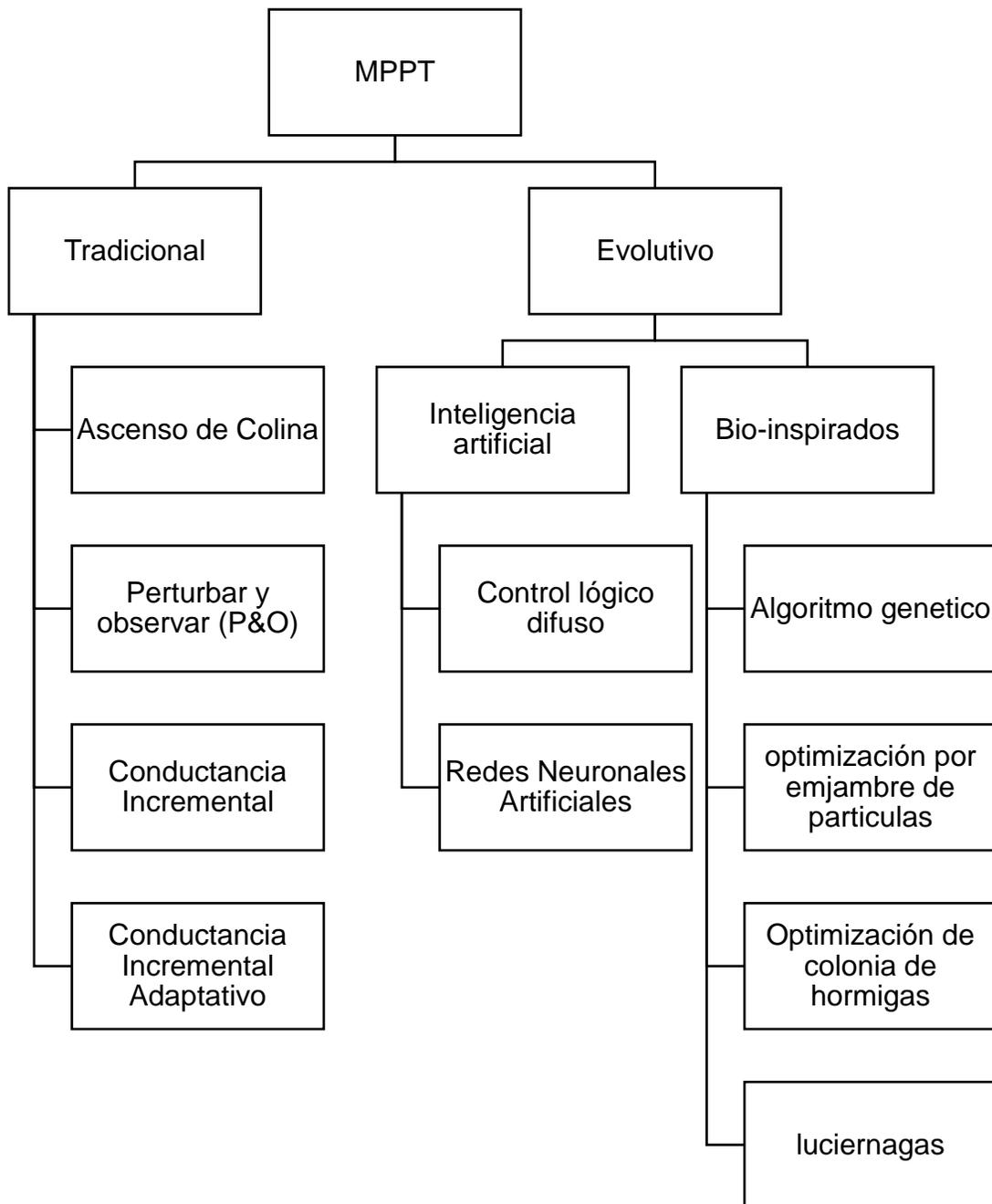


Figura. 5. Clasificación de algoritmos MPPT para BSF.

CAPITULO 2

2 DIAGNÓSTICO DE LA COMUNIDAD

Para garantizar la aprobación de conocimientos y prácticas es necesario el compromiso y participación de la comunidad. Durante el proceso se busca escuchar, dialogar, y tomar en cuenta las necesidades e intereses de los beneficiarios del proyecto. Para obtener esta información fue necesario desarrollar una encuesta de conocimientos, actitudes y prácticas (CAP), es un estudio cuantitativo de una población específica que reúne información sobre lo que la comunidad sabe, cómo se siente y cómo se comporta con relación a un tema concreto. El diseño de la encuesta CAP para este trabajo nos permite visualizar las condiciones sociales y económicas de desarrollo sostenible internas en la comunidad para posteriormente adaptar e integrar tecnologías de energías renovables a fin de aminorar impactos ambientales e impulsar la economía.

2.1 Información de la comunidad

El caso de estudio se enfoca en la comunidad de Ixil, uno de los 106 municipios de estado de Yucatán, México, con las coordenadas 21°09' Norte y 89°28' Este, aproximadamente a 45 km de la capital del estado de Yucatán (Gobierno del Estado de Yucatán, 2024), Figura. 6. De acuerdo con los datos estadísticos recolectados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la población total de Ixil en 2020 fue de 4,115 habitantes, con 1094 familias, de los cuales 398 habitantes hablan la lengua indígena Maya (INEGI, 2021). A pesar de su vasta área geográfica y su acuífero accesible, la comunidad Maya enfrenta desafíos socioeconómicos y de impacto ambiental, lo que la hace vulnerable a la escasez de recursos, afectando su gran dependencia de las actividades agrícolas y generando pobreza.

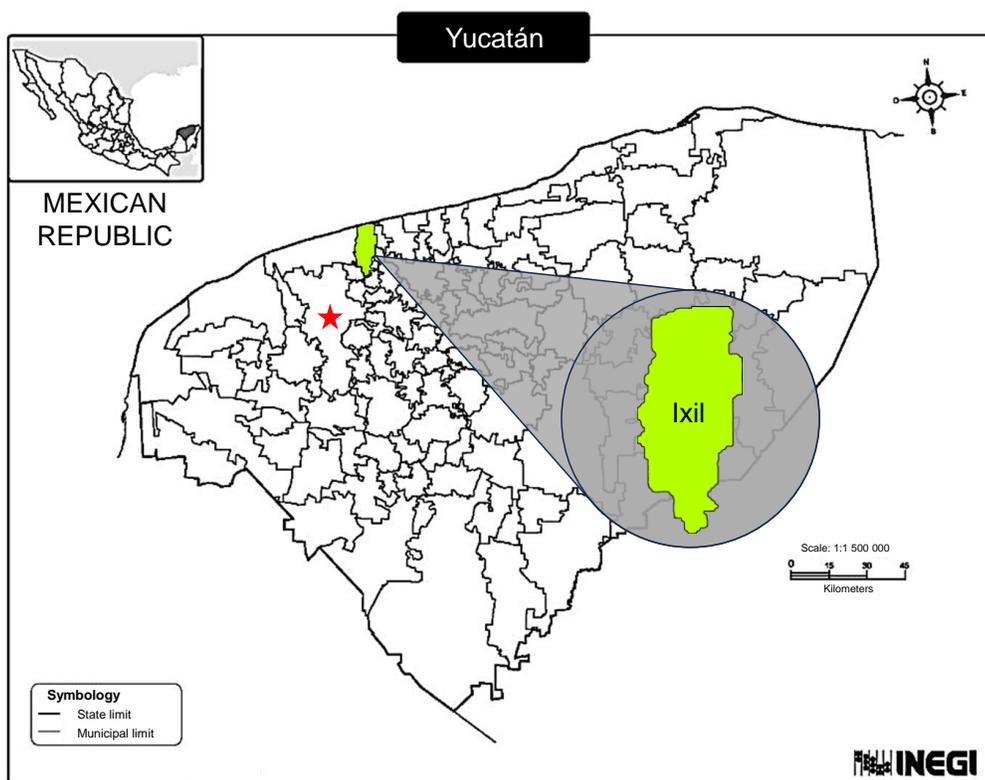


Figura. 6. Ubicación geográfica de la comunidad de Ixil en Yucatán, México (INEGI, 2024).

2.2 Diseño de encuesta CAP

Se elaboró una encuesta CAP con seis ejes de interés, con el objetivo de obtener la cartografía energética y situación real de la comunidad. Los primeros dos ejes registran la situación sociodemográfica y socioeconómica de la comunidad, los cuatro ejes restantes evalúan el conocimiento, las actitudes y prácticas de la comunidad sobre percepción de temas del medio ambiente de su comunidad, el cambio climático, los recursos naturales y el acercamiento a las energías renovables desde una postura positiva y negativa sobre el tema. En la Tabla 3 se describe el objetivo de cada uno de los ejes y la cantidad de preguntas por sección.

Tabla 3. Descripción de los objetivos de las secciones incluidas en la encuesta CAP.

Sección	Objetivo
sociodemográfica	La sección sociodemográfica, que consta de cuatro preguntas, es fundamental para desarrollar un perfil integral de la población encuestada. Este perfil detallado es útil para desarrollar programas y servicios adecuados a las necesidades y características particulares de la comunidad. Los datos sociodemográficos recopilados son esenciales para la implementación técnica exitosa del sistema de bombeo de agua.
Socioeconómica	Esta sección, que consta de tres preguntas, permite un análisis de las condiciones económicas, los medios de vida y los patrones de consumo de energía de la comunidad. Los datos recopilados apoyan el diseño de intervenciones efectivas para mejorar las condiciones socioeconómicas, evaluar la capacidad de pago y optimizar la sostenibilidad de las soluciones técnicas.
Medio ambiente y comunidad	Esta sección consta de tres evaluaciones de la dependencia de la comunidad de los recursos hídricos, identificando áreas prioritarias. Los datos obtenidos notifican la formulación de políticas y actividades para abordar temas relacionados con el agua, promoviendo hábitos sustentables que beneficien el medio ambiente y el bienestar de la comunidad.
Cambio climático	Con dos preguntas, esta sección pretende recopilar información que facilite la adopción de programas de educación y sensibilización centrados en las preocupaciones y experiencias específicas de la comunidad respecto al cambio climático. Los conocimientos que se lograron respaldan una comprensión más profunda de cómo fomentar prácticas sustentables e informadas.
Recursos naturales	Esta sección, que consta de dos preguntas, se centra en la recopilación de datos para apoyar el desarrollo de programas de gestión sostenible de recursos. Fomenta la conciencia comunitaria sobre los recursos naturales y potencia decisiones informadas sobre la preservación y el uso responsable, maximizando la adopción de soluciones tecnológicas respetuosas con el medio ambiente.
Energías renovables	La información adquirida destaca las posibilidades de educación y promueve una mejor comprensión de las ventajas potenciales de la energía renovable. Como resultado, las sugerencias técnicas y económicas para el proyecto tienen más probabilidades de ser aceptadas.

2.2.1 Muestra mínima

Una muestra mínima tiene como principal objetivo, obtener una representación estadísticamente confiable de universo de elementos con características propias, a través de adecuada selección de un subgrupo o subconjunto de elementos pertenecientes al universo de análisis (Figura. 7). Seguir esta metodología, da un soporte formal al proceso de investigación científica, ya que evitan sesgos de medición y errores en los resultados esperados de la investigación, así como la tendencia propia del investigador. Al mismo tiempo permite acotar el universo a investigar.

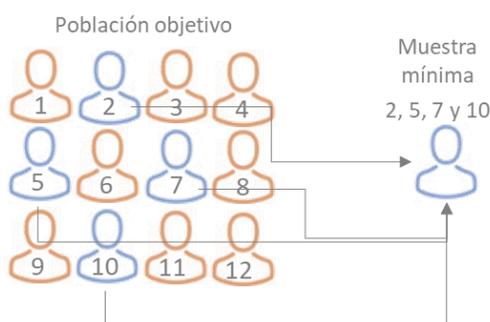


Figura. 7. Ejemplo de muestra mínima.

A continuación, se describe la metodología desarrollada por Mendenhall (Mendenhall et al., 2006) para determinar la muestra mínima en una población objetivo. Este procesamiento es utilizado ampliamente en diferentes disciplinas de las Ciencias Sociales y Ciencias Naturales para obtener información de una población, con base en una muestra representativa, aleatoria y con un nivel de confianza significativo.

$$n = \frac{Z^2 pqN}{(N - 1)E^2 + Z^2 pq} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

n : Muestra mínima

Z : Parámetro estadístico que depende el Nivel de confianza

p : Variabilidad positiva

q : Variabilidad negativa

N : Tamaño de la población o Universo (total de viviendas)

E : Precisión o error

El nivel de confianza es determinado por el investigador, para este caso de estudio se consideró un nivel de confianza del 80% con un intervalo de confianza Z de 1.28, de acuerdo con la tabla de distribución normal.

p y q se refieren a la probabilidad o porcentaje de que sea aceptada o rechazada la hipótesis que se quiere investigar. La probabilidad de que sea aceptada la hipótesis se le denomina variabilidad positiva y se denota por p , y la probabilidad de que sea rechazada la hipótesis se le denomina variabilidad negativa, denotada por q . Por lo que estas probabilidades se consideran complementarias y la suma entre ellas es igual a 1, para el caso de que el investigador no tenga un estudio previo o conozca estas probabilidades, se debe considerar que la variabilidad positiva y negativa sean iguales, o sea, 50% para cada una.

N es el tamaño de la población de la cual se quiere obtener información, para este caso de estudio corresponde a la socioeconómica y percepción de la población de Ixil, a través de los diferentes ejes de la encuesta CAP. Para este estudio, las unidades corresponden al número de viviendas de la comunidad.

Al igual que el parámetro Z el error (E) también es propuesto por el investigador y para este caso de estudio se consideró un error del 5%.

2.2.2 Cálculo de la muestra mínima

De acuerdo con el censo del INEGI 2020, Ixil cuenta con 1319 viviendas registradas de las cuales solo 1094 están habitadas, de las se consideró el número de familias activas involucradas y su interés en implementar el sistema de bombeo, teniendo un total de 232 viviendas como instrumento para analizar la estructura de la población con base en la encuesta CAP. Aplicación de la Ecuación 1 para determinar la muestra mínima.

$$n = \frac{(1.28)^2(0.5)(0.5)(232)}{(232 - 1)(0.05)^2 + (1.28)^2(0.5)(0.5)} = 96.269. \approx 96 \quad \text{Ecuación 2}$$

Con base al resultado obtenido, se determinó una muestra mínima de 96 viviendas, que representa el 8.77 % del total de viviendas habitadas de la comunidad de ixil, y 41.38 % de las familias activas involucradas.

2.2.3 Selección de viviendas a nivel manzana

A partir del resultado de muestra mínima, se procedió a determinar el número de viviendas por manzana donde se aplicó la encuesta CAP. Los datos estadísticos para obtener el número de viviendas habitadas fueron consultados de la plataforma del INEGI del censo 2020 resultados por AGEB y manzana urbana y comparados con el Mapa Digital de México de la plataforma del INEGI.

$$X = \frac{\alpha \cdot N}{M} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

X : Número de viviendas por manzana

α : Promedio de viviendas por manzana

N : Muestra mínima

M : Total de viviendas

Aplicando la Ecuación 3

$$X = \frac{16.40 * 143}{1094} = 2.143 \approx 2 \quad \text{Ecuación 4}$$

Teniendo una total de 2 viviendas por manzana donde se aplicó la encuesta CAP.

2.2.4 Selección de viviendas de estudio

La aplicación del instrumento CAP, se realizará de forma estructurada con el objetivo de evitar sesgos en los resultados, debido a errores en la medición o por la selección arbitraria de los elementos de análisis, siendo los promotores el contacto directo con la comunidad. Mediante mapas del INEGI, se identifican las manzanas de la comunidad de Ixil y la cantidad de viviendas para luego realizar el recorrido de las encuestas, Figura. 8.



