

SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO CON SEGUIDOR SOLAR COMO PROPUESTA A LA POBREZA ENERGÉTICA DE LOS HOGARES DE TECAXIC, TOLUCA

Alexander Aguero Shkurenkov¹, Bernd Weber²

RESUMEN

Las necesidades energéticas insatisfechas de los hogares, y la transición a energías limpias, son retos abordados en los objetivos de desarrollo sostenible, particularmente el objetivo siete pretende lograr energía asequible y no contaminante. Asimismo, el objetivo de este documento es evaluar la incidencia del sistema fotovoltaico autónomo con seguimiento solar [SFASS] en un hogar con pobreza energética de la comunidad de Tecaxic, Toluca, Estado de México. En la metodología se utilizó un cuestionario estructurado para valorar la existencia de vulnerabilidad o de pobreza energética, y se aplicó a una muestra de 86 personas, eligiendo una vivienda de una de estas personas para implementar el SFASS. Los resultados muestran que la satisfacción de necesidades energéticas de los hogares principalmente fue afectada por la pandemia donde 63 hogares aumentaron su consumo energético, 53 hogares tuvieron retrasos en los pagos de electricidad a CFE, y en los pagos del agua; sin embargo, el 100% de los hogares previo y durante la pandemia no tienen confort térmico. En el caso del hogar seleccionado a partir de que se instaló el SFASS, satisface sus necesidades energéticas. Se concluye que el SFASS es una alternativa a la pobreza energética en la comunidad rural de Tecaxic.

Palabras clave: Energía solar; necesidades energéticas; autonomía energética; pobreza energética; hogares de Tecaxic.

AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH SOLAR TRACKER AS A PROPOSAL IN THE FACE OF ENERGY POVERTY IN THE HOUSEHOLDS OF TECAXIC, TOLUCA

ABSTRACT

The unmet energy needs of households and the transition to clean energy, are challenges addressed in the Sustainable Development Goals; in particular, goal seven which aims to achieve affordable and clean energy. Subsequently, the objective of this paper is to evaluate the use of the autonomous photovoltaic system with solar tracking [APSST] in a household with energy poverty in the community of Tecaxic, Toluca, State of Mexico. The methodology made use of a structured questionnaire to assess the existence of energy vulnerability or energy poverty, and was applied to a sample of 86 people. One of these households was chosen to implement the APSST. The results show that the ability of households to meet their energy needs was mainly affected by the pandemic, during which 63 increased their energy consumption, and 53 had delays in electricity payments to CFE, and in water payments; 100% of households before and during the pandemic did not have thermal comfort. In the case of the selected household, following the installation of the APSST, its energy needs were satisfied. It was concluded that the APSST is a solution to energy poverty in the rural community of Tecaxic.

Key words: Solar energy; energy needs; energy autonomy; energy poverty; Tecaxic households.

¹ Egresado del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. E-mail: alexander.shkurenkov@gmail.com

² Profesor-investigador de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. E-mail: bweber@uaemex.mx

1. INTRODUCCIÓN

El consumo y abastecimiento de energía es una de las preocupaciones en la política, en el área científica, en los organismos gubernamentales y no gubernamentales, algunas razones de ello son: 1) la demanda energética y su relación con el crecimiento poblacional (SÁNCHEZ, 2012); 2) los problemas de salud vinculados con la falta de confort térmico en los hogares (GARCÍA, 2014); 3) particularmente en México hay un déficit de producción de energía aunado a una dependencia energética con Estados Unidos de América (MARTÍN-CULLELL, 2021); 4) el sector energético aporta el 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero [GEI] mundiales; en América Latina y el Caribe el 45% de sus emisiones provienen de este sector (GLIGO *et al.*, 2020).

Dentro de los problemas asociados al consumo de energía, está el desabasto de energía que existe en los hogares de comunidades rurales, lo cual pone de manifiesto la pobreza energética, uno de los efectos de tal fenómeno es que desencadena problemas de salud dado que las personas en el intento de satisfacer sus necesidades básicas recurren a fuentes de energía contaminantes y dañinas para su salud. El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD] dice que casi un tercio de la población mundial cocina usando combustibles contaminantes e insalubres (PNUD, s. f.).

La Agencia Internacional de Energía Renovable (AIER o IRENA) (2022) indica que en 2020 aproximadamente 2.4 billones de personas (un tercio de la población global) no cuentan con acceso a combustibles y tecnologías limpias para cocinar. Respecto a México, el 11% de las viviendas emplea leña o carbón (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2018), los habitantes de estas viviendas se encuentran en un estado vulnerable de sufrir enfermedades respiratorias, ya que las partículas del humo de la leña tienen el potencial de agravar los síntomas de asma o desencadenarla; también puede ocasionar infartos de miocardio, provocar un ritmo cardíaco irregular, insuficiencia cardíaca, bronquitis, etc. Los humanos más afectados por estas partículas son: niños, adolescentes, adultos mayores, mujeres embarazadas y personas con enfermedades pulmonares (KIM *et al.*, 2018).

La combustión de leña, a nivel ambiental contribuye a las emisiones de GEI; además, la extracción de madera causa a los bosques deforestación, daños irreversibles a la biodiversidad, intensifica el cambio climático y la pérdida de bosques reduce el potencial para capturar y retener carbono (BÁRCENA *et al.*, 2020). Lo anterior implica que, a menor cantidad de árboles, más dióxido de carbono en la atmósfera. Por su parte, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] (s. f.) elaboró un perfil energético nacional de México e indica que 17% de la población usa leña o derivados, carbón y kerosene (parafina o petróleo) para la cocción de alimentos, en zonas rurales 50% de esta población recurre a estos combustibles. Aunque México no se encuentra entre los países con alta huella ecológica, su biocapacidad no es la adecuada para regenerar los recursos que toman los habitantes del ecosistema (CHANONA *et al.*, 2019). Según el World Wide Fund For Nature [WWF] (2022) indica que los humanos están sobre utilizando el planeta como si se estuviera viviendo de 1.75 Tierras.

Otro tipo de energía relevante en el estudio en cuestión es la eléctrica, a nivel mundial en el 2020 se registró que 733 millones de personas no tienen acceso a esta (IRENA, 2022). Para el caso de México, la CEPAL indica que el 1.96% de la población rural no cuenta con electricidad, por lo que en los hogares no hay posibilidad de refrigerar los alimentos, iluminar sus habitaciones adecuadamente, tener confort térmico, entre otras cosas, lo cual impacta negativamente en la alimentación, salud, educación y trabajo de los humanos (BRIDGE *et al.*, 2016).

Tanto la calidad de la energía como no tener la posibilidad de acceder a la electricidad son indicadores relacionados a la pobreza energética, y a la desigualdad de género (BOUZAROVSKI y PETROVA, 2015). En cuanto a acciones para contrarrestar la pobreza energética, en Inglaterra su legislación puso en marcha en 2001 la Estrategia Nacional de Pobreza de Combustible donde el objetivo fue erradicarla en el 2016 (HOUSE OF COMMONS, 2010, como se citó en GARCÍA-OCHOA y GRAIZBORD, 2016). Otras propuestas en Europa fueron la creación del observatorio de la pobreza energética, y los estados miembros intercambian conocimientos de buenas prácticas; a su vez este observatorio refuerza la participación social en el desarrollo de los planes nacionales de energía y clima (Asociación de Ciencias Ambientales [ACA], s. f.-a). En febrero de 2022, la Asociación de Ciencias Ambientales implementó la Semana Europea de la Pobreza Energética con la finalidad de fomentar el debate, y la colaboración; así como exponer esta condición (ACA,

s. f.-b).

En América Latina, el país chileno desarrolló el Programa de Inclusión Energética e Hídrica [PIE], que implementa “acciones concretas que permitan mejorar las condiciones energéticas en hogares vulnerables, y su entorno socio-productivo bajo modelos de negocio innovadores y adaptados a la realidad territorial fortaleciendo el desarrollo económico local y la inserción laboral” (PIE, s. f.); uno de los proyectos de este programa es llamado Juan Fernández, consiste en apoyar a una comunidad pesquera artesanal en las islas Robinson Crusoe y Alejandro Selkirk con un sistema de refrigeración alimentado por energía solar fotovoltaica para conservar productos marinos. También Chile creó la Red de Pobreza Energética [RedPE] que es una plataforma de colaboración transdisciplinaria de académicos, investigadores, estudiantes, instituciones públicas y privadas y organizaciones de la sociedad civil que enfrentan la pobreza energética (REDPE, s. f.).

Respecto a México, existe el Observatorio de Pobreza Energética [OPEM] (s. f.) cuyo objetivo es difundir el conocimiento acerca de pobreza energética, y crear redes de colaboración para investigar, y combatir la pobreza energética; sin embargo, a diferencia de Europa, el OPEM sólo opera a nivel virtual. En México se registró el uso de energías por hogares hasta el 2017, cuando el INEGI en colaboración con la Secretaría de Energía [SENER] y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE] levantaron la primera Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares [ENCEVI]. Los resultados de la ENCEVI indican que 99.6% de las viviendas habitadas en México cuentan con energía eléctrica de las cuales sólo 0.25% usan energía solar, específicamente el 0.15% de las viviendas tienen panel solar y están conectadas a la red pública³, mientras que el 0.10% tienen panel solar, es decir, adquirieron un sistema fotovoltaico autónomo [SFA]. También la encuesta refiere que los equipos que consumen energía en las viviendas son: estufa, refrigerador, lavadora, plancha, televisión, ventiladores, aire acondicionado, calefacción y calentador de agua. Se observa que el uso de la electricidad para cocción o calentamiento de alimentos en la región cálida extrema es de 1.4%, en la región templada donde se ubica la localidad de interés para este estudio es de 1.5%, y en la región tropical es de 1.0% (INEGI, 2018).

Un estudio sobre pobreza energética en México elaborado por GARCÍA (2014), indica que el Estado de México se posiciona en el cuarto lugar con un 27.9% de las viviendas con esta condición. Mientras que en el índice estatal de pobreza energética propuesto por GARCÍA-OCHOA y GRAIZBORD (2016), el 33.2% de las viviendas de la entidad se encuentran en pobreza energética; en este estado se ubica la comunidad del presente estudio, perteneciente al municipio de Toluca.

Una de las alternativas ante la pobreza energética es optar por la energía solar dado que es la más abundante de la tierra, por ejemplo, 1 hora de radiación solar absorbida en la atmósfera satisface la demanda global energética de 1 año (RANABHAT *et al.*, 2016). Por tal razón se investiga el desarrollo de sistemas eficientes y económicamente viables que convierten la energía proveniente del sol en energía eléctrica; en este sentido, el sistema fotovoltaico es una opción de energía limpia, y tiene bajos costos de mantenimiento a diferencia de otras plantas convertidoras de energía eléctrica convencionales que usan carbón, gas, energía nuclear, etc. (RANABHAT *et al.*, 2016).

Así las cosas, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la incidencia del SFASS en un hogar con pobreza energética de la comunidad de Tecaxic, Toluca, Estado de México. A continuación, se mencionan los apartados que integran el estudio: conceptualizaciones de la pobreza energética, características y diferencias de los sistemas fotovoltaicos y seguidores solares; posteriormente, se indican algunas características generales de la comunidad de Tecaxic, luego se alude a la metodología empleada donde se describe cómo se realizó el dimensionamiento del SFA y el diseño del seguidor. Después, se muestran los resultados junto con la discusión y, por último, se presentan las conclusiones de esta investigación.

³ Las viviendas tienen un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad [CFE].

1.1. CONCEPTUALIZACIONES DE LA POBREZA ENERGÉTICA

La discusión científica en torno al concepto de pobreza energética es diferente en cada país dadas las características de cada uno (SOKOLOWSKI *et al.*, 2020), así como su posición geográfica y climas (BOUZAROVSKI y PETROVA, 2015). Por su parte M. D. BAUTISTA-CRUZ (comunicado personal, 14 de abril de 2020) refiere otros factores que influyen en la satisfacción plena de las necesidades energéticas de los hogares, por ejemplo: costumbres y creencias de la localidad respecto al uso de energías primarias específicas, percepción sociocultural sobre la preferencia del consumo de ciertos tipos de energía, y el desconocimiento de los bienes materiales idóneos para satisfacer las necesidades energéticas a un menor costo; agrega que las necesidades no son las mismas en cada región, y comunidad, además, cambian de generación en generación.

En otras palabras, las maneras de satisfacción de las necesidades energéticas están vinculadas con las culturas, y el desarrollo de las sociedades, la ciencia y la tecnología; por ejemplo, en Rusia el estudio de ELISEEVA (2013) propone que la pobreza energética es una forma de privación, que aunada a la falta de ingresos y recursos puede considerarse acumulativamente como vivir en pobreza.

En España, la ACA identifica que en las definiciones clásicas de pobreza energética existen 3 factores fundamentales que causan tal condición, los cuales son: bajos ingresos del hogar, insuficiente calidad energética de la vivienda y precios elevados de la energía; otros factores también considerados son los gastos invertidos para climatizar la vivienda, la iluminación, los electrodomésticos de la cocina, consumo del agua caliente sanitaria y demás necesidades del hogar (ACA, s. f.-a).