Figura. 8. Mapa de distribución de la aplicación de encuestas CAP en la comunidad de Ixil, Yucatán.

2.3 Análisis de encuesta CAP

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la encuesta CAP mediante una descripción general de la información por sección y se presentan las gráficas de los resultados más relevantes. Con base a la distribución de viviendas donde se aplicó la encuesta CAP.

2.3.1 Situación sociodemográfica

Se puede observar que la mayoría de los individuos en las familias son entre tres y cuatro, seguidos por las familias entre una y dos personas por hogar. Esto indica una tendencia hacia familias más pequeñas. Esta tendencia podría atribuirse a varios

factores, como la urbanización, el aumento del costo de vida y el cambio de las normas sociales. Además, los datos sugieren que todavía existen familias más numerosas, pero que son cada vez menos comunes, Figura. 9.

Respuesta del encuestado sobre el número de personas que viven en la casa

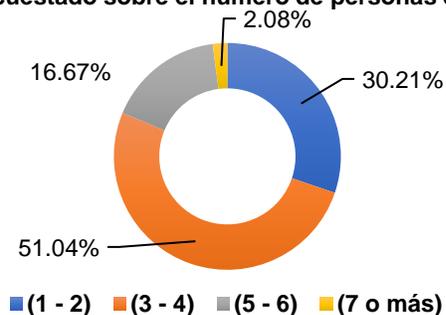


Figura. 9. Número de habitantes por familia.

La influencia de las tradiciones mayas se puede observar en una representación de género casi equitativa, con sólo una diferencia del 2 % entre hombres y mujeres, lo que demuestra el compromiso continuo de la comunidad con la igualdad de género, Figura. 10.

Respuesta del encuestado sobre el genero de cada integrante de la familia

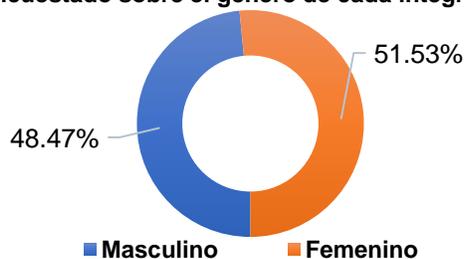


Figura. 10. Genero de cada integrante de la familia.

En cuanto a la edad, el rango predominante para hombres y mujeres estuvo entre 21 y 30 años, Figura. 11, indicando un predominio de personas jóvenes. Esta tendencia demográfica indica una fuerza laboral con energía y capacidad laboral sustanciales, que potencialmente contribuyen a diversos aspectos de la vida comunitaria.

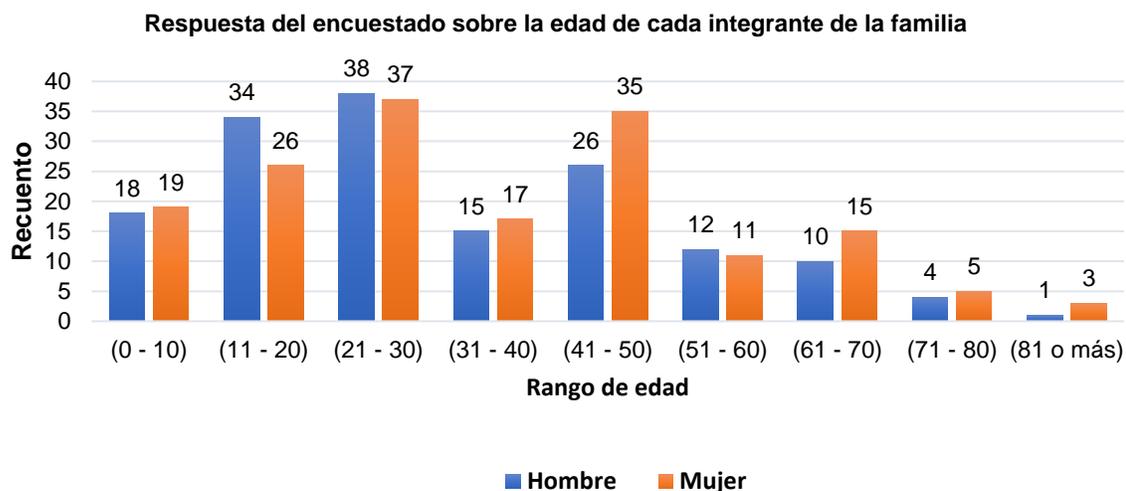


Figura. 11. Rango de edad de cada miembro de la familia.

Además, el nivel educativo más alto en la comunidad es la escuela preparatoria, Figura. 12, seguida de la educación secundaria y primaria; sin embargo, las personas sin educación, educación preescolar, técnica, licenciatura y posgrado son casi inexistentes en la comunidad. La educación primaria, secundaria y preparatoria en la comunidad refleja su dedicación a preservar las tradiciones y conocimientos culturales.

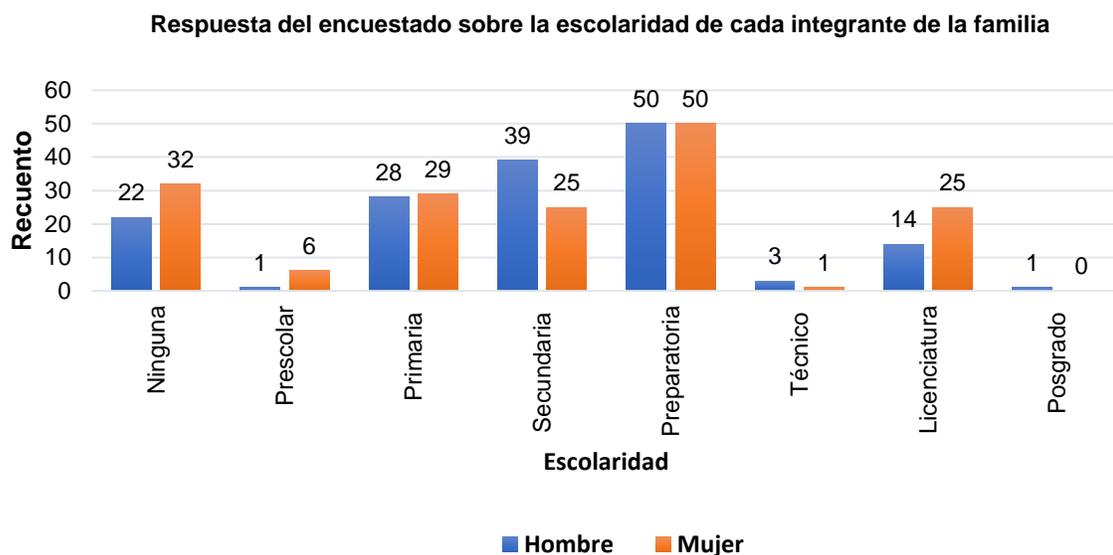


Figura. 12. Escolaridad de cada miembro de la familia.

2.3.2 Situación socioeconómica

Se reveló que la principal actividad de las mujeres son las tareas domésticas, seguida de estudiante y empleadas, lo que genera profundas implicaciones para comprender la dinámica sociocultural dentro de la comunidad, destacando la importancia de los roles de género. Por el contrario, la ocupación principal de los hombres es empleado, estudiante como segundo y campesino como tercera actividad, Figura. 13.

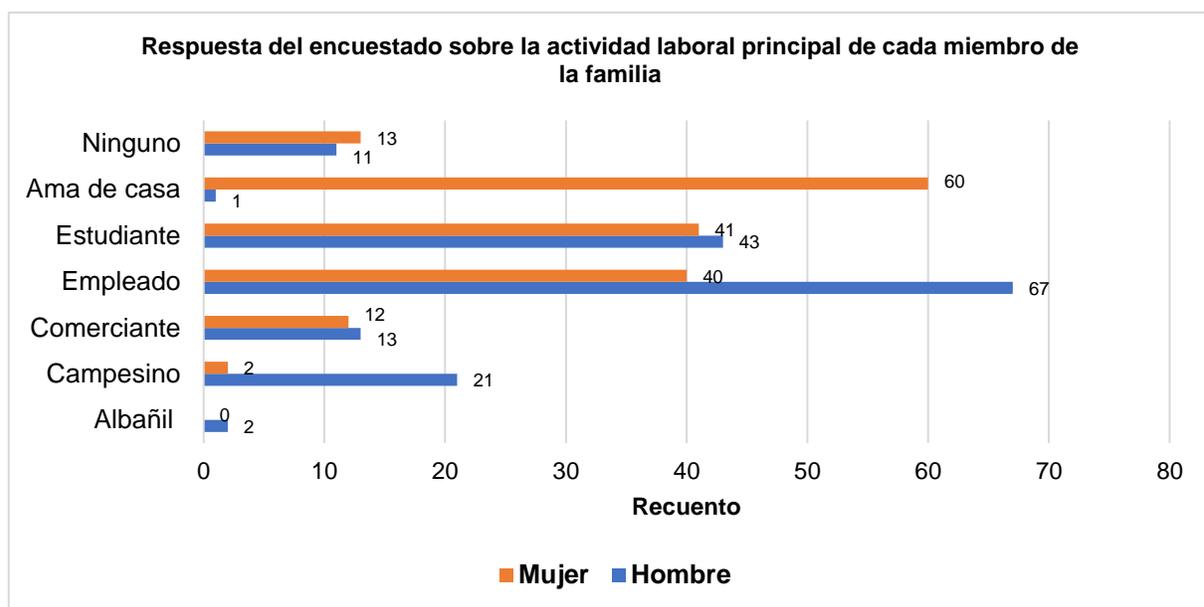


Figura. 13. Actividad laboral principal de cada miembro de la familia.

Este conocimiento podría informar políticas o intervenciones que promuevan la igualdad de género y el empoderamiento económico en proyectos de energía sostenible en comunidades similares. Además, estas dinámicas socioeconómicas brindan una visión integral de los medios de vida de la comunidad y subrayan la importancia de la sección socioeconómica dentro de esta investigación. Al examinar el gasto mensual de los hogares se encontró que el porcentaje más alto está entre \$3,000 y \$5,999 pesos, Figura. 14, de los cuales entre \$200 a \$399 pesos se destinan al gasto en electricidad, siendo un gasto mensual entre \$100 y \$200 pesos, ya que el cobro de servicio eléctrico es bimestral, Figura. 15.

Respuesta del encuestado sobre el gasto mensual promedio en la casa

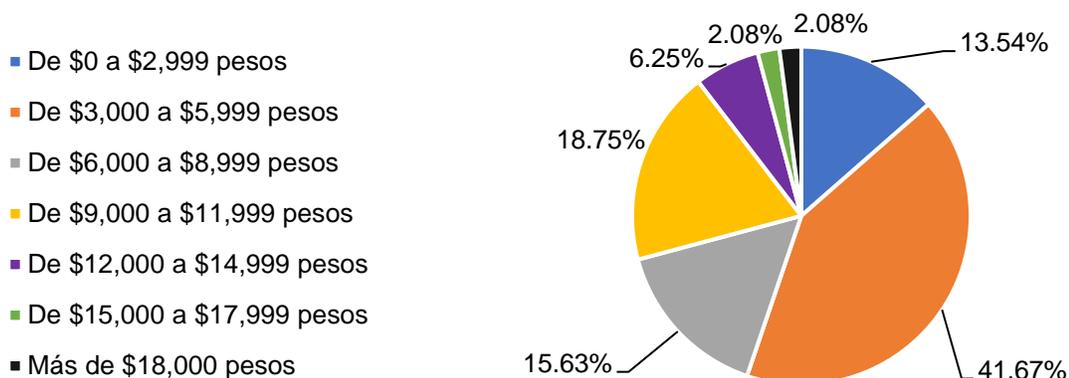


Figura. 14. Gasto mensual promedio por familia.

Respuesta del encuestado sobre el gasto bimestral promedio solo en electricidad

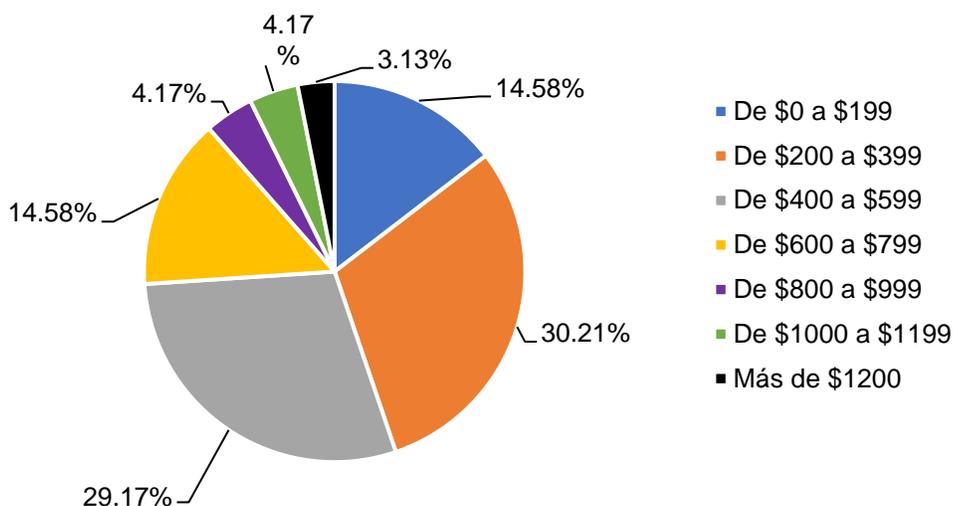


Figura. 15. Gasto bimestral promedio por el consumo electrico.

Esto indica que el costo de la electricidad es una porción relativamente pequeña del gasto mensual total; por lo tanto, la porción restante se puede gastar en agua, alimentos y transporte, entre otros. Estos conocimientos socioeconómicos son vitales desde una perspectiva social y fundamentales para comprender la capacidad y disposición de la comunidad para invertir en soluciones energéticas sostenibles.

2.3.3 CAP Medio ambiente y comunidad

En cuanto a la sección de medio ambiente y comunidad, la principal fuente de recolección de agua fue el servicio de agua potable, Figura. 16, y la actividad predominante fue la lavandería (64.58 %), Figura. 17.

Respuesta del encuestado sobre la fuente de agua para las actividades diarias

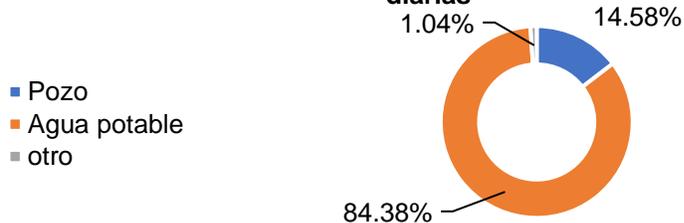


Figura. 16. Fuente principal para el consumo de agua.

Respuesta del encuestado sobre la actividad más frecuente relacionado con el uso del agua

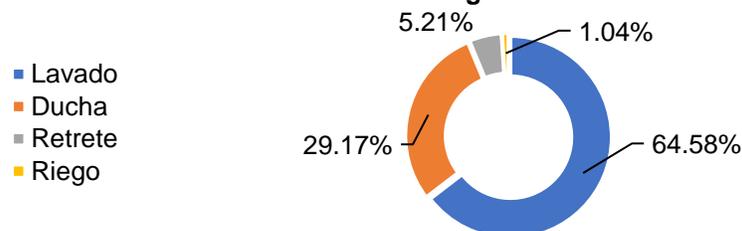


Figura. 17. Actividades más frecuentes relacionados al uso del agua.

El uso del agua es un aspecto central de la vida comunitaria. En particular, las preocupaciones de la comunidad sobre la escasez de agua refuerzan la importancia de los objetivos de este estudio, Figura. 18. La implementación de sistemas de bombeo impulsados por energía solar que utilizan agua de pozos comunitarios puede proporcionar un suministro de agua confiable y constante desde el acuífero de Yucatán. Estos resultados están estrechamente relacionados con los aspectos técnicos y ambientales, y contribuyen al enfoque holístico de esta investigación.