Por su parte Chile, mediante la Red de Pobreza Energética [RedPE] realizó una investigación para identificar su estándar nacional respecto al acceso a energía de calidad basándose en tres dimensiones: alimentación e higiene, iluminación y dispositivos electrónicos, y climatización de la vivienda. Los resultados de la RedPE muestran que existe una brecha en la información sobre la pobreza energética, y propone una guía para la generación de datos con la finalidad de ayudar a comprender y enfrentar la pobreza energética. Asimismo, la investigación consideró los Objetivos de Desarrollo Sostenible para promover el desarrollo sustentable, equitativo y resiliente (COMUNICACIONES REDPE, 2019).

En México, a partir de la base de datos que proporcionó INEGI en el Módulo de Condiciones Socioeconómicas de la Encuesta Nacional de Ingreso y Gasto de los Hogares [ENIGH], GARCÍA-OCHOA y GRAIZBORD (2016) hicieron un análisis en el que correlacionan la dimensión espacial y regional con la dimensión de la pobreza energética, indicando en sus resultados que aproximadamente el 37% de los hogares mexicanos se encuentran en pobreza energética, estos se ubican en los siguientes estados: Chiapas con 74%, Guanajuato con 64.1%, Yucatán con 43.6%, el Estado de México con 27.9% y Ciudad de México con 15.6%; agregan que la geografía de la pobreza energética evidencia la existencia de diferencias espaciales y regionales importantes vinculadas con los niveles de rezago social de la población. Mientras que ELISEEVA (2013) en su investigación propone que la pobreza energética es una forma de privación, y correlaciona las dimensiones espacial y regional.

Según BERTINAT y CHEMES (2020), las personas que viven en pobreza en América Latina y el Caribe destinan el 9% de sus ingresos al pago de servicios para satisfacer sus necesidades energéticas, mientras que las personas con mayor poder adquisitivo no le dedican más del 3%. En este mismo sentido, la ACA (s. f.-a) indica que un factor de pobreza energética son los bajos ingresos en los hogares, a lo que se suma el efecto de la pandemia, particularmente en América Latina y el Caribe se acentuó sobre todo en la población pobre, para ilustrarlo, en México las personas que ya vivían en pobreza pasaron a pobreza extrema dado que muchos trabajadores formales fueron despedidos, y otros no recibieron aumentos de sueldo (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2020).

Ciertamente los estudios sobre pobreza energética son recientes, y seguramente con el tiempo se desarrollarán mejores indicadores para medir la pobreza energética; mientras, el presente estudio se basó en los indicadores referidos por la ACA y la RedPE. Los indicadores son un punto de referencia al pretender identificar las necesidades energéticas, pero insuficiente, por lo que en esta investigación también se midió la cantidad de energía eléctrica consumida y su potencia activa con la finalidad de obtener datos que guían el dimensionamiento del SFASS.

1.2. CARACTERÍSTICAS Y DIFERENCIAS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Un sistema solar fotovoltaico o sistema fotovoltaico [SF] es un conjunto de dispositivos eléctricos y electrónicos que se encargan de convertir energía solar en energía eléctrica útil para una carga (PERPIÑÁN, 2020). El concepto de carga hace referencia a todo lo que se desea alimentar con energía eléctrica convertida por el SF, puede ser un refrigerador, una televisión, focos, cargadores de celular, una casa, conjunto de casas, una ciudad, etc. Los SF se pueden clasificar de la siguiente manera: sistema fotovoltaico conectado a red [SFCR] y sistema fotovoltaico autónomo [SFA] (CASTEJÓN y SANTAMARÍA, 2010; PERPIÑÁN, 2020). El SFCR tiene una conexión a la red eléctrica nacional, por ejemplo, en México, el SF se conectaría a la red de CFE con la finalidad de obtener energía eléctrica cuando los paneles no suministren suficiente energía a la carga incluyendo las baterías (en caso de que la vivienda cuente con estas). La interconexión a la red eléctrica de CFE también permite inyectarle energía eléctrica a esta, y obtener algún beneficio económico. Por su parte, el SFA no está conectado a la red eléctrica nacional y precisa del uso de baterías para acumular la energía necesaria, esto aplica en los momentos en que los paneles no proporcionan lo suficiente, o en los lapsos de las noches (CASTEJÓN y SANTAMARÍA, 2010; PERPIÑÁN, 2020).

Por lo general, un SFA tiene los siguientes componentes (CASTEJÓN y SANTAMARÍA, 2010; PERPIÑÁN, 2020): panel solar o módulo fotovoltaico, controlador de carga o regulador de carga, inversor y un acumulador de energía. Las principales características de estos componentes son las siguientes:

- a) Panel solar o módulo fotovoltaico: consiste en un conjunto de celdas solares conectadas eléctricamente en serie y/o en paralelo, encargadas de convertir la radiación solar en energía eléctrica cuya corriente es de naturaleza continua (PERPIÑÁN, 2020). Las celdas solares pueden ser descritas como placas delgadas que aprovechan el efecto fotoeléctrico para convertir la energía solar en energía eléctrica. En la actualidad, hay celdas de varios materiales, los más usados son de silicio monocristalino y silicio policristalino. Las celdas de silicio monocristalino tienen una estructura cristalina uniforme, y son más eficientes en convertir la radiación solar en energía eléctrica, a diferencia de las celdas de silicio policristalino las cuales poseen una estructura no uniforme, y son más económicas (CASTEJÓN y SANTAMARÍA, 2010).
- b) Controlador de carga o regulador de carga: Es un aparato eléctrico que estabiliza el voltaje variable de los paneles a un voltaje fijo, decide si la energía eléctrica que proveniente de los paneles se usará para suministrar a la carga o si se almacenará, por ejemplo, en las noches, el controlador de carga utiliza la energía almacenada para suministrarla a la carga, también tiene distintos tipos de protecciones eléctricas y térmicas que protegen a los componentes conectados al controlador (CASTEJÓN y SANTAMARÍA, 2010).
- c) Inversor: Se encarga de convertir la corriente continua proveniente del controlador de carga en corriente alterna a una frecuencia, y voltaje determinado por cada país (CASTEJÓN y SANTAMARÍA, 2010; PERPIÑÁN, 2020). En el caso de México, la frecuencia es de 60 Hz y el voltaje es 127 V. La corriente alterna es una forma de transporte de energía eléctrica, la más usada comúnmente en las viviendas para alimentar el refrigerador, un microondas, una computadora, una licuadora, etc.
- d) Acumulador de energía: Por lo general se usan baterías recargables electroquímicas con tecnología de ácido-plomo para almacenar la energía (PERPIÑÁN, 2020). Actualmente surgieron nuevas baterías que usan el ión litio, este tipo de baterías tienen una alta eficiencia de carga y descarga y su tiempo de vida es mayor a las baterías de ácido-plomo; pero, su desventaja es su alto costo y son sensibles a las sobretensiones y al sobrecalentamiento (SANTILLÁN, 2016). Para esta investigación se usó una batería con tecnología de fosfato de litio y hierro sin cobalto.

Respecto a la implementación de los SF, la Agencia Internacional de Energía Renovable [IRENA] (2019) indica que los SFA contribuyen en el desarrollo humano, ya que empoderan a comunidades, mejoran el bienestar de las personas, pues son un medio para una vida sostenible, y brindan acceso a servicios públicos como electricidad, agua, etc.; además, las energías renovables fuera de la red permiten una resiliencia climática, y son sostenibles desde el punto de

vista medioambiental dado que reducen las emisiones de CO₂ así como la contaminación, y otros beneficios relacionados. En el aspecto económico permiten la creación de trabajos locales, y desarrollo de habilidades. En este mismo sentido, las Naciones Unidas [ONU] (s. f.) aluden en los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030, particularmente en el objetivo 7 al acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.

En otros países como Colombia se desarrolló un proyecto (ARRIETA *et al.*, 2012) que consistió en la implementación de un SFA en una zona que no contaba con el servicio de energía eléctrica; concluyeron que llevar a la práctica proyectos vinculados a SFA en dichas zonas mejoran la calidad de vida de las personas. En el continente africano, un estudio realizado en 4 distritos rurales de Etiopía (WASSIE y ANDARAMOLA, 2020) indica que los SFA proporcionan iluminación limpia y de calidad, así como acceso a energía eléctrica básica, a la vez, redujeron en un 81.6% el consumo de queroseno de los hogares estudiados.

La desventaja de los SFA es el costo dado que necesitan utilizar algún dispositivo que guarde energía para ser convertida en energía eléctrica para la casa durante las noches, o en épocas de lluvias donde las nubes bloquean parte de la radiación solar. En el caso de México, las desventajas de los SFCR de CFE es la volatilidad del costo de la electricidad, y disponibilidad de los combustibles fósiles usados por los convertidores de energía eléctrica del país (STRATEGY&, 2019). En la actualidad, el suministro de combustibles fósiles es inestable por la situación del conflicto bélico, también lo puede inestabilizar la actividad terrorista, las decisiones políticas tomadas en el extranjero (BENTLY *et al.*, 2019), y por problemas ambientales como lo ocurrido en México con el déficit de energía causado por la congelación de tubos de gas natural en Texas, Estados Unidos (MARTÍN-CULLELL, 2021). También, existe la posibilidad de ataques físicos o ciberataques que pueden inutilizar o inhabilitar el sistema eléctrico nacional (BAHILL y CHAVES, 2013).

Geográficamente los SFCR no son factibles en islas, zonas remotas, zonas a las que no ha llegado la red, o la falta de acceso a una red por razones políticas (BENTLY *et al.*, 2019). Referente a problemas técnicos, existe la posibilidad de que al equipo del SFCR se dañe por un cortocircuito a tierra en la red de distribución (BAHILL y CHAVES, 2013).

1.3. SEGUIDORES SOLARES

Por las características de los SF y las características de la comunidad de Tecaxic que está clasificada como zona rural, se optó por un SFA con seguidor solar [SFASS]. El seguidor solar es un dispositivo que mueve los módulos fotovoltaicos en dirección al sol aumentando la cantidad de energía captada por estos módulos durante el día (AL-ROUSAN *et al.*, 2018; PERPIÑÁN, 2020).

Existen varias propuestas para clasificar a los seguidores solares (AL-ROUSAN *et al.*, 2018), a grandes rasgos se pueden dividir en seguidores activos y seguidores pasivos. Los seguidores solares activos [SSA] son aquellos que siguen al sol mediante motores, engranes, microcontroladores, sensores, entre otras cosas, por ejemplo, hay sensores que buscan al sol, y hay algoritmos que obtienen la posición del sol. Mientras que los seguidores pasivos [SP] usan los cambios físicos de los materiales que ocurren al exponerse al sol para mover los paneles, para ilustrarlo se mencionan los seguidores que calientan una sustancia en el interior de los tubos o compartimientos que, al evaporarse provocan una variación en la distribución de pesos, y mueven los paneles (AL-ROUSAN *et al.*, 2018). Otra forma de SP es el que propusieron CLIFFORD *et al.* (2004, como se citó en AL-ROUSAN *et al.*, 2018) que sigue al sol usando unas tiras bimetálicas (aluminio y acero) junto con un amortiguador viscoso. Algunas desventajas del SP son: la imprecisión al seguir al sol, su rendimiento es afectado por los cambios climáticos como en los casos de días nublados en que el sol no es visible, y el seguimiento reduce su eficiencia (AL-ROUSAN *et al.*, 2018).

También los seguidores se clasifican por los grados de libertad, están los seguidores de un solo eje y los seguidores de doble eje. Es sabido que el sol va del este a oeste; pero, tiene cambios durante todo el año ya que puede salir del noreste, o del sureste dependiendo del mes y la posición geográfica donde se esté observando la trayectoria. Los seguidores solares de un eje sólo siguen al sol de este a oeste independientemente de los cambios en el año a diferencia del seguidor con dos ejes que pueden seguir al sol en cualquier posición en la que se encuentre (AL-ROUSAN *et al.*, 2018; PERPIÑÁN, 2020). Los costos, el dimensionamiento y el mantenimiento de seguidores

de 2 ejes aunado al uso de espejos aumentan debido a la complejidad de los sistemas fotovoltaicos dado que requieren de más componentes movibles (AL-ROUSAN *et al.*, 2018). El rendimiento de los seguidores de un eje depende de las características del diseño de cada uno, y el porcentaje de energía ganada anual puede oscilar desde el 13% (APPELBAUM, 1994, como se citó en MOUSAZADEH *et al.*, 2009) hasta 40% (POULEK Y LIBRA, 1998, como se citó en MOUSAZADEH *et al.*, 2009) Por su parte, AL-ROUSAN *et al.* (2018) refieren que el seguimiento de 2 ejes puede aumentar la cantidad de energía solar recibida en un 50%. Entonces, el SFA con seguimiento solar activo es la mejor opción para obtener más irradiación, siendo este el sistema que se implementó en el hogar de la comunidad de Tecaxic, Toluca. En el apartado metodológico se describe el dimensionamiento del SFA con seguimiento solar.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA COMUNIDAD DE TECAXIC

La localidad rural de Tecaxic se ubica en el municipio de Toluca. Según la última encuesta realizada por el INEGI (2020) los datos obtenidos indican que la población de Tecaxic se compone en los siguientes grupos: grupo de 0 a 14 años comprendido por 926 personas, grupo de 15 a 64 años en el que hay 2,511 personas, y el grupo de 65 y más años abarca 250 personas, siendo un total de 3,687 habitantes. Con relación a las viviendas, la encuesta registró 1,111 de las cuales 962 están habitadas y una de estas no cuenta con energía eléctrica; 939 viviendas tienen drenaje. Del total de viviendas habitadas se identifican 24 sin servicio sanitario. Respecto a lo económico, los habitantes se dedican principalmente a la agricultura de donde obtienen primordialmente el maíz para autoconsumo y venta; también realizan otras actividades económicas como la cría de animales, y el comercio.