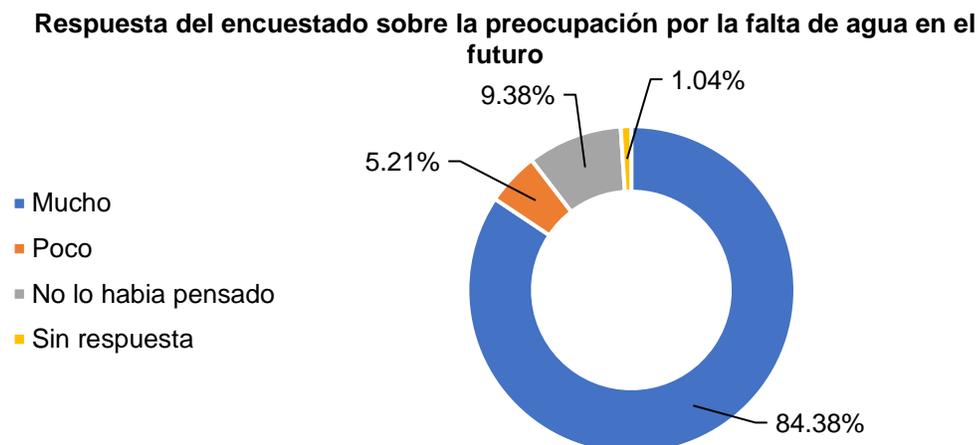


Figura. 18. Preocupación sobre la falta de agua en el futuro.

2.3.4 CAP Cambio climático

En cuanto al cambio climático, los resultados revelaron que las consecuencias del cambio climático se manifiestan principalmente en inundaciones (47.85 %) y olas de calor (38.65 %), Figura. 19. Además, los encuestados estaban conscientes de los cambios en su entorno en los últimos años, particularmente en lo que respecta a las variaciones de temperatura y lluvia, Figura. 20.

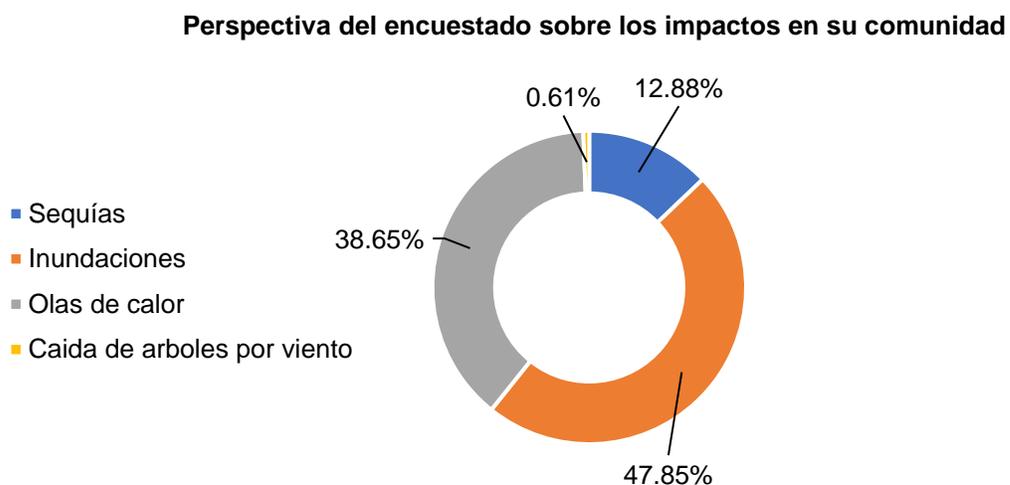


Figura. 19. Impactos ambientales en su comunidad.

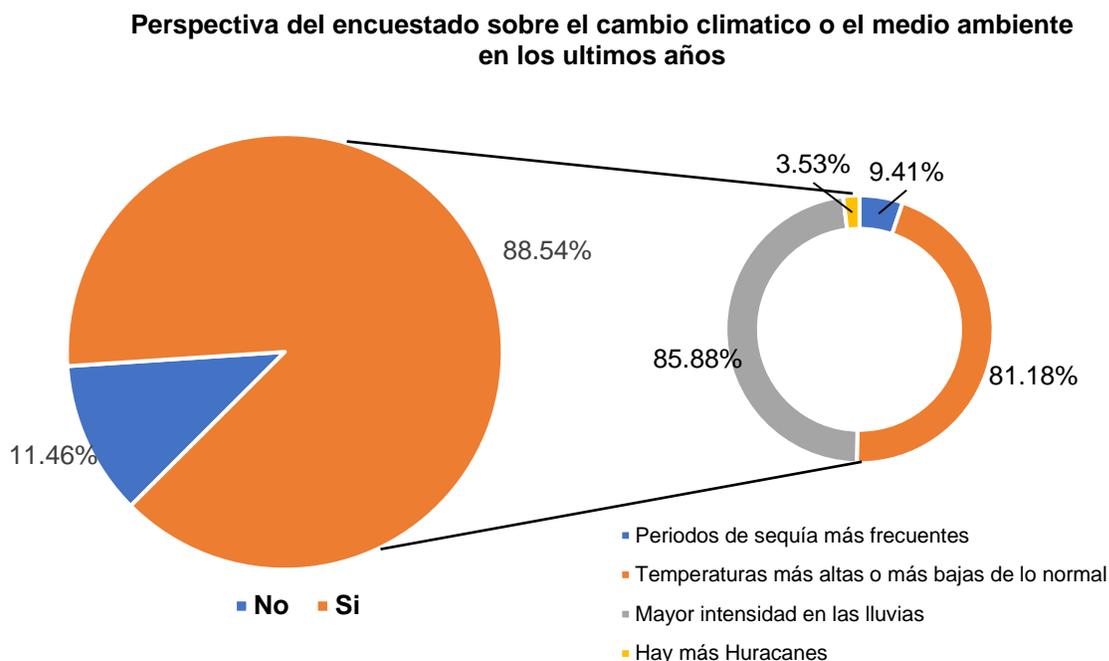


Figura. 20. Cambios en el medio ambiente en los últimos años.

Las respuestas recopiladas en esta sección enfatizan el compromiso de la comunidad con la preservación del medio ambiente y subrayan la necesidad de abordar el cambio climático de manera efectiva. Además, es esencial considerar los potenciales aspectos técnicos asociados con la implementación esperada del sistema, ya que puede ser susceptible a eventos climáticos desfavorables. Por lo tanto, es esencial priorizar la capacitación comunitaria proactiva y la preparación para responder eficazmente a situaciones imprevistas. Los desafíos del agua y el cambio climático no son exclusivos de la comunidad ixil, sino que son preocupaciones compartidas por muchas comunidades rurales e indígenas en todo el mundo. Por lo tanto, este estudio podría proporcionar lecciones valiosas para abordar estos problemas de manera efectiva en diferentes contextos.

2.3.5 CAP Recursos naturales

Esta sección reveló la importancia que tiene el agua como el recurso principal en la comunidad, seguido por la madera y la flora de la comunidad, Figura. 21.

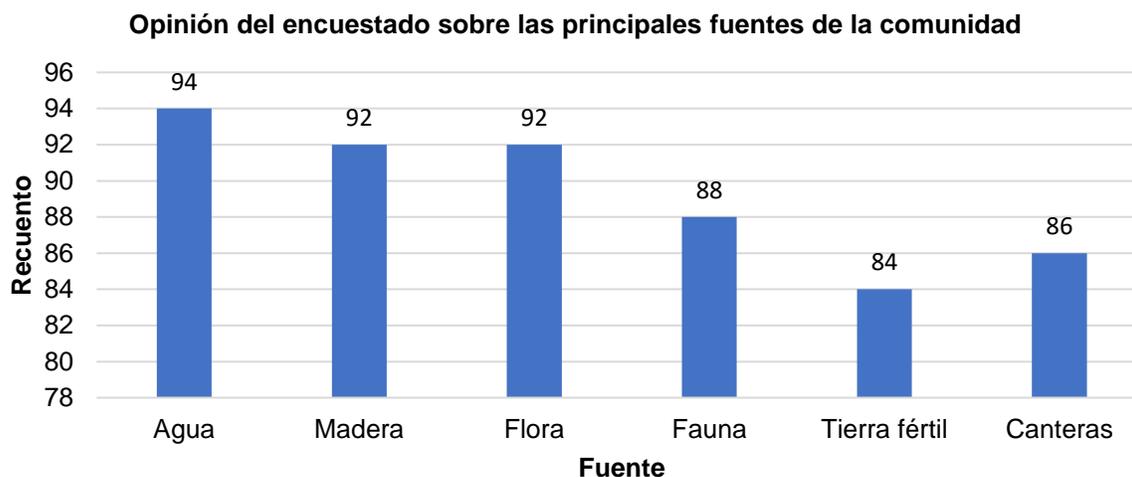


Figura. 21. Principales recursos de la comunidad.

Y están concientes que estos recursos podrían agotarse debido a su uso frecuente. Esta visión socio natural resalta la dependencia de la comunidad del agua, particularmente en las prácticas diarias o agrícolas, Figura. 22.



Figura. 22. Perspectiva de la escasez de recurso en la comunidad.

En el contexto de la comunidad de Ixil, el agua satisface las necesidades básicas de los residentes, como el consumo diario y la higiene, y juega un papel crucial en la productividad agrícola como pilar de la economía local.

La percepción del agua como el recurso más importante refleja su conexión intrínseca con la supervivencia y el bienestar de la comunidad. Por lo tanto, reconocer el agua como un recurso natural crucial es social y técnicamente significativo. Estos hallazgos concuerdan con el enfoque integral que persigue el desarrollo de sistemas energéticos personalizados para satisfacer los requisitos específicos de la comunidad y al mismo tiempo promover la utilización responsable y eficiente de los recursos naturales.

2.3.6 CAP Energía renovables

Por otro lado, en el apartado de energías renovables se destacan varios resultados significativos. Los encuestados demostraron un conocimiento sustancial de las energías renovables (86.46 %), siendo la televisión (19.37 %) la principal fuente de información, Figura. 23.

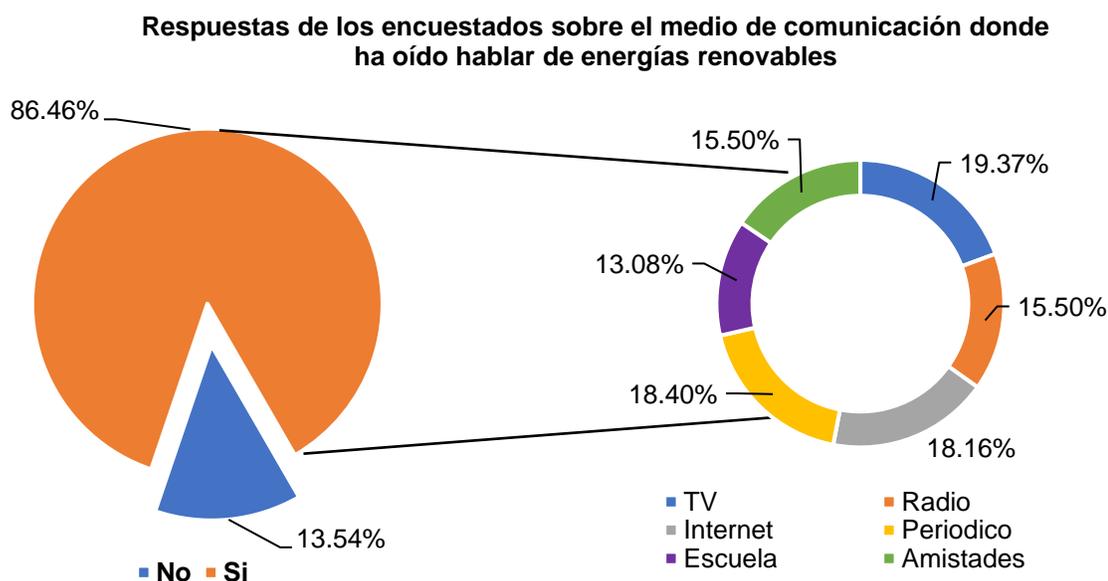


Figura. 23. Conocimiento de las energías renovables.

Los encuestados que tienen noción de las energías renovables mencionaron principalmente la solar, la eólica y la biomasa, Figura. 24.

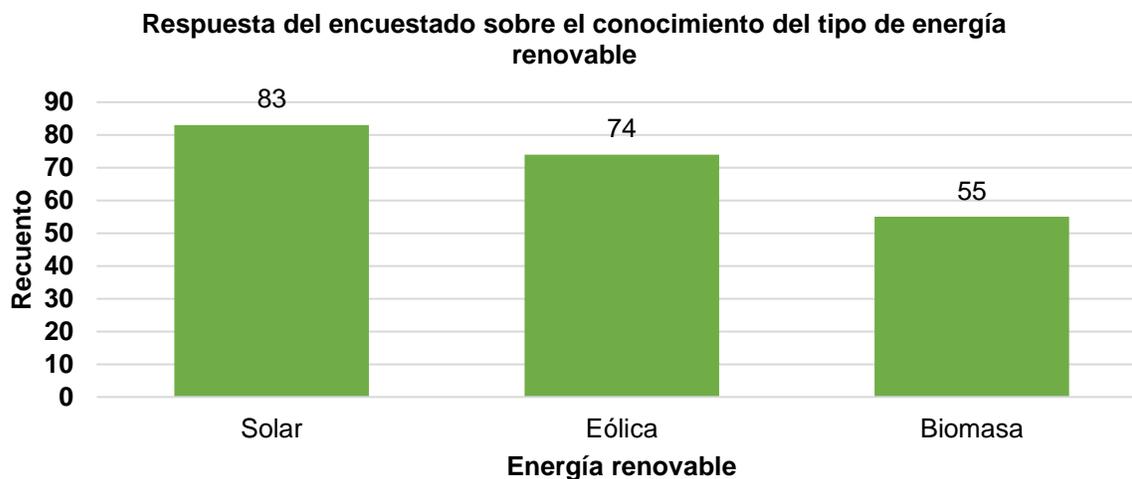


Figura. 24. Conocimiento de los tipos de energía renovable.

El 79.17 % de los encuestados consideraron que utilizar recursos naturales para la producción de energía es una buena opción, Figura. 25.

Opinión del encuestado sobre el uso de fuentes naturales para producir energía

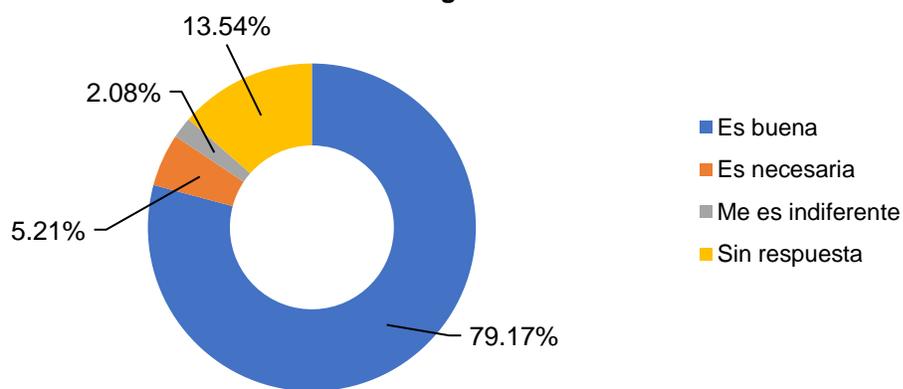


Figura. 25. Uso de fuentes naturales para producir energía.

Además, el 78.13 % de los encuestados consideran utilizar fuentes naturales para ahorrar energía y dinero, Figura. 26.