Las características geográficas de la localidad son: longitud de 19° 19' 33.0", latitud de -99° 42' 57.0" y una altitud de 2678 m sobre el nivel del mar (INEGI, 2020). La irradiación solar que llega al año es de 2134.5 kWh/m², siendo al día una irradiación de 5.84 kWh/m² (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2022).

3. METODOLOGÍA

Los estudios sobre pobreza energética y sistemas fotovoltaicos orientan el marco teórico del presente estudio; asimismo, desde el enfoque cuantitativo se diseñó el instrumento de medición, siendo este, el cuestionario estructurado elaborado con base en las propuestas de la RedPE (CALVO *et al.*, 2019) y la ACA (s. f.-a). El cuestionario se compone de un apartado sociodemográfico y otro apartado que integra las siguientes categorías: ingresos en el hogar, costos de la energía, satisfacción de necesidades energéticas en el hogar y factores ambientales; la categoría de satisfacción de necesidades energéticas en el hogar tiene las siguientes subcategorías: iluminación y climatización de la vivienda, alimentación, sala de estar y/o habitaciones, e higiene.

El cuestionario fue aplicado a 86 hogares que conformaron la muestra, a los cuales se accedió mediante la técnica de bola de nieve⁴ durante el periodo de 5 de diciembre de 2020 a 6 de marzo de 2021. El tamaño de la muestra se obtuvo con una fórmula para poblaciones finitas; luego los datos obtenidos fueron codificados y capturados en el software GNU PSPP 1.4.1 donde se realizó el análisis.

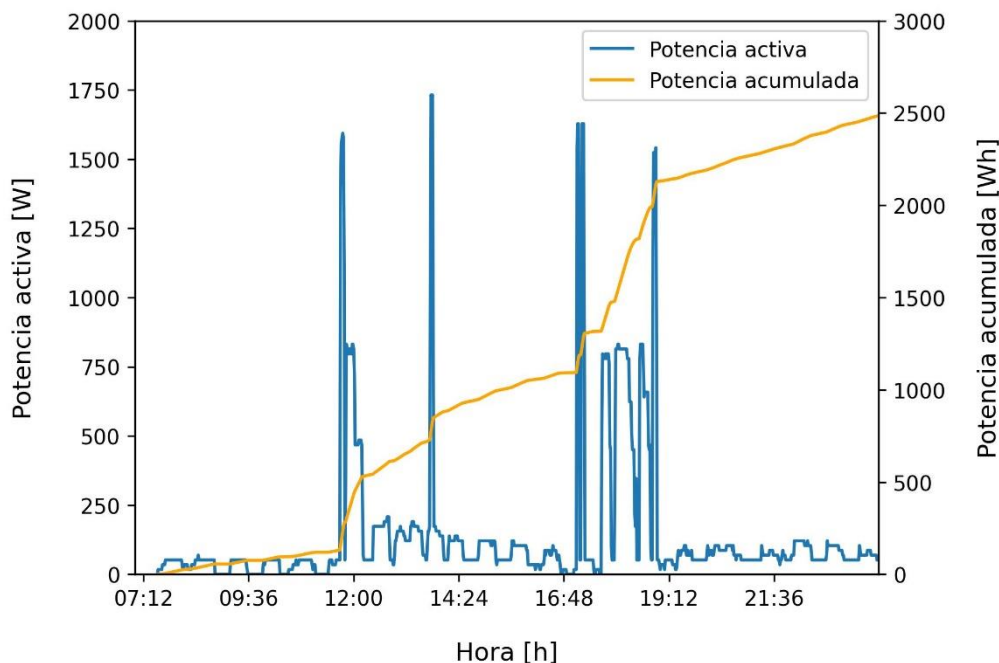
También en uno de los hogares de la muestra se llevaron a cabo las mediciones durante 14 días para conocer la cantidad de energía eléctrica consumida y su potencia activa, la medición se realizó a través de una FLUKE 1735 conectada a las líneas L1 y N del hogar que llegaban de CFE. En el análisis de los datos se identificó un consumo aproximado de 2500 Wh (potencia acumulada) de energía eléctrica, con una potencia activa máxima de 1800 W, ambos datos corresponden a un día cuando el consumo de energía eléctrica fue mayor; a continuación, se

⁴ Consiste en establecer comunicación con sujetos que son fuente de referencia para contactar a otros sujetos, conformando una cadena de referencia con la finalidad de obtener el número de participantes que requiere la muestra. La técnica de bola de nieve se utiliza en poblaciones que es difícil obtener la participación de sus miembros dado el contexto sociocultural

muestran los datos en la gráfica uno.

FIGURA 1

Potencia acumulada y potencia activa del hogar.



Fuente: ELABORACIÓN PROPIA (2020).

3.1. DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO CON SEGUIDOR SOLAR

Para calcular la potencia fotovoltaica necesaria del hogar se consideró la cantidad de energía que consume la familia al día tomando como referencia la potencia acumulada expresada en la gráfica, y se utilizó la fórmula propuesta por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDEA] (s. f., como se citó en CASTEJÓN y SANTAMARÍA, 2010) la cual es la siguiente:

$$P_{Gmin} = \frac{W_d \cdot G_{CEM}}{G_{dm} \cdot PR} \quad (1)$$

La variable W_d corresponde al consumo diario del hogar que es 2500 Wh, la variable G_{CEM} es la constante de irradiancia en Condiciones Estándares de Medida (CEM) que es de 1000 W/m²; pero, en esta investigación se usa el valor de la irradiancia 800 W/m² establecida en el estándar de Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC) que propone valores aproximados a la temperatura de operación real de una celda fotovoltaica (PERPIÑAN, 2020). Con relación a la variable G_{dm} indica el valor medio mensual de irradiancia diaria sobre la superficie horizontal en el mes con menor radiación solar recibida, este valor se obtuvo usando el reporte de GLOBAL SOLAR ATLAS (2022) vinculado a la ubicación donde se instaló el SFASS, el reporte contiene un perfil promedio horario de irradiancia de cada mes; en seguida se muestra el perfil en la gráfica.

FIGURA 2

Promedios horarios de irradiación solar en el hogar evaluado.

Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6			0	9	20	19	12	8	6	3		
6 - 7	10	42	94	131	136	116	104	105	113	138	118	49
7 - 8	279	291	329	347	321	272	265	276	286	343	354	320
8 - 9	489	512	540	538	491	421	426	446	458	527	545	522
9 - 10	638	663	684	669	613	535	542	573	574	646	673	656
10 - 11	714	748	757	728	666	580	590	624	623	689	726	721
11 - 12	730	769	768	715	646	567	563	600	595	665	713	734
12 - 13	690	726	716	630	558	516	494	515	510	595	650	680
13 - 14	606	633	609	508	426	425	405	414	404	486	537	582
14 - 15	482	503	472	383	316	334	313	337	313	350	397	449
15 - 16	323	349	326	251	206	215	219	233	212	215	238	287
16 - 17	140	172	162	123	104	104	115	118	94	76	65	86
17 - 18	1	19	22	20	23	32	35	26	9	0		
18 - 19												
19 - 20												
Total:	5102	5427	5480	5052	4526	4136	4084	4277	4196	4732	5016	5087

Fuente: GLOBAL SOLAR ATLAS (2022).

En la gráfica se observa que el mes con menor irradiación daría promedio es septiembre con un valor de 4142 Wh/m². Respecto a la variable PR (Performance Ratio) que es el rendimiento energético de la instalación cuyo valor para sistemas con inversor, batería y regulador de carga es 0.6 (CASTEJÓN y SANTAMARÍA, 2010). Una vez conocidos los valores se aplican a la fórmula de la siguiente manera:

$$P_{Gmin} = \frac{2500Wh \cdot 800 W/m^2}{4142 Wh/m^2 \cdot 0.6} = 805W \quad (2)$$

El resultado es 804.76 W, entonces, para la satisfacción de necesidades energéticas de la vivienda se requirieron 2 paneles EGE-450W-144M (M6) de 450 W cada uno, cuya potencia fotovoltaica total es de 900 W. En cuanto al cargador-inversor se utilizó el dato de la potencia activa máxima mostrado en la Gráfica 1, cabe mencionar que entre las necesidades del hogar se encuentra la alimentación de una bomba para agua; por lo general, las bombas requieren una potencia de 750 W (1 HP), pero, según SOLAR CENTER (2019) en el dimensionamiento de un SFA, la bomba de agua debe considerarse con una potencia activa máxima de 2250 W (3 HP), con la finalidad de proteger el inversor de picos de arranque, es decir, el hogar necesita una potencia activa máxima de 2250 W. Por lo tanto, se eligió un cargador-inversor de 3000 W cuyo modelo es Growatt SPF 3000TL LVM-48.

Respecto a la selección de la batería se recurrió al dato de la potencia acumulada mencionado en la gráfica que es de 2.5 kWh, el cual permite un día de autonomía energética en el hogar, con el propósito de satisfacer las necesidades durante las noches, o días con poca irradiancia. En este sentido, la batería seleccionada fue un Growatt ARK 2.5L A1 con capacidad de almacenamiento de 2.56 kWh, y tiene un voltaje de 48 V que corresponde al voltaje que usa el cargador-inversor.

Una vez instalado el SFA se recolectaron los datos que provee el cargador-inversor, para esto se usó una Raspberry PI 3 model B a la que se le desarrolló un programa, que solicita los datos al cargador-inversor, también gestiona el almacenamiento de los datos y funge como servidor web para que el usuario pueda acceder desde un navegador web y conocer el estado del sistema fotovoltaico. El análisis de los datos se realizó en Python 3 apoyándose en las bibliotecas: Pandas,

Matplotlib y Numpy.

Otro programa que se desarrolló fue para el Arduino MEGA 2560 que orienta el seguimiento de los paneles y controla el actuador lineal encargado de mover los paneles. El algoritmo de seguimiento solar que usa el programa consiste en lo siguiente: los paneles son movidos desde las 7 am en dirección al este a unos -45° (tomando como referencia que los paneles en horizontal están a 0°) y se quedan en esa posición 3 horas antes del mediodía solar, por ejemplo, si el medio día solar es a las 1:45 pm, los paneles comenzarán a moverse a las 10:45 am para seguir al sol, y el seguidor dejará de moverse a las 4:45 pm con los paneles inclinados 45° (dirigidos hacia el oeste). El seguimiento al sol consiste en mover los paneles cada 9 minutos expandiendo el actuador lineal 5 mm, lo que hace que los paneles giren 2.25° .

Con relación a la estructura física del seguidor solar del SFA, se propuso la estrategia activa de un solo eje (norte-sur), cronológico y controlado por el Arduino. La estructura se construyó con PTR (Perfil Tubular Rectilíneo) cuadrado de 1-1/4 de pulgadas y tornillos de 5/16 de pulgada, y se le fijó un actuador lineal de 10V, con una expansión máxima de 200mm, una velocidad de 5 mm/s y soporta una carga máxima de 3000 N.

El desarrollo del programa para la Raspberry, así como la instalación y configuración de su sistema operativo y de todo el software necesario para su funcionamiento fue pensado en dos sentidos, el primero es para que la instalación de la Raspberry en el SFASS sea rápida y sencilla, sólo es necesario conectarlo al cargador-inversor y a una fuente de CC; el otro sentido, es referente a la facilidad de usar la interfaz de usuario ya que fue diseñada para las necesidades del hogar. En cuanto al programa para el Arduino, este se creó para reducir el uso de componentes electrónicos externos, por ejemplo, prescindir de sensores y para no utilizar cálculos solares más complejos, lo que facilita su replicación en otros SFASS.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis sociodemográfico de los datos obtenidos a través de los 86 cuestionarios aplicados a 47 mujeres y 39 hombres, se encuentran los siguientes resultados: se identifica que cuarenta y dos personas tienen familias extensas; luego hay treinta personas con familias nucleares; le siguen ocho personas con familias monoparentales de las cuales 7 son madres solteras; cuatro personas pertenecen a familias que llaman nidos vacíos, y se encontraron dos personas con familias sin hijos. Los tipos de familias son relevantes a razón del número de integrantes, dado que las necesidades energéticas aumentan en las familias más grandes, por ende, requieren una mayor cantidad de energía eléctrica o térmica (biomasa, gas LP) para satisfacer sus necesidades.