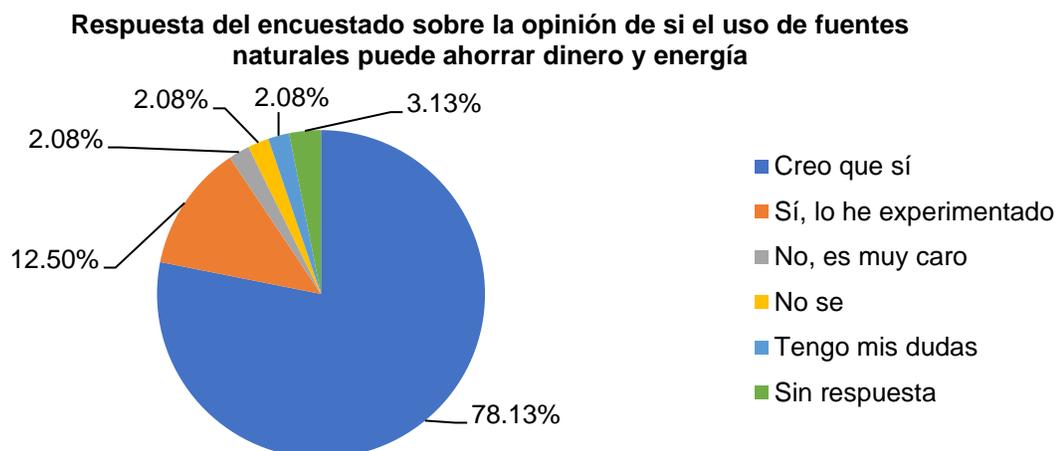


Figura. 26. Uso de fuentes renovables como una solución al ahorro energético y económico.

percibiéndose la energía solar como la fuente más predominante en la comunidad, seguida de la biomasa y la eólica. Figura. 27.

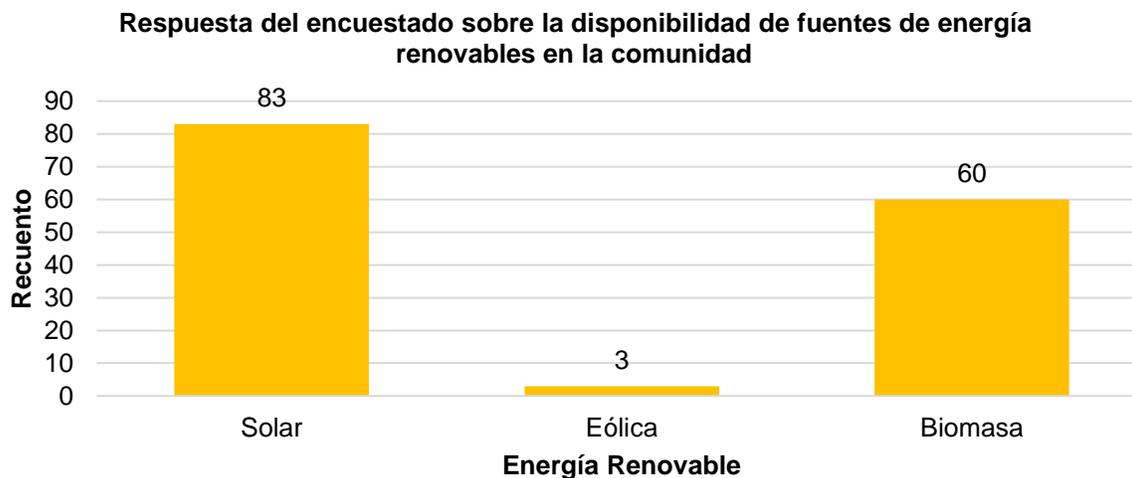


Figura. 27. Disponibilidad de fuentes de energía renovable en la comunidad.

Finalmente, el 94.79 % de los encuestados estuvo de acuerdo en aceptar paneles solares para la generación de electricidad (Figura. 28), y el 68 % conocía el futuro problema de escasez de energía (Figura. 29).

Opinión del encuestado sobre la aceptación del uso de paneles solares

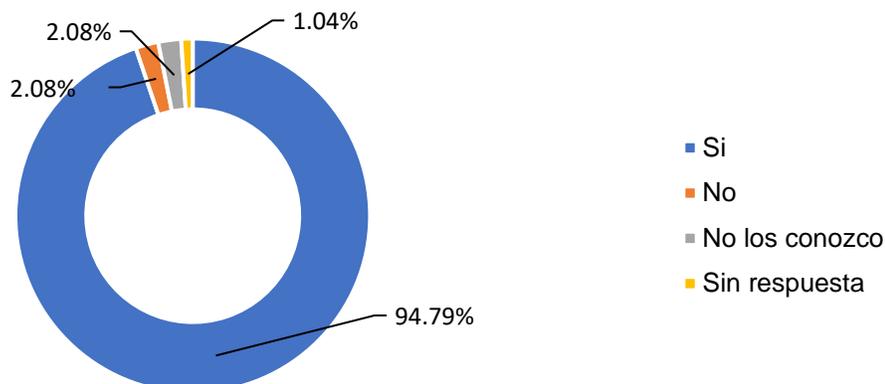


Figura. 28. Aceptación del uso de paneles solares.

Respuesta del encuestado sobre la preocupación por la falta de energía en el futuro

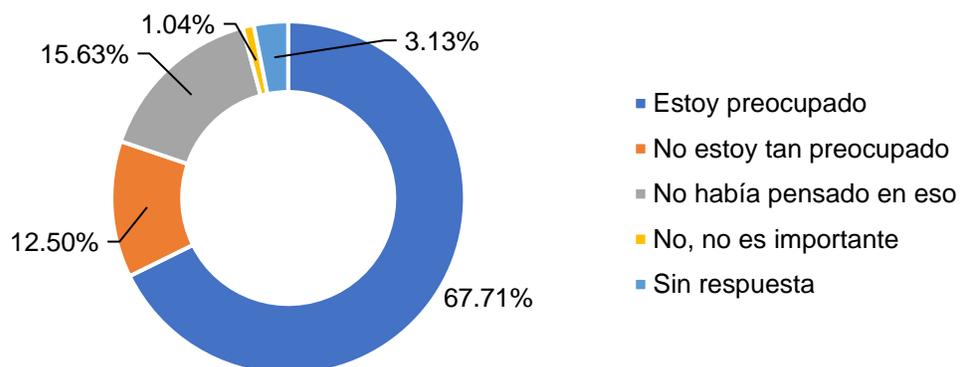


Figura. 29. Preocupación por la falta de energía en el futuro.

Los hallazgos subrayan la necesidad de implementar una estrategia sociocultural integral para aumentar el conocimiento y la comprensión de la comunidad sobre las fuentes de energía sostenibles. Además, la prominencia de la energía solar como fuente de energía primaria proporciona información valiosa sobre el diseño técnico de sistemas energéticos que se alinean con las preferencias de la comunidad y la disponibilidad de recursos.

2.4 Cartografía energética

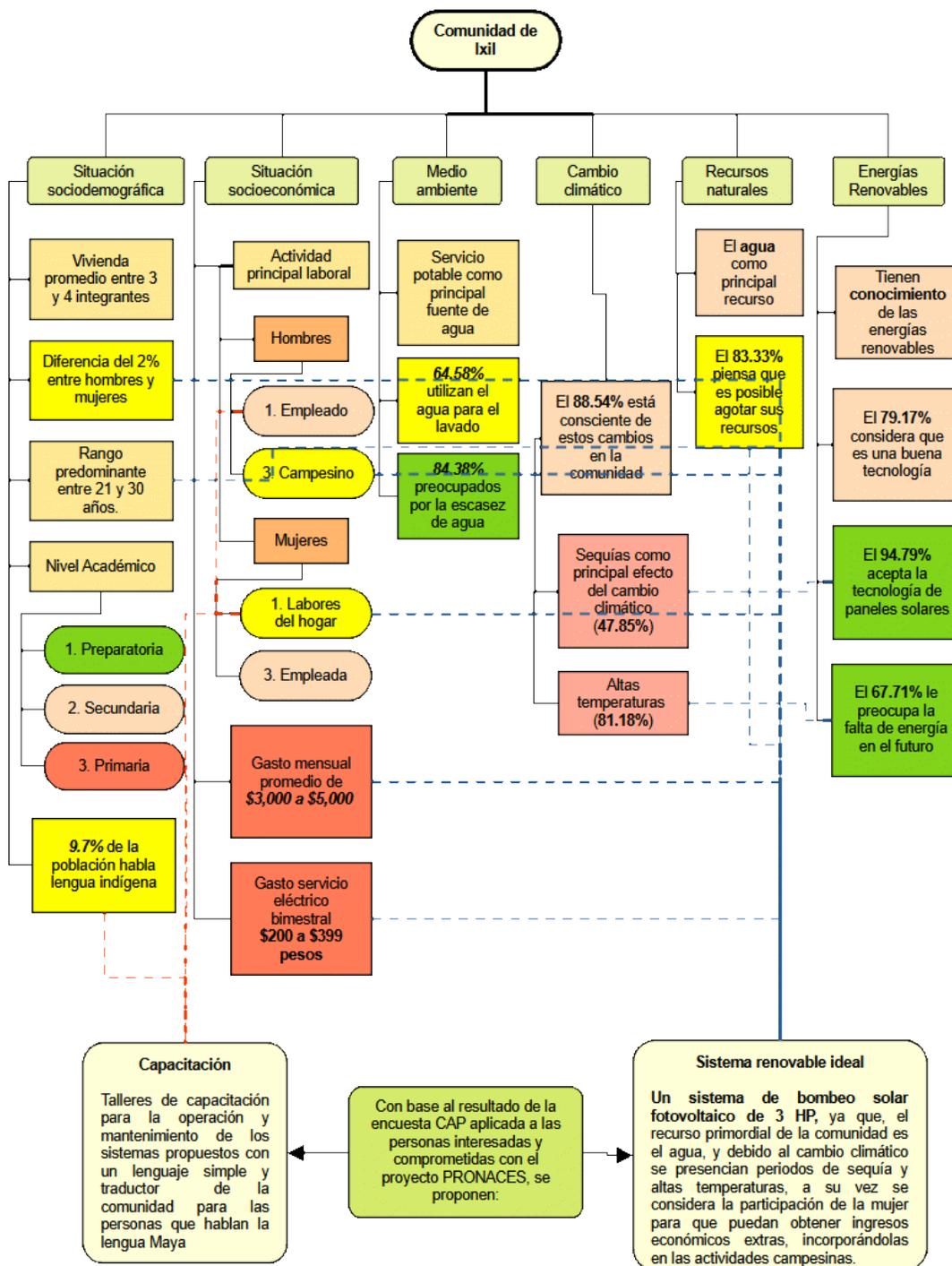


Figura. 30. Cartografía energética de la comunidad de Ixil.

En resumen, las secciones CAP demuestran los aspectos complejos y multifacéticos de la comunidad. Las tendencias demográficas hacia unidades familiares pequeñas y la continuación de familias extensas reflejan cambios en la estructura social y el impacto continuo de las tradiciones culturales mayas que priorizan la coexistencia comunitaria y las relaciones intergeneracionales. La sección socioeconómica destacó la importancia de los roles de género, mientras que las percepciones sobre el consumo de agua y los problemas ambientales subrayan la necesidad de desafiar la gestión sostenible del agua y la lucha urgente contra el cambio climático. En este contexto, el énfasis en el uso diario del agua y la electricidad subraya la importancia fundamental de estos dos recursos en la vida comunitaria. Las preocupaciones claras sobre la disponibilidad futura de agua resaltan la necesidad de abordar su gestión sostenible, y la baja educación formal en la comunidad subraya la necesidad de soluciones energéticas asequibles y asequibles. La implementación de sistemas híbridos de energía renovable con un enfoque centrado en la energía solar no solo proporcionaría electricidad limpia y confiable, sino que también garantizaría un suministro constante de agua a través de sistemas de bombeo eficientes, respaldados por la amplia aceptación de los paneles solares en la comunidad. Estos hallazgos respaldan la necesidad de estrategias integrales para mejorar la comprensión de las fuentes de energía sostenibles y sugieren la adopción de sistemas híbridos de energía renovable centrados en la energía solar. Este enfoque alinea las soluciones tecnológicas con las preferencias y recursos disponibles en la comunidad, resaltando la importancia de la preservación del medio ambiente y contribuyendo al bienestar general de los habitantes. Finalmente, implementar la encuesta CAP representa un enfoque integral y esencial para comprender a fondo las necesidades de la comunidad local. Cada sección representa un pilar que ofrece una visión holística de la vida comunitaria, desde la estructura familiar hasta las preocupaciones ambientales y la dependencia de recursos vitales. Estas secciones permiten una evaluación integral, sentando las bases para desarrollar soluciones tecnológicas que aborden los desafíos energéticos y se alineen con las necesidades culturales y sociales de la comunidad; por lo tanto, fomentar cambios significativos y sostenibles en su calidad de vida podría servir como

modelo para otros estudios o proyectos que busquen desarrollar soluciones energéticas sostenibles y culturalmente apropiadas en contextos similares.

Estos conocimientos del diagnóstico comunitario participativo en la fase 1, permiten llevar a cabo el proceso de dimensionamiento técnico de un sistema de bombeo solar en la fase 2, que aborda los desafíos de energía y agua identificados, y se adapta al contexto cultural y social único de la comunidad. Al considerar los requisitos de energía específicos de la bomba de agua y utilizar el software HOMER, la fase 2 implica simular y analizar cinco escenarios que representan variaciones en el sistema híbrido de energía renovable, considerando indicadores de desempeño energético, ambiental y económico.

CAPITULO 3

3 DIMENSIONAMIENTO TÉCNICO

Después de identificar las necesidades de la comunidad en el capítulo anterior y de proponer un sistema que puede resolver dichas necesidades, se realizó una visita a la comunidad para determinar un área estratégica para la instalación del sistema y determinar los posibles obstáculos y consideración para su correcta instalación.

Este tema de investigación está vinculado con el proyecto PRONACES 319191: Comunidades Mayas Sustentables, el proyecto abarcó tres comunidades como caso de estudio, Yaxunah, San José Tip-Ceh e Ixil, cada comunidad en diferente región del estado de Yucatán.

El proyecto cuenta con fondo de inversión por parte del CONACYT para la implementación de sistemas energéticos de bombeo solar para impulsar la actividad económica de las comunidades Mayas. Para la comunidad de Ixil se destinó un sistema de Bombeo Solar Fotovoltaico de 3 hp para implantación de riego. En este capítulo se realiza el análisis del BSF para una bomba sumergible de 3 hp, con un caudal de 2.2 litros por segundo y carga dinámica de 70 metros de columna de agua. De igual manera, se analiza y evalúa un controlador de variación de frecuencia (VFD, por sus siglas en inglés) como caso de estudio BSF.

3.1 Levantamiento en sitio

El caso de estudio se enfoca en la comunidad de Ixil, con las coordenadas 21°09' Norte y 89°28' Este, aproximadamente a 45 km de la capital del estado de Yucatán. En el territorio municipal no existen corrientes superficiales de agua, sin embargo, en el subsuelo se forman depósitos comúnmente conocidos como cenotes conectados por el manto acuífero. La región donde se localiza el municipio es de clima cálida-

subhúmeda con lluvias en verano, sin embargo, en la región norte debido a la costa, el clima es seco y muy cálido (SEFOET, 2024).

En la Figura. 31 se muestran las ubicaciones de los sistemas instalados, estos se encuentran en los terrenos de uso común al norte de la comunidad de Ixil, con sombra amarilla se indica las manzanas habitadas de la comunidad.