Respecto a la escolaridad de las personas entrevistadas, la mayoría (30 personas) terminó la secundaria; mientras que diecinueve concluyeron la primaria y once la dejaron inconclusa; nueve completaron sus estudios de preparatoria, tres realizaron la preparatoria con carrera técnica y una persona no completó la preparatoria; cinco finalizaron sus estudios superiores y siete no lo hicieron; y solo una persona cuenta con estudios de posgrado. En otras palabras, 60 personas tienen educación básica y 13 poseen educación media; mientras que 12 accedieron a educación superior, aunque la mayoría no la concluyó, y sólo una mujer logró estudios de posgrado.

Con relación a la ocupación hay veintiséis mujeres amas de casa, once mujeres son comerciantes, tres laboran en la limpieza de casas, tres son estudiantes, una mujer se dedica a la albañilería, otra mujer es psicoterapeuta y una mujer es obrera. En los casos de los hombres, diez son obreros, nueve se dedican al comercio, cinco en emplean en la albañilería, tres son jubilados, tres trabajan como taxistas, dos son herreros, dos están estudiando, una persona se dedica a conducir autos, otra persona hace trabajos de carpintería, un señor labora en la policía, un joven ejerce como fisioterapeuta de manera empírica. Una mujer y un hombre no compartieron su ocupación.

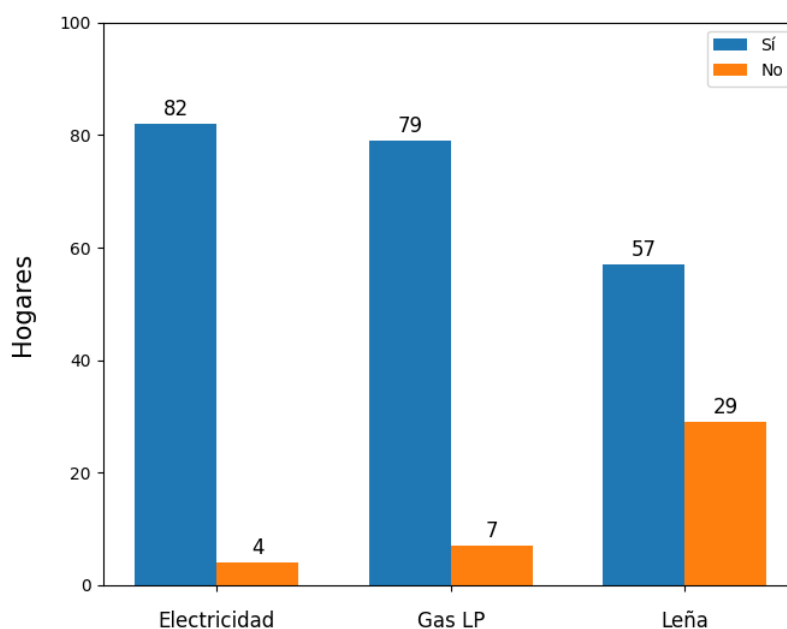
En los hogares de las personas entrevistadas, se consideraron cinco servicios básicos: internet, drenaje, telefonía, agua y eliminación de basura. Los resultados muestran que 44 hogares cuentan con la mayoría de los servicios (3 o 4 servicios), 36 hogares tienen todos los servicios (5 servicios) y se identificaron a 6 hogares con pocos servicios (2, 1 o ningún servicio).

Respecto a las fuentes de energía utilizadas por los hogares, se indagaron las siguientes: leña, gas LP y electricidad, encontrándose que en 57 hogares usan leña, de los cuales 47 la recolectan

principalmente de los montes que pertenecen al Parque Nacional Sierra Morelos, ubicado en los municipios de Toluca y Zinacantepec, Estado de México; 9 hogares la compran destinando de 10 a 50 pesos MXN por semana, y sólo 1 hogar usa desperdicios de madera. Los hogares que principalmente consumen leña corresponden a 34 familias extensas, y 18 familias nucleares, es decir, los hogares con más integrantes tienden a emplear predominantemente biomasa para obtener energía térmica, lo que influye en la predisposición a padecer enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Referente al gas LP, 79 hogares lo aprovechan sobre todo para cocinar; de estos, por mes 42 hogares consumen un tanque de gas de 20 kg, 20 hogares emplean 2 tanques de 20 kg y 17 hogares usan menos de 1 tanque de gas. Además de utilizar gas LP, 52 familias también consumen leña. Con relación a la electricidad, 82 hogares la adquirieron mediante la red de CFE; pero 4 hogares refieren no tener acceso a energía eléctrica, este dato difiere con los resultados del último Censo que realizó INEGI (2020), pues dice que hay un hogar sin energía eléctrica. Sin embargo, aunque todos los hogares utilizan uno o más tipos de energía, no tienen la posibilidad económica de cubrir todas sus necesidades energéticas con energía de calidad y limpia. En la gráfica 3 se muestra la cantidad de hogares que usan electricidad, gas LP y leña en la comunidad de Tecaxic.

FIGURA 3
Cantidad de hogares por tipo de energía en Tecaxic



Fuente: ELABORACIÓN PROPIA (2023).