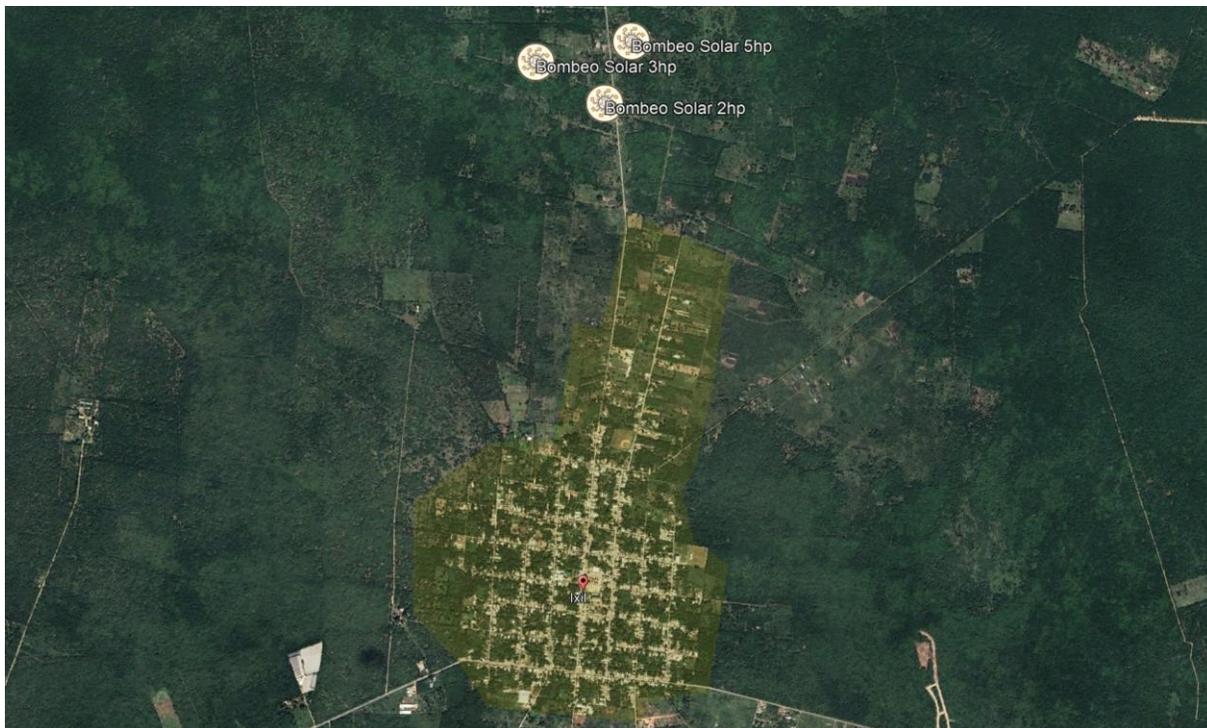


Figura. 31. Comunidad de Ixil y ubicación de sistemas de bombeo solar instalados.

3.2 Evaluación de escenarios de bombeo

En este trabajo se consideraron dos casos correspondientes a un BSF convencional y otro empleando un variador de frecuencia. Además, se consideraron diferentes escenarios para satisfacer la demanda de energía del sistema de bombeo de la comunidad previamente mencionada en el Capítulo 2. DIAGNÓSTICO DE LA COMUNIDAD de este documento. La Figura. 32 ilustra el diagrama esquemático de la metodología empleada en este estudio considerando diferentes fuentes de energía dentro del BFS. Cabe destacar que se utilizó el software de optimización híbrida de

recursos energéticos múltiples (HOMER) para la optimización de los diferentes escenarios propuestos.

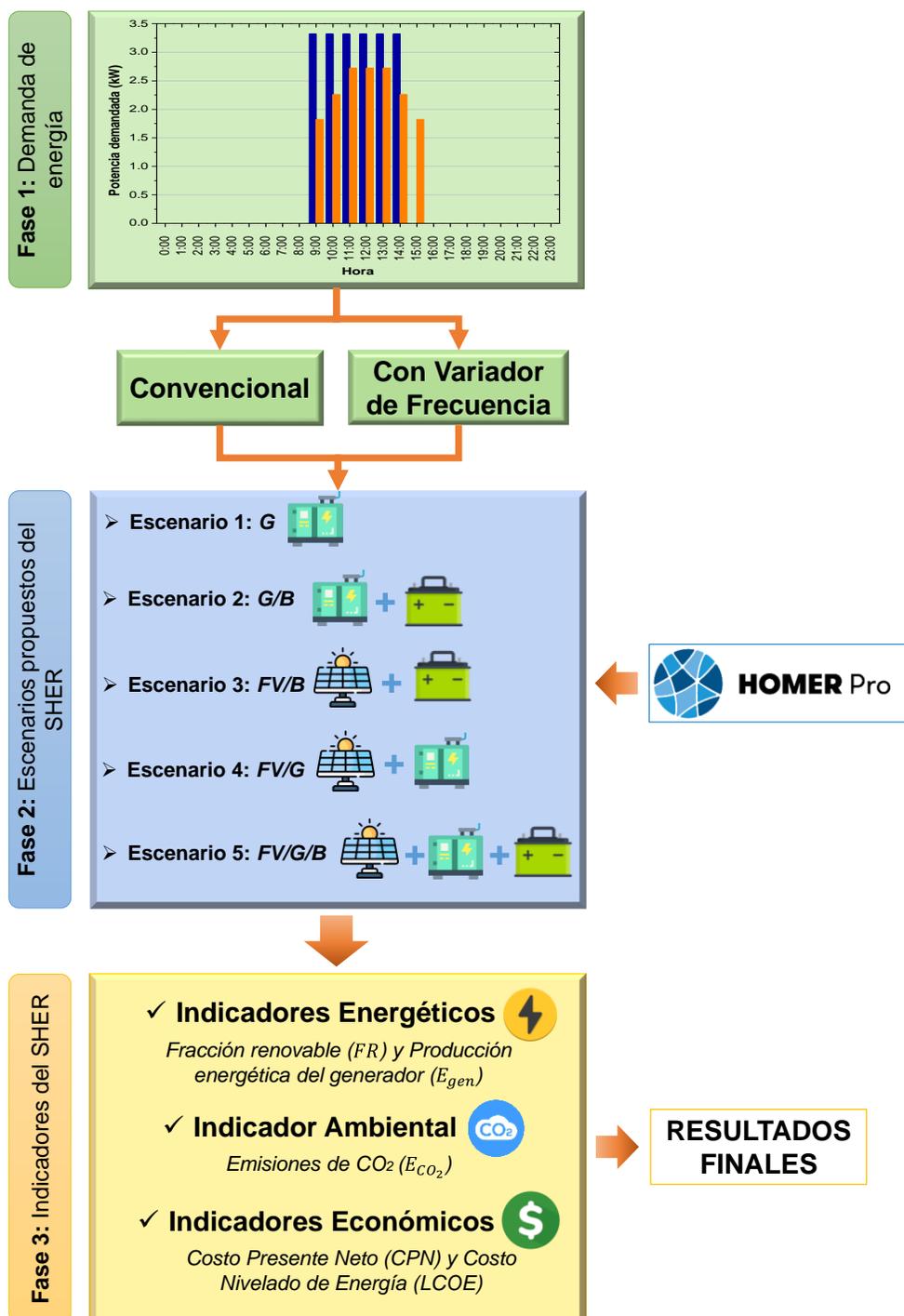


Figura. 32. Diagrama esquemático de la metodología empleada para el dimensionado del BSF propuesto y el cálculo de los indicadores.

La descripción detallada de cada fase se presenta a continuación:

Fase 1: En esta fase se cuantifica la energía que requiere el proceso de bombeo solar fotovoltaico (BSF) en la comunidad de estudio. Para tal motivo se determinan las horas de bombeo que se requieren, así como la potencia de las bombas y otros parámetros hidráulicos en función de las horas disponibles que puede operar el sistema. La energía total fue determinada constante para el bombeo solar fotovoltaico convencional, ya que, al contar con baterías el consumo se puede mantener constante. Mientras que el segundo sistema es un BSF con un variador de frecuencia (VFD) el cual varía el flujo de la bomba con respecto a la incidencia de radiación por parte de sol.

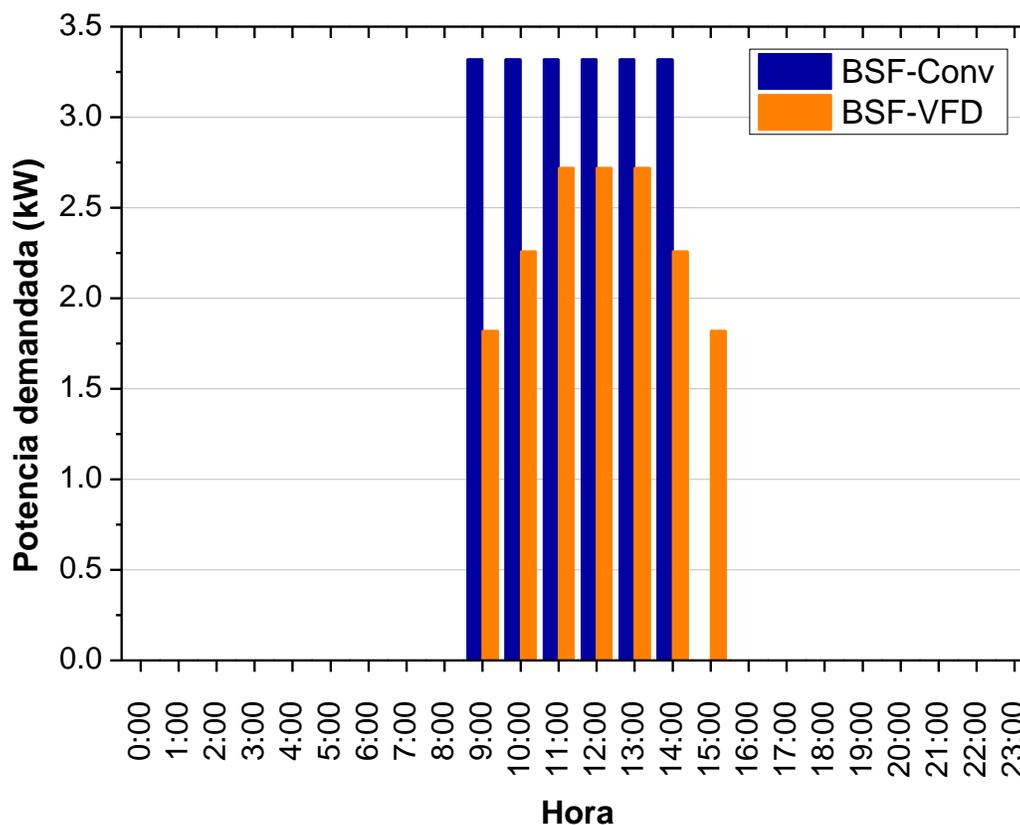


Figura. 33. Perfiles de consumos energéticos del sistema de bombeo del presente estudio para dos diferentes casos.

En la Figura. 33 se pueden observar los perfiles de consumo de ambos sistemas, de color azul el BSF-conv y en color naranja el BSF-VFD, en ambos se puede obtener un volumen de 47,520 litros por día, sin embargo, el sistema BSF-VFD al operar con un variador de frecuencia, se puede controlar una bomba de corriente alterna trifásica a 230 V, por lo que, la eficiencia eléctrica es considerablemente mejor. Teniendo una potencia pico de 2.72 kW en comparación de los 3.82 kW del sistema convencional que controla una bomba de las mismas características hidráulicas, pero con un motor monofásico a 230 V. De igual manera el VFD permite operar con un generador auxiliar de menor potencia debido a que no se producen los picos de arranque que pasaría en un sistema convencional.

Fase 2: En esta fase se plantean los diferentes escenarios propuestos correspondientes al sistema de bombeo solar fotovoltaico. Se plantean dos casos con cinco diferentes escenarios cada uno. El primer caso comprende un BSF convencional que involucra la combinación de un sistema fotovoltaico, un generador como sistema auxiliar, y un arreglo de baterías como sistema de respaldo y almacenamiento de energía. Por otra parte, para el segundo caso se propone el uso de un variador de frecuencia (VFD) el cual representa la novedad de este trabajo. Este dispositivo permite disminuir el dimensionamiento del generador eléctrico, ya que, permite un arranque con rampas de aceleración y desaceleración, a su vez tiene la ventaja de operar con corriente directa y corriente alterna, y la configuración de parámetros para un mejor control del motor de la bomba y menor tener menor consumo eléctrico.

Para el sistema fotovoltaico un panel solar de 400 W fue considerado. Las baterías correspondientes fueron de 116 Ah de capacidad nominal a 12 Volts DC. El generador auxiliar de la marca Evans fue dimensionado con base al sistema híbrido con o sin variador de frecuencia y emplea gasolina como fuente principal de combustible. Los valores obtenidos fueron de 5.5 y 8.5 kW respectivamente, considerando gasolina como combustible de alimentación con un costo de \$ 1.24 USD, y no depende de ningún recurso renovable, sino únicamente del volumen de combustible a ser usado. Por lo tanto, el generador convencional se elige con base en la potencia máxima

consumida por la comunidad de estudio para satisfacer la máxima demanda de energía anual. Finalmente, los costos y características técnicas de los sistemas mencionado se reportan en la Tabla 4 y

Tabla 5, también se reportan algunas características tecno-económicas del sistema de bombeo empleado, ya que forma parte del presente estudio.

Tabla 4. Características tecno-económicas del bombeo solar fotovoltaico convencional para una proyección de 20 años.

Concepto	Característica Técnica	Costo de implementación	Costo de reemplazo	Costo de O&M	Tiempo de vida	Referencia
Sistema de bombeo (motor monofásico)	14.4 A@F.P. 230 V 3.82 kW	–	–	–	–	(Villareal, 2023)
Panel solar fotovoltaico	400 W	\$200.00 USD	–	\$1 USD/año	20 años	(Solarever, 2023)
Generador auxiliar	8.5 kW	\$1,602.00 USD	–	\$0.10 USD/hr	30,000 hrs	(evans, 2023b)
Baterías de almacenamiento	116 Ah	\$326.00 USD	\$326.00 USD	–	5 años	(Trojan, 2023)
Inversor	4 kW (8kW pico)	\$419.00 USD	\$419.00 USD	–	10 años	(Changi, 2023)

Controlador de carga	100 A	\$106.00 USD	\$106.00 USD	–	10 años	(PowMR, 2023)
----------------------	-------	--------------	--------------	---	---------	---------------

Tabla 5. Características tecno-económicas del bombeo solar fotovoltaico con variador de frecuencia para una proyección de 20 años.

Concepto	Característica Técnica	Costo de implementación	Costo de reemplazo	Costo de O&M	Tiempo de vida	Referencia
Sistema de bombeo (motor trifásico)	11.85 A@F.P. 230 V 2.72 kW	–	–	–	–	(Villareal, 2023)
Panel solar fotovoltaico	400 W	\$200.00 USD	–	\$1 USD/año	20 años	(Solarever, 2023)
Generador auxiliar	5.5 kW	\$1,004.00 USD	–	\$0.10 USD/hr	30,000 hrs	(evans, 2023a)
Baterías de almacenamiento	116 Ah	\$326.00 USD	\$326.00 USD	–	5 años	(Trojan, 2023)
Variador de frecuencia (VFD)	5 hp	\$482 USD	\$482 USD	–	10 años	(Delta, 2023)

Las diferentes combinaciones fueron consideradas para el caso convencional y con variador de frecuencia, las cuales se describen con mayor detalle a continuación:

- **Escenario 1 (E1):** Generador auxiliar (G).

- **Escenario 2 (E2):** Generador auxiliar y arreglo de baterías de almacenamiento (G/B).
- **Escenario 3 (E3):** Sistema fotovoltaico y arreglo de baterías de almacenamiento (FV/B).
- **Escenario 4 (E4):** Sistema fotovoltaico y generador auxiliar (FV/G).
- **Escenario 5 (E5):** Sistema fotovoltaico con generador diésel y arreglo de baterías de almacenamiento (FV/G/B).

Las combinaciones propuestas fueron elegidas considerando el recurso disponible en el lugar de estudio, la operación y mantenimiento de los sistemas, la ventaja frente a otros sistemas, entre otros.

Fase 3: Finalmente, la presente fase corresponde a la aplicación de los indicadores energéticos, ambiental y económicos propuestos para este trabajo. Se realiza una comparación de todos los escenarios considerando el variador de frecuencia y se obtienen los resultados de los indicadores por cada escenario para ambos casos. En la siguiente sección se describe con más detalle el cálculo de los indicadores utilizados.

3.3 Aplicación metodológica

En esta sección se presenta la metodología empleada para el cálculo de los diferentes indicadores propuestos. Se determinaron tres categorías (energéticos, ambiental y económicos) correspondientes a la fracción renovable y la producción energética del generador diésel correspondientes a la categoría energética, las emisiones de dióxido de carbono como indicador ambiental, y el costo presente neto y el costo nivelado de energía como indicadores económicos. La descripción y el cálculo detallado de cada uno se presenta a continuación.

3.3.1 Indicadores energéticos

El primer indicador energético considerado fue la fracción renovable (FR) la cual se define como la fracción de energía requerida por el proceso que puede ser satisfecha con fuentes renovables y la energía total requerida por el sistema (Hirvonen & Sirén, 2018) y se puede estimar mediante la Ecuación 5.

$$FR = \frac{\% \text{ de energía suministrada por fuentes renovables}}{\% \text{ energía total requerida por el sistema}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Se espera una fracción renovable alta si se desea que el sistema sea abastecido por energía proveniente de energías renovables.

Por otra parte, el otro indicador energético corresponde a la producción energética del generador (E_{gen}) el cual se cuantifica mediante la Ecuación 6.

$$E_{gen} = \text{Potencia del generador} \times \text{horas de funcionamiento} \quad \text{Ecuación 6}$$

Respecto a este indicador se desea un valor mínimo, lo que implicaría que el uso de energía convencional no renovable se debe reducir para maximizar la producción energética renovable.

3.3.2 Indicador ambiental

El indicador ambiental empleado en este trabajo corresponde a las emisiones de dióxido de carbono (E_{CO_2}) que se cuantifican con base a los litros de combustible empleados por el generador durante el tiempo de vida del proyecto. Para tal motivo se considera un valor promedio de conversión de 2.30531 kg de CO₂ emitidos por 1 litro de gasolina (GOV.UK, 2022).

3.3.3 Indicadores económicos

Se consideraron dos indicadores económicos correspondientes al costo presente neto (CPN) y el costo nivelado de energía (LCOE, mejor conocido por sus siglas en inglés),

los cuales han sido ampliamente empleados en la literatura (Al-Ammar et al., 2020; Hao et al., 2023; Kumar & Channi, 2022) como indicadores de comparación del desempeño económico de sistemas híbridos de energía.

El costo presente neto es una herramienta económica utilizada para equiparar el costo total de un proyecto durante un período de tiempo específico con el costo total actual, teniendo en cuenta el valor del dinero en el tiempo (Ramesh & Saini, 2020), el cual se puede calcular mediante la Ecuación 7.

$$CPN = \sum_{t=0}^n \frac{\text{costos totales anuales}}{(1 + i_d)^n} + I_0 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde i_d es la tasa de descuento, n es el número de años, y I_0 el monto de la inversión inicial.

Por otra parte, el costo nivelado de energía se puede calcular mediante la Ecuación 8 (Harvey, 2020).

$$LCOE = \frac{\text{Costo total de ciclo de vida}}{\text{Producción energética durante el tiempo de vida}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Debido a que los dos indicadores involucran costos en su cálculo, se esperan valores mínimos de ambos indicadores para definir al mejor escenario.

3.4 Análisis de resultados

La presente sección se reporta los resultados finales de los indicadores propuestos para la comparación de los dos casos de estudio del bombeo solar fotovoltaico mediante sistemas híbridos de energías renovables.

3.4.1 Resultados de la comparación de los indicadores energéticos

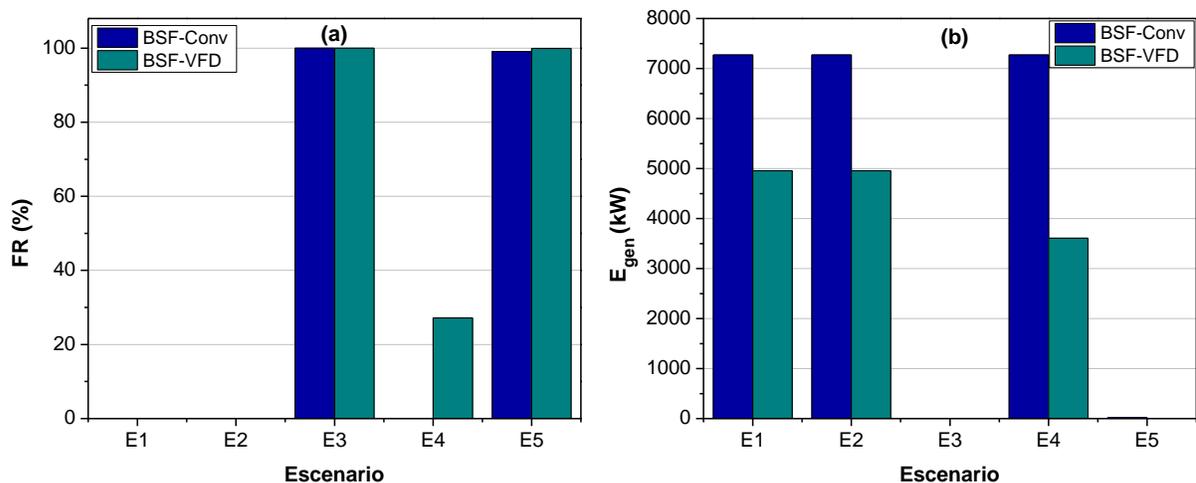


Figura. 34. Gráficas de los resultados de los indicadores energéticos obtenidos para cinco escenarios de los dos diferentes casos de BFS: (a) fracción renovable y (b) energía generada por el generador auxiliar.

Se puede observar de la Figura. 34(a) que los escenarios E3 y E5 presentan los valores más altos de fracción renovable alcanzando un valor máximo de 100 %. Por otra parte, el escenario E4 del caso con variador de frecuencia reportó un valor de FR correspondiente al 27.2 %. Este escenario corresponde a la combinación del sistema fotovoltaico con el generador auxiliar. El resultado anterior también indica que el variador de frecuencia permite el mejor uso del sistema fotovoltaico lo cual se refleja en el valor obtenido de FR, a diferencia del caso convencional donde el generador auxiliar aporta la máxima cantidad de energía requerida por el proceso y la participación del sistema fotovoltaico es nula. Finalmente, los escenarios E1 y E2 correspondientes al uso únicamente del generador auxiliar, y del generador con baterías de almacenamiento respectivamente demuestran que la ausencia del sistema fotovoltaico representa una fracción renovable del 0 % lo cual es de esperarse en estos escenarios. Por lo tanto, para una comparación más fiables es necesario emplear otro tipo de indicadores.

Por otra parte, la Figura. 34(b) reporta los resultados correspondientes a la producción de energía del generador auxiliar. Se puede observar que los escenarios predominantes corresponden al E1, E2 y E4 donde se espera un uso mayor del generador para el abastecimiento de la energía demandada por el proceso. Por otra parte, se aprecia que el caso con el variador de frecuencia reporta valores más bajos de E_{gen} a diferencia del caso convencional. El valor máximo obtenido para el caso convencional fue de 7270.8 kWh, mientras que para el caso con el variador de frecuencia fue de 1392.1 kWh. Estos resultados nuevamente demuestran que es conveniente la implementación de un variador de frecuencia en comparación con un bombeo solar fotovoltaico convencional, ya que los escenarios presentan un mejor desempeño de los indicadores energéticos del BSF. En general el escenario E3 fue el que reportó el mejor desempeño de ambos indicadores.

3.4.2 Resultados de la comparación del indicador ambiental

Los resultados de la cantidad de emisiones de dióxido de carbono correspondientes al indicador ambiental se presentan en la Figura. 35

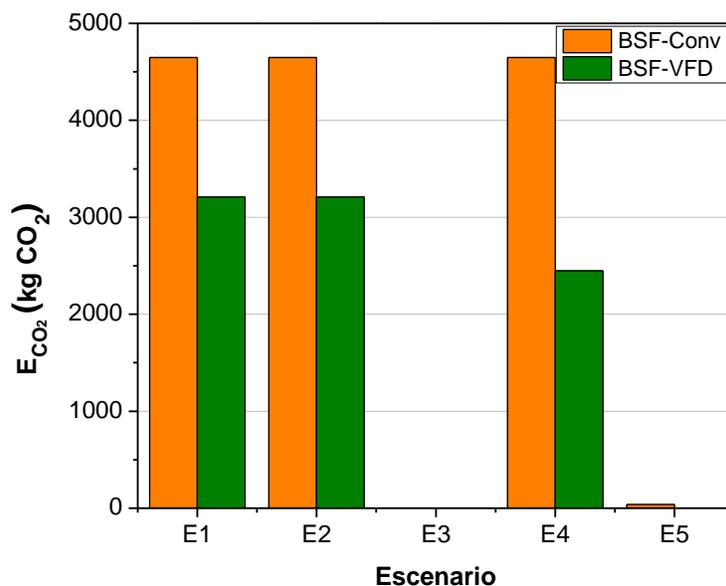


Figura. 35. Gráfica de los resultados correspondientes al indicador ambiental obtenidos para cinco escenarios de los dos diferentes casos de BSF.

Tal como se aprecia de la Figura. 35 se presentan resultados mayores del caso BSF-Conv, alcanzando un valor máximo de 4647.77 kg de CO₂ correspondiente a los escenarios E1, E2 y E4, mientras que el valor máximo obtenido del caso BSF-VFD fue de 3209.3 kg de CO₂ correspondientes a los escenarios E1 y E2. De igual manera se puede apreciar que el escenario E4 se mantiene igual que los escenarios E1 y E2 en el caso convencional, sin embargo, para el caso usando el variador de frecuencia la cantidad de emisiones de CO₂ disminuyen en este escenario en comparación con los escenarios E1 y E2. Esto indica que el variador de frecuencia tiene mayor presencia cuando se emplea la combinación de un sistema fotovoltaico y el generador auxiliar. No obstante, para cualquier escenario la disminución de las emisiones de dióxido de carbono se logra con el caso con variador de frecuencia lo cual es un resultado favorable y deseable para este indicador.

3.4.3 Resultados de la comparación de los indicadores económicos

Finalmente, en esta sección se reportan los resultados obtenidos de los indicadores económicos correspondientes al costo presente neto y al costo nivelado de energía.

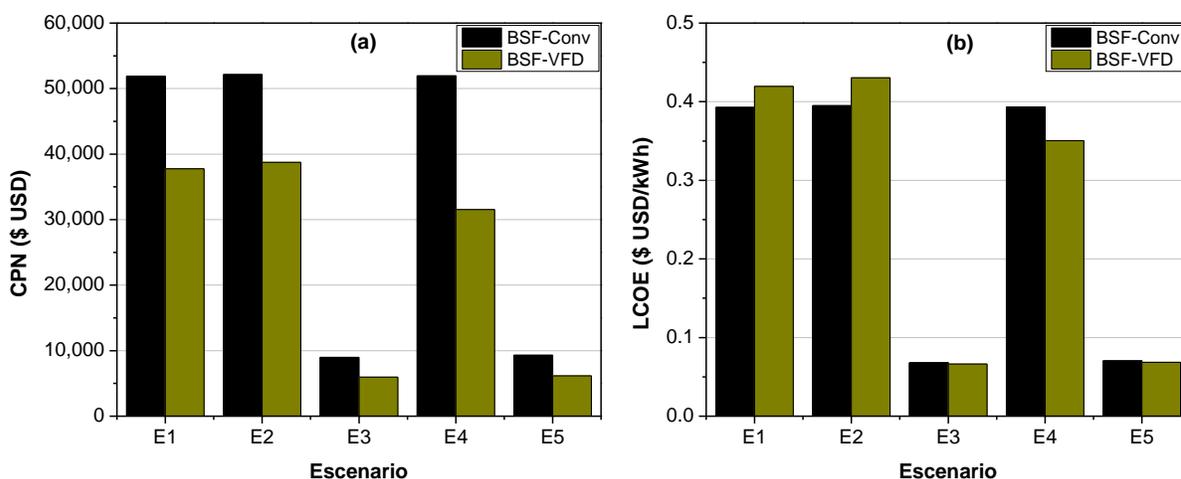


Figura. 36, Gráficas de los resultados de los indicadores económicos obtenidos para cinco escenarios de los dos diferentes casos de BSF: (a) costo presente neto y (b) costo nivelado de energía.

Tal como se observa de la Figura. 36(a) los valores del costo presente neto más bajos fueron obtenidos con los escenarios E3 y E5, alcanzando un valor mínimo de \$ 8,969.1 USD y \$ 5,972.3 USD para los casos BSF-Conv y BSF-VFD, respectivamente, los cuales corresponden al escenario del sistema fotovoltaico y baterías de almacenamiento. Por otra parte, los valores máximos fueron obtenidos con el escenario E2 que comprende el generador auxiliar y las baterías de almacenamiento. Debido a que de este indicador se desea un valor mínimo, se considera el escenario E3 como el mejor, específicamente el caso con el uso del variador de frecuencia. Por otra parte, la Figura. 36(b) reporta los resultados del costo nivelado de energía donde nuevamente los escenarios E3 y E5 presentan los resultados más deseables con valores mínimos obtenidos por el E3 correspondientes a 0.0679 y 0.0663 \$ USD/kWh, para el caso convencional y con variador de frecuencia, respectivamente. De igual manera se aprecia que para el LCOE los valores correspondientes al caso con variador de frecuencia para los escenarios E1 y E2 se encuentran por arriba del caso convencional. Esto indica que el costo de la energía cuando predomina el generador auxiliar incrementa incluso usando el VFD, no obstante, en el escenario óptimo (E3), la importancia del uso del variador de frecuencia es relevante, ya que se obtiene una diferencia de \$0.0016 USD/kWh, lo que implica un ahorro económico en la implementación de este sistema.

CAPITULO 4

4 ACEPTACIÓN SOCIAL

Como tales, los programas de aceptación social se consideran herramientas para integrar proyectos en contextos sociales. Es una metodología, cronología y plan de acción estratégico para la coordinación de escenarios y actores. Definir y ejecutar acciones para facilitar la comunicación y el relacionamiento entre las instituciones y los usuarios sociales, que permitan establecer nuevas metas y desafíos para satisfacer las necesidades adquiridas (Morán-Meza, 2022).

Con base a los resultados obtenidos del Capítulo 2. DIAGNÓSTICO DE LA COMUNIDAD y el Capítulo 3. DIMENSIONAMIENTO TÉCNICO, se realizaron talleres de capacitación y un manual para la operación del sistema con el fin de poner a la comunidad en contextos de las energías renovables y el sistema propuesto. De igual manera se realizó una encuesta de retroalimentación para identificar carencias en los sistemas instalados.

4.1 Talleres de capacitación

Para los talleres de capacitación se consideró el apoyo de un promotor originario de la comunidad que hablará lengua maya, debido a que hay gran porcentaje de la comunidad que habla lengua indígena, con el fin de mejorar la calidad de comunicación, de igual manera se consideró un lenguaje simple en las presentaciones para una mejor comprensión.

Se realizaron dos talleres, el primer taller consta de la presentación del proyecto ante la comunidad, conceptos básicos de las energías renovables, ventajas y desventajas, Figura. 37. El segundo taller fue de capacitación de operación de los equipos

instalados, consideraciones al momento de operarlos y posibles fallas debido a condiciones de sombreado entre otros factores, Figura. 38.



Figura. 37. Taller de presentación de propuesta..



Figura. 38. Taller de capacitación para la operación del sistema BSF.

Para el taller de capacitación en operación del sistema, se consideró que la comunidad participe en la operación del sistema, haciendo prácticas de arranque y paro, solución de posibles fallos y consideraciones al momento de utilizar el sistema, con el objetivo de una mejor experiencia en el uso del sistema y aprendizaje de este mismo.

4.2 Encuesta de satisfacción social

Se diseñó una encuesta para evaluar la experiencia de los productores con los sistemas BFS con el fin de obtener una retroalimentación sobre la complejidad de su uso, limitaciones y la cuestión de seguridad de dichos sistemas. Estos sistemas BSF son con control directo del VFD y no cuentan con un almacenamiento de respaldo o fuente externa. A continuación se presentan los resultados de la encuesta.

4.2.1 Horarios de operación

La primera pregunta de la encuesta son los intervalos de operación del sistema en sus actividades, donde el horario de operación varía para cada productor, en general la comunidad utiliza el sistema de bombeo desde las 8:00 hasta las 17:00. Con un promedio de uso de una hora por productor.

4.2.2 Actividades donde se utiliza el BSF

La principal actividad donde se utiliza el BSF es en la agricultura (92.31%), también en actividades de crianza de animales y apicultura, Figura. 39.

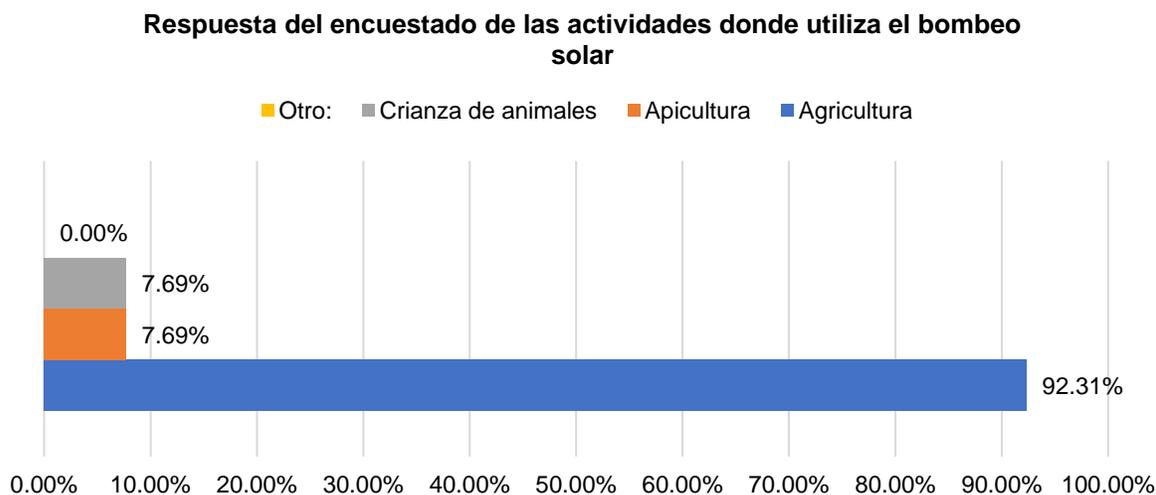


Figura. 39. Actividades donde se utiliza el BSF.

4.2.3 Expectativas del sistema BSF

De acuerdo con la encuesta, el 61.54% de los encuestados opina que el sistema BSF implementado sí resuelve sus necesidades pero sin más, el 23.08% considera que es útil pero hay mejores opciones y un 15.38% supera sus expectativas, Figura. 40.

Respuesta del encuestado si considera que el sistema de bombeo solar satisface sus necesidades para sus actividades en el campo

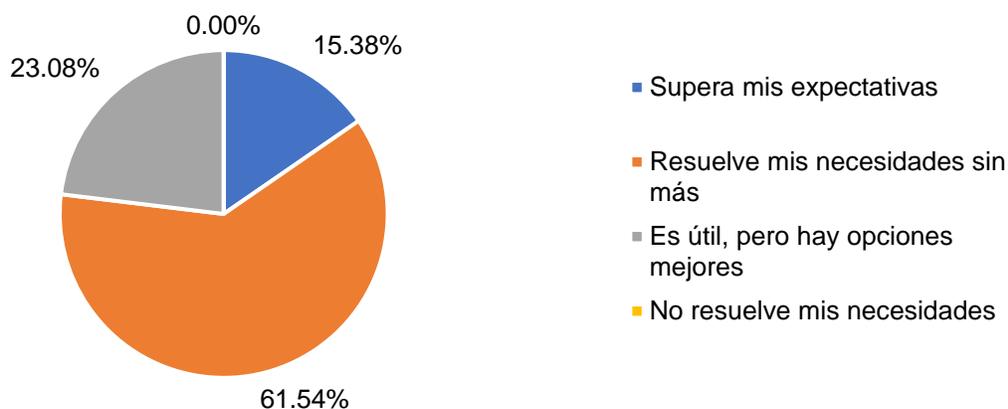


Figura. 40. Expectativas sobre el sistema BSF.

4.2.4 Limitaciones del sistema

El 61.54% de los encuestados considera que la mayor limitación del sistema BFS es el tiempo de operación, siguiendo con un 38.46% el factor de seguridad, y por último el 15.38% considera que el sistema es muy costoso, a pesar de estas limitaciones, un 15.38% considera que el sistema cumple con sus necesidades, Figura. 41.

Opinión del encuestado de las limitaciones que considera que tiene el sistema

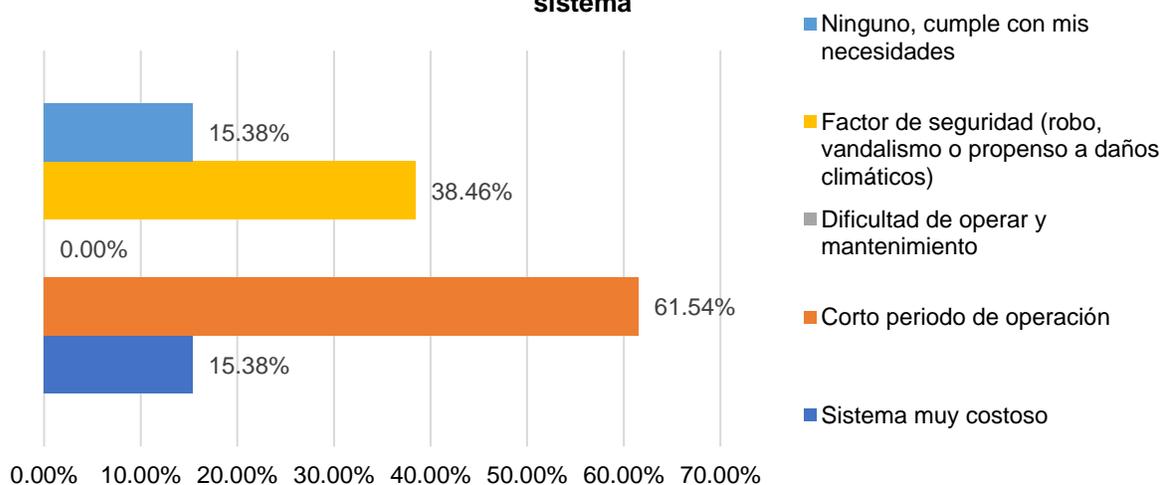


Figura. 41. Limitaciones del sistema.

4.2.5 Complejidad de operación del sistema BSF

La mayor parte de los encuestados considera un nivel de complejidad Fácil en la operación del sistema, el 15.38% considera una complejidad Regular y otra parte considera Muy fácil la operación del sistema BSF, se obtuvo 0.00% en los niveles Difícil y Muy difícil.

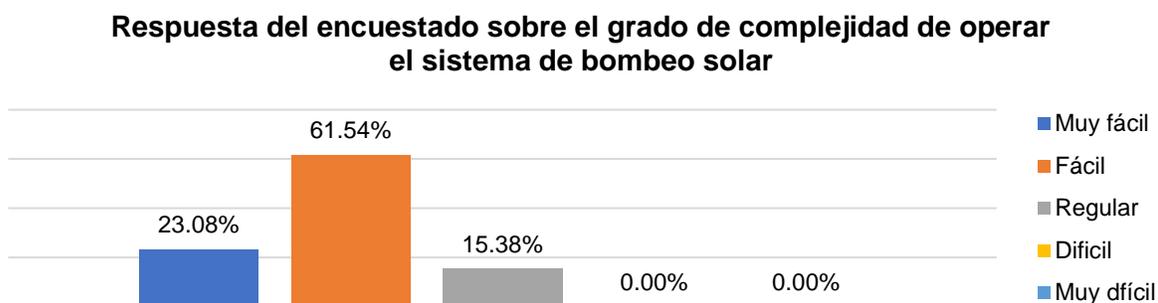


Figura. 42. Nivel de complejidad de operación del BSF.

4.2.6 Ahorro económico mensual

Se preguntó a los encuestados si el sistema BSF ha demostrado un ahorro económico mensual, el 100% contestó que Sí. Los porcentajes de las cantidades de ahorro se pueden ver en la Figura. 43.

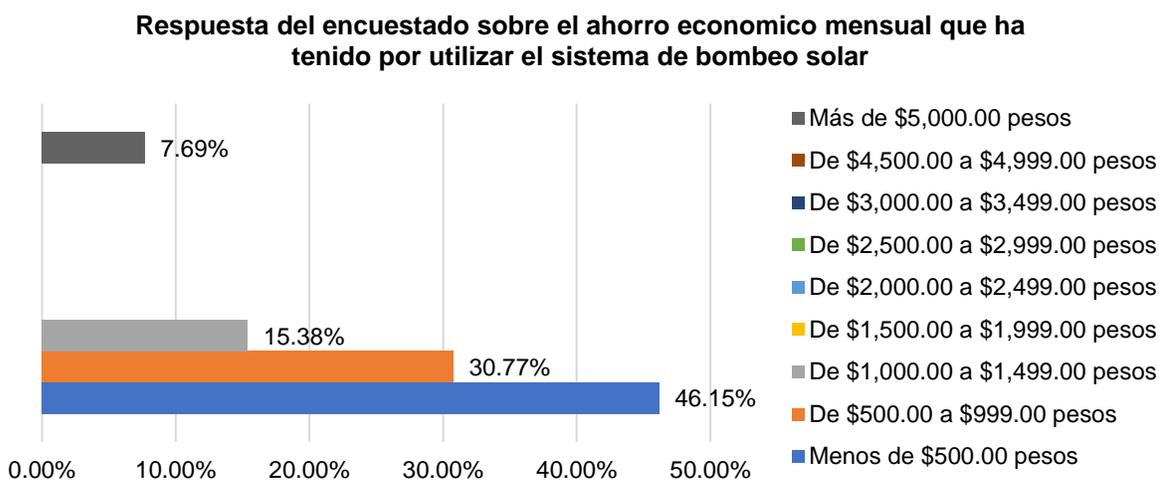


Figura. 43. Ahorro económico mensual.

4.2.7 Recomendación del sistema y participación en futuros proyectos sobre energías renovables

Con base a la experiencia del encuestado con el sistema BSF, son quienes conocen los beneficios y el funcionamiento de dicho sistema, se preguntó si recomendaría a un conocido esta tecnología, las respuestas fueron positivas entre posible y Seguro, Figura. 44.

Opinión del encuestado sobre si recomendaría a un conocido o colega para comenzar a usar los sistemas de bombeo solar

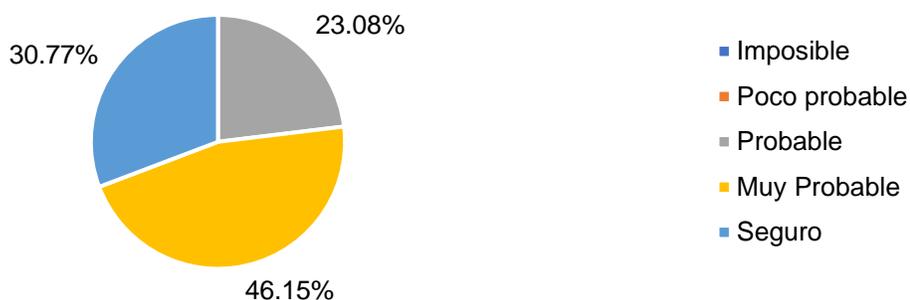


Figura. 44. Recomendación del sistema.

De igual manera, se preguntó al encuestado con base a su experiencia si participaría en algún otro proyecto de energías renovables, por lo que la mayoría respondió que Sí, sin embargo, una cantidad considerable considera que no volvería a participar con el 23.08%, Figura. 45.

Respuesta del encuestado sobre si volvería a participar en algún otro proyecto con respecto a las energías renovables

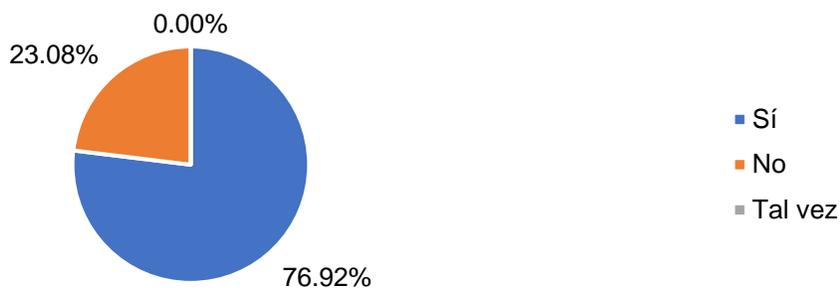


Figura. 45. Futura participación en proyectos sobre energías renovables.

4.2.8 Comentarios u observaciones

La última pregunta de la encuesta fue de carácter abierta, por lo que, cada encuestado comento con sus palabras sobre el sistema BFS. El principal tema fue la intermitencia de operación del sistema por nubosidad en el clima, alegando a que afecta su desempeño del sistema y su tiempo para trabajar. Los otros comentarios fueron sobre el ahorro económico y las actividades donde aprovechan este sistema.

4.3 Áreas de oportunidad

Con base a los resultados de la sección anterior, existen puntos positivos como la fácil operación del sistema, lo que, demuestra que los talleres de capacitación lograron transmitir la información necesaria para que los productores comprendan la operación del sistema, de igual manera hay que resaltar que el sistema BSF logró cumplir con las necesidades de los productores y si representan un ahorro económico mensual. Sin embargo, también se identifican áreas donde se pueden mejorar la implementación de un BSF.

4.3.1 Corto periodo de operación

Con base a los resultados de la encuesta, la limitación que más se presentaba era el corto de periodo de operación del sistema debido a condiciones de nubosidad, por lo que es necesario la implementación de un sistema de respaldo que al menos proporcione estabilidad en el sistema, de igual manera, es importante realizar una encuesta con preguntas específicas sobre el efecto de la nubosidad con el sistema, así como los horarios donde la nubosidad afecta el desempeño del sistema y que tipos de problemas genera la nubosidad con el sistema, ya que, el sistema existente son basados en bombeo solar fotovoltaico directamente al variador, por lo que la inversión para ese tipo de proyectos puede ser menor a los escenarios diseñados en el capítulo 3, ya que no cuentan con un sistema de almacenamiento, lo que no genera un costo.

4.3.2 Factor de seguridad

Se consideraron varios escenarios para el factor de seguridad: robo, vandalismo y daños por condiciones climáticas. Yucatán se encuentra en una región de huracanes y trombas, por lo que, es necesario considerar la redacción de un plan de contingencia para condiciones meteorológicas, donde el productor sea capaz de dismantelar el sistema y resguardarlo. En cuestión de robo y vandalismo, es importante realizar grupos de vigilancia, integrados por los beneficiarios para el cuidado del sistema.

4.3.3 Alto costos de los sistemas

De las tres áreas de oportunidad, este no depende totalmente de la comunidad. Es cierto que la comunidad puede aprovechar de los proyectos implementados para poder tener un ingreso económico y una referencia en la participación con proyectos renovables, sin embargo, son necesarios los apoyos gubernamentales para impulsar a las comunidades para el desarrollo y participación con proyectos renovables, considerando los aspectos sociales y características del lugar para que dichos proyectos tengan resultados positivos.

CONCLUSIONES

En este presente trabajo de tesis se realizó un análisis operacional para la implementación de un bombeo solar fotovoltaico considerando un enfoque integral para el estado de Yucatán, constó de un diagnóstico de la comunidad y simulaciones de diferentes escenarios para luego escoger el escenario con mejor factibilidad tecno-económica, con base a los resultados del diagnóstico y las simulaciones, promover la aceptación social.

La implementación de la encuesta CAP es una herramienta que permite obtener un contexto social de una comunidad y con base a los resultados generar un análisis más profundo de necesidades, para luego generar una cartografía energética que contenga los aspectos sociales relevantes de la comunidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las diferentes categorías de indicadores, se puede concluir que la mayoría los escenarios donde se consideró la implementación del variador de frecuencia (VFD) para un sistema BSF demostraron un mejor desempeño que el caso de un sistema BSF convencional y esto se debió a que el VFD permite la incorporación de una bomba con motor trifásico, que tienen un mejor rendimiento que los motores monofásicos siendo de la misma capacidad, y realizar los arranques con rampas de aceleración donde se varia el voltaje hasta llegar al nominal, evitando los picos de un arranque a tensión plena, lo que permite disminuir la potencia total al momento de escoger el generador auxiliar.

En general el escenario 3 compuesto del sistema fotovoltaico y las baterías fue el que demostró mejor desempeño y es el más adecuado para la implementación con el sistema de bombeo, ya que, esta combinación de BSF no emplea un generador auxiliar, y de acuerdo con los horarios de uso, es suficiente el sistema fotovoltaico integrado con las baterías de almacenamiento para satisfacer la energía que demanda el proceso. Los resultados indican que el escenario E3 con VFD es el que obtuvo mejor factibilidad tecno-económica, obteniendo el valor más alto de la fracción empleada de

la energía renovable, con un 100%, la generación de energía convencional por parte del generador, así como la cero cantidad de emisiones de dióxidos de carbono debido a que no requiere un generador auxiliar para cumplir con la demanda y de acuerdo con los indicadores económicos, se obtuvo el menor costo presente neto de \$5,972.30 USD y costo nivelado de energía de 0.0663 \$/kWh.

El escenario 5 obtuvo valor cercano al 100% de fracción empleada de energía renovable, debido a que este escenario consta de un sistema fotovoltaica, un generador auxiliar y sistema de almacenamiento con baterías, y esto se debe a que a pesar de incorporar un generador auxiliar, el uso de este es de una hora al año.

Finalmente se realizó una encuesta de satisfacción social a la comunidad, debido a que se implementaron sistemas BSF directo a un VFD sin sistema de almacenamiento por parte del proyecto PRONACES 319191. Con base a la encuesta de satisfacción social del capítulo 4, se obtuvo que impartición de talleres y capacitaciones generó resultados positivos debido a que se logró comunicar la información a la comunidad y esta consideró que la operación de un sistema BSF es en general fácil.

También se identificó que el sistema cuenta con limitaciones, las principales fueron: el corto tiempo de operación, el factor de seguridad y el alto costo que implica el sistema. Los encuestados mencionan que las condiciones de nubosidad baja el rendimiento del sistema haciendo más corto el tiempo de operación del sistema, por lo que la implementación de un BSF basados al escenario 3 sería la solución ideal para resolver esta limitación. En cuanto al factor de seguridad es necesario considerar la redacción de un plan de contingencia para condiciones meteorológicas, donde el productor sea capaz de desmantelar el sistema y resguardarlo. Por último, son necesarios los apoyos gubernamentales para impulsar a las comunidades para el desarrollo y participación con proyectos renovables, considerando los aspectos sociales y características del sitio para obtener resultados de éxito.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS A FUTURO

Se recomienda que al trabajar en proyectos sociales se consideren un nivel más alto de problemáticas sociales, como el panorama político, permisos ejidales para uso de terrenos, participación de alguna asociación civil o universidad. Debido a que estos factores externos de la comunidad ocasionan una desinformación, lo que conlleva a una mayor resistencia social.

Como trabajo a futuro se plantea el desarrollo de un modelo para la simulación de un bombeo solar fotovoltaico, operando únicamente con el variador de frecuencia y comparar con los BSF instalados por el proyecto PRONACES 319191, De igual manera aprovechando el recurso del PRONACES, se realizará un monitoreo de la interacción del productor y parámetros locales por medio de sensores, con el fin de desarrollar un control inteligente basado a las costumbres del productor.

REFERENCIAS

- Agyekum, E. B., Velkin, V. I., & Hossain, I. (2020). Sustainable energy: Is it nuclear or solar for African Countries? Case study on Ghana. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100630. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100630>
- Al-Ammar, E. A., Habib, H. U. R., Kotb, K. M., Wang, S., Ko, W., Elmorshedy, M. F., & Waqar, A. (2020). Residential community load management based on optimal design of standalone HRES with model predictive control. *IEEE Access*, 8, 12542–12572.
- Aliyu, M., Hassan, G., Said, S. A., Siddiqui, M. U., Alawami, A. T., & Elamin, I. M. (2018). A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87(February), 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.010>
- Articulación Yucatán. (2019, septiembre 3). *Arrasan megaproyectos con las tierras de comunidades y pueblos mayas*. <https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/013-2019-Geovisualizador-PY-en-M%C3%A9rida.pdf>
- Banco Mundial. (2017, noviembre 1). *Comunidades rurales alejadas de la red eléctrica logran acceso a electricidad en México*. Banco Mundial.
- Ben Ali, I., Turki, M., Belhadj, J., & Roboam, X. (2020). Systemic design and energy management of a standalone battery-less PV/Wind driven brackish water reverse osmosis desalination system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100884. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100884>
- Bright Samson. (2019). Design of A Small Scale Solar Powered Water Pumping System. *International Journal of Engineering Research and*, V8(03), 471–478. <https://doi.org/10.17577/ijertv8is030003>

Castillo, C. (2021, septiembre 18). Quedó en abandono la diversificación de cultivos en el sur de Quintana Roo. *Novedades Quintana Roo*. <https://sipse.com/novedades/quedo-en-abandono-la-diversificacion-de-cultivos-en-el-sur-de-quintana-roo-408656.html>

Changi. (2023). *Pure sine wave inverter*. Ali express. https://es.aliexpress.com/item/1005005307920928.html?spm=a2g0o.detail.0.0.627dab90z1st0C&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.291025.0&scm_id=1007.13339.291025.0&scm-url=1007.13339.291025.0&pvid=ab4a0ca5-e1bd-4114-85dc-44edd6c45bdf&_t=gps-id%3ApcDetailBottomMoreThisSeller%2Cscm-url%3A1007.13339.291025.0%2Cpvid%3Aab4a0ca5-e1bd-4114-85dc-44edd6c45bdf%2Ctp_buckets%3A668%232846%238108%231977&isseo=y&pd_npi=3%40dis%21MXN%2134903.64%2121291.22%21%21%21%21%21%402103200616848686517246514e4fc6%2112000032573826502%21rec%21MX%21&gatewayAdapt=glo2esp

CONAGUA. (2016). Volumen 41 Eficiencia Energética, Uso Eficiente y Ahorro de la Energía. En *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>

CONANP. (2019, marzo 29). *¿Sabes cuánta agua consumes?* Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <https://www.gob.mx/conanp>

Connor, R., & Miletto, M. (2022). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2022: aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible; resumen ejecutivo*.

Delta. (2023). *Variador Vfd17ams23ansaa Trifasico Delta 5 Hp 220 Ms300*. Mercado Libre. https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1313639330-variador-vfd17ams23ansaa-trifasico-delta-5-hp-220-ms300-_JM#position=2&search_layout=grid&type=item&tracking_id=f40aad6f-b2bd-4ac5-a340-a3c061879619

- Diario de Yucatán. (2019, septiembre 4). Proyectos arrasan comunidades. *Diario de Yucatán*. <https://www.yucatan.com.mx/merida/2019/9/4/proyectos-arrasan-comunidades-135961.html>
- El Mekaoui, A., Tariq, R., Ramírez, O. B., & Méndez-Monroy, P. E. (2020). Sustainability, sociocultural challenges, and new power of capitalism for renewable energy megaprojects in an indigenous Mayan Community of Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/SU12187432>
- evans. (2023a). *generador-5500 watts*. <https://evans.com.mx/generadores/emergencia/generador-5-500-w-g55mg1000thw.html>
- evans. (2023b). *generador-8500 watts*. <https://evans.com.mx/generadores/contractor-pro/generador-8-500-watts-g85mg1350bs.html>
- Gobierno de México. (2015). *COMPROMISOS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL PERIODO 2020-2030*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162974/2015_indc_esp.pdf
- Gobierno del Estado de Yucatán. (2024). *Ixil*. https://www.yucatan.gob.mx/estado/ver_municipio.php?id=39
- GOV.UK. (2022). *Government conversion factors for company reporting of greenhouse gas emissions*.
- Hao, J., Wang, J., Yu, D., Zhu, J., & Moattari, M. (2023). Fractional-order pathfinder algorithm for optimum design of an HRES based on photovoltaic and proton exchange membrane fuel cell: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.417>
- Harrouz, A., Belatrache, D., Boulal, K., Colak, I., & Kayisli, K. (2020). Social Acceptance of Renewable Energy dedicated to Electric Production. *9th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2020*, 283–288. <https://doi.org/10.1109/ICRERA49962.2020.9242904>

- Harvey, L. D. D. (2020). Clarifications of and improvements to the equations used to calculate the levelized cost of electricity (LCOE), and comments on the weighted average cost of capital (WACC). *Energy*, 207, 118340.
- Hirvonen, J., & Sirén, K. (2018). A novel fully electrified solar heating system with a high renewable fraction - Optimal designs for a high latitude community. *Renewable Energy*, 127, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.028>
- INECC. (2021). *Electrificación rural para comunidades fuera de la red utilizando generación de energía renovable con sistemas híbridos*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/690391/INFORME_Electrificacion_integrado18112021.pdf
- INEGI. (2021). *Censo de población y vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Microdatos>
- INEGI. (2024). *Estados Unidos Mexicanos - Mapas*. Mapas.
- IPCC. (2021, agosto 9). *Comunicado de prensa IPCC*. 1–5. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf
- IRENA. (2021). *ESTADÍSTICAS DE CAPACIDAD RENOVABLE 2021*. www.irena.org
- Jahangir, M. H., & Cheraghi, R. (2020). Economic and environmental assessment of solar-wind-biomass hybrid renewable energy system supplying rural settlement load. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100895. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100895>
- Korpale, V. S., Kokate, D. H., & Deshmukh, S. P. (2016). Performance Assessment of Solar Agricultural Water Pumping System. *Energy Procedia*, 90(December 2015), 518–524. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.219>
- Kumar, R., & Channi, H. K. (2022). A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131347.

- Li, G., Jin, Y., Akram, M. W., & Chen, X. (2017). Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(December 2016), 440–458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.055>
- Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. En *Energy Reports* (Vol. 6, pp. 1312–1327). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.013>
- Mas Consulting. (2014). *La pobreza energética: Análisis y soluciones*.
- Mendenhall, W., Beaver, R. J., & Beaver, B. M. (2006). *Introducción a la probabilidad y estadística*. <http://latinoamerica.cengage.com>
- Morán-Meza, E. P. (2022). *Estudio de aceptación social y las nuevas fuentes de energías renovables* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22794/1/UPS-GT003815.pdf>
- Muralidhar, K., & Rajasekar, N. (2021). A review of various components of solar water-pumping system: Configuration, characteristics, and performance. En *International Transactions on Electrical Energy Systems* (Vol. 31, Número 9). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13002>
- Naciones Unidas. (2022, marzo 21). *Las aguas subterráneas pueden ser la solución a las crisis hídricas si se gestionan correctamente*. <https://news.un.org/es/story/2022/03/1505842>
- Noorollahi, Y., Khatibi, A., & Eslami, S. (2021). Replacing natural gas with solar and wind energy to supply the thermal demand of buildings in Iran: A simulation approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 101047. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101047>
- PowMR. (2023). *Controlador de carga solar MPPT*. Ali express. https://es.aliexpress.com/item/1005004570459504.html?spm=a2g0o.productlist.main.19.394d285fZPKsEh&algo_pvid=2cb3c8d0-9b3d-43c6-853e-

8ca8ea5531e9&algo_exp_id=2cb3c8d0-9b3d-43c6-853e-8ca8ea5531e9-9&pdp_npi=3%40dis%21MXN%213929.72%212324.11%21%21%21%21%21%21%40211bf12316848693872594802d07ae%2112000029677957193%21sea%21MX%210&curPageLogUid=yAYo4NzEceNO

- Raghuwanshi, S. S., & Arya, R. (2020). Reliability evaluation of stand-alone hybrid photovoltaic energy system for rural healthcare centre. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100624. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100624>
- Ramesh, M., & Saini, R. P. (2020). Dispatch strategies based performance analysis of a hybrid renewable energy system for a remote rural area in India. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120697>
- Saiprasad, N., Kalam, A., & Zayegh, A. (2018). Comparative study of optimization of HRES using HOMER and iHOGA software. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 77(12), 677–683.
- SEFOET. (2024). *Ixil*. <http://www.sefoet.yucatan.gob.mx/secciones/ver/ixil#:~:text=El municipio de Ixil ocupa una superficie de 134.13 Km2.&text=Toda la superficie del territorio,el extremo norte existen playas.&text=En el territorio municipal no existen corrientes superficiales>.
- Setiawan, A. A., Purwanto, D. H., Pamuji, D. S., & Huda, N. (2014). Development of a solar water pumping system in karsts rural area tepus, gunungkidul through student community services. *Energy Procedia*, 47, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.190>
- Sharma, K. K., Gupta, A., Kumar, R., Chohan, J. S., Sharma, S., Singh, J., Khalilpoor, N., Issakhov, A., Chattopadhyaya, S., & Dwivedi, S. P. (2021). Economic evaluation of a hybrid renewable energy system (HRES) using hybrid optimization model for electric renewable (HOMER) software-a case study of rural India. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(3), 814–821. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab012>

- Solarever. (2023). *Panel solar 455 W - 450 W*. Mercado Libre. https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1893963092-panel-solar-455w-450w-_JM#position=29&search_layout=grid&type=item&tracking_id=799784b0-3fc6-48ff-9e34-36eb72dfdf5
- Sontake, V. C., & Kalamkar, V. R. (2016). Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1038–1067. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021>
- Sreeraj, E. S., Chatterjee, K., & Bandyopadhyay, S. (2010). Design of isolated renewable hybrid power systems. *Solar Energy*, 84(7), 1124–1136. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.03.017>
- Temiz, M., & Dincer, I. (2021). Enhancement of solar energy use by an integrated system for five useful outputs: System assessment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100952.
- Trojan. (2023). *Trojan SAGM 12 105 12V 105 AH AGM Battery*. Solar biz. <https://www.thesolarbiz.com/trojan-sagm-12-105-12v-105-ah-agm-battery.html>
- Udeh, G. T., Michailos, S., Ingham, D., Hughes, K. J., Ma, L., & Pourkashanian, M. (2022). A modified rule-based energy management scheme for optimal operation of a hybrid PV-wind-Stirling engine integrated multi-carrier energy system. *Applied Energy*, 312, 118763.
- Villareal. (2023, mayo). *Equipos y accesorios sumergibles*. Villareal División de Equipos. <https://heyzine.com/flip-book/54885fab5a.html#page/2>
- WEC. (2020). *World Energy Trilemma Index*. www.worldenergy.org