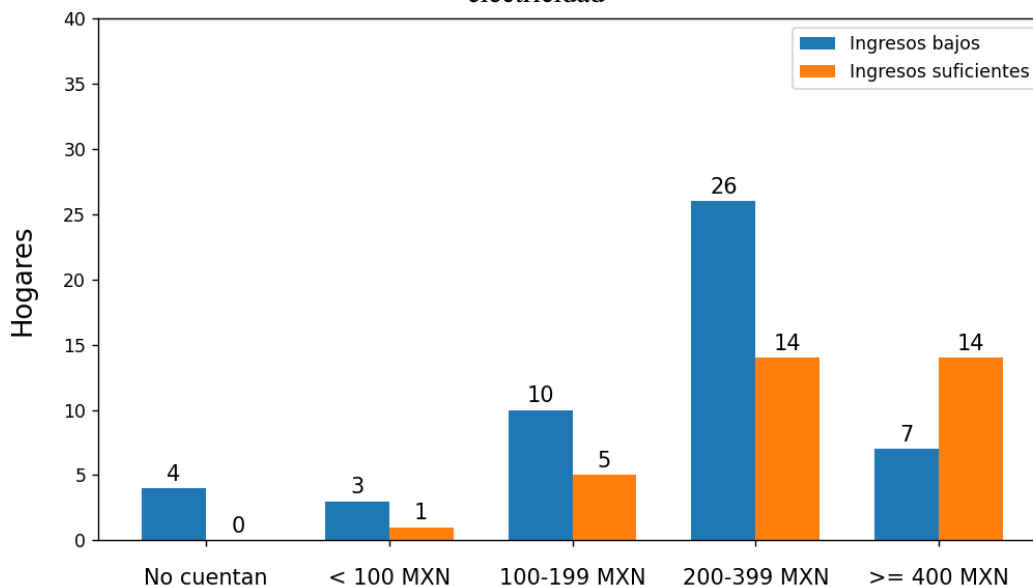
4.1. HOGARES CON POBREZA ENERGÉTICA EN LA COMUNIDAD DE TECAXIC

De acuerdo con la ACA (s. f.-a) y ELISEEVA (2013) la categoría de ingresos manifiesta la manera en que viven los seres humanos, y al medirla en las personas que conforman la muestra del presente estudio, se identifica que el 58% tienen bajos ingresos y el 39% considera que sus ingresos son suficientes. Asimismo, es relevante observar ¿en qué invierten sus ingresos los hogares para satisfacer sus necesidades energéticas?; en este sentido, se analizó la categoría de costos que contempló la energía eléctrica y la energía térmica (gas LP). Respecto al costo de energía eléctrica por bimestre⁵, se encontró en el grupo de personas con bajos ingresos lo siguiente: 4 no cuentan con electricidad, 3 personas pagan menos de 100 pesos mexicanos

⁵ La razón de considerar el pago bimestral es porque la CFE realiza los cobros conforme a esos lapsos.

[MXN], 10 personas pagan de 100 a 199 MXN, 26 personas pagan de 200 a 399 MXN y 7 personas pagan 400 MXN o más; mientras que el grupo que piensa que tiene ingresos suficientes mencionan: 14 de estas personas que invierten 400 MXN o más en el pago a CFE, 14 personas gastan de 200 a 399 MXN, 5 personas pagan de 100 a 199 MXN y sólo una paga menos de 100 MXN. A continuación, en la gráfica 4 se observan los datos antes mencionados.

FIGURA 4
Cantidad de hogares según percepción de ingresos y egresos destinados al pago de electricidad



Fuente: ELABORACIÓN PROPIA (2023).

Sin embargo, previo a la contingencia sanitaria del covid-19, el 43% de los hogares tuvieron retrasos en los pagos de CFE, viéndose afectados principalmente las familias extensas (22 hogares) y las familias nucleares (11 hogares). También un 38.4% de las familias extensas y nucleares enfrentaron dificultades para hacer los pagos del servicio del agua.

En cuanto al gas LP, las personas entrevistadas refieren que los costos de esta energía por mes, fueron los siguientes: en el grupo que piensa que sus ingresos son bajos, 6 personas mencionan que en su hogar no compran gas LP, 9 personas gastan menos de 300 MXN, 25 personas gastan menos de 500 MXN, y 10 personas gastan hasta 1000 MXN. En el grupo que dice tener suficientes ingresos, se registró a una persona que no utiliza gas LP, 7 personas gastan menos de 300 MXN, 16 personas gastan menos de 500 MXN, y 10 personas gastan hasta 1000 MXN. En cuanto a los siete hogares que no compran gas, cinco de estos recurren a la leña y dos usan electricidad en lugar de gas LP.

En la categoría de satisfacción de necesidades en el hogar vinculadas con el consumo energético, se identifica que para la alimentación utilizan con más frecuencia electrodomésticos como: el refrigerador (73%), y la licuadora (15%); otros hogares refieren que no cuentan con aparatos para la alimentación (9%). Cabe mencionar que sólo el 77% de los hogares cuentan con refrigerador, y el 90% tienen licuadora. Asimismo, en la sala de estar o en las habitaciones de sus viviendas usan con más frecuencia la televisión (52%), y el celular (30%). Con relación a la higiene de los integrantes del hogar, los resultados indican que el 26% tiene calentador solar, el 74% calienta su agua con gas LP o con leña. Respecto a la iluminación en las viviendas, se indagó sobre el número de focos, encontrándose que la mayoría oscila en el rango de 6 a 8 focos (40%), le sigue el rango de 1 a 5 focos (31%), después se encuentra el rango de 9 a 13 focos (16%), y las personas que no cuentan con electricidad recurren al uso de velas.

Otra categoría analizada fue la climatización de la vivienda, pero no se identificaron medios que brinden confort térmico al hogar; no obstante, las familias realizan prácticas que les ayudan a mantener su calor corporal, por ejemplo: 40 personas refieren que en sus hogares usan chamarras, 23 personas mencionan que además de abrigarse, toman bebidas calientes y optan por preparar alimentos acompañados de caldos; en el caso de 21 personas en sus hogares consumen

bebidas calientes y preparar alimentos acompañados de caldos; una persona dice que en su familia se abrigan y dejan focos prendidos durante el día, y otra persona menciona que en su familia optan por bañarse a medio día, esto por dos razones, primero para no gastar más gas LP en la noche, y la otra razón consiste en aprovechar el calor que brinda el sol sobre el tinaco, de tal manera que el agua de su interior aumenta su temperatura, y al salir por la llave o regadera la perciben caliente.

Dado que la investigación se llevó a cabo al mismo tiempo que se manifestó la contingencia sanitaria, se integró la categoría ambiental en la que se indagó su relación con la satisfacción de necesidades energéticas en los hogares, encontrándose que durante la pandemia 63 hogares aumentaron el consumo de energía, y 53 hogares tienen retrasos en el pago de CFE o agua, y 54 hogares aplazan lo más posible comprar el gas LP.

Si los resultados los observamos según la ACA, la REDPE y ELISEEVA se interpreta que los hogares de las personas entrevistadas, tanto las personas que mencionan que tienen suficientes ingresos, como en las personas que refieren insuficientes ingresos viven en pobreza energética dado que no satisfacen todas sus necesidades energéticas, como la climatización de sus viviendas, esta necesidad no logra cubrirla ningún hogar; tampoco la mayoría (66%) de los hogares tienen acceso a energía de calidad, tal situación puede desencadenar enfermedades en las personas. Es cierto que todos los hogares usan uno o más tipos de energía, pero ninguno tiene la energía suficiente para satisfacer sus necesidades. Además, previo a la contingencia sanitaria ya había hogares con dificultades para realizar los pagos a la CFE o los pagos del servicio del agua; luego, durante la epidemia del covid-19, las dificultades económicas de los hogares se agravaron ocasionando retrasos en la compra del gas LP, el cual sustitúan por leña; asimismo, aumentó el número de las familias que se atrasaron en los pagos de CFE y el servicio de agua potable arriesgándose a una posible suspensión de los servicios.

Así las cosas, cabe enfatizar que los hogares de Tecaxic que formaron parte del estudio en cuestión, se encuentran ubicados geográficamente en el municipio de Toluca que es la capital del Estado de México, lo que significa que el Ayuntamiento del municipio no es inclusivo con esta comunidad; tampoco el Ayuntamiento implementa estrategias para proteger el parque Sierra Morelos que es de donde toman las personas leña.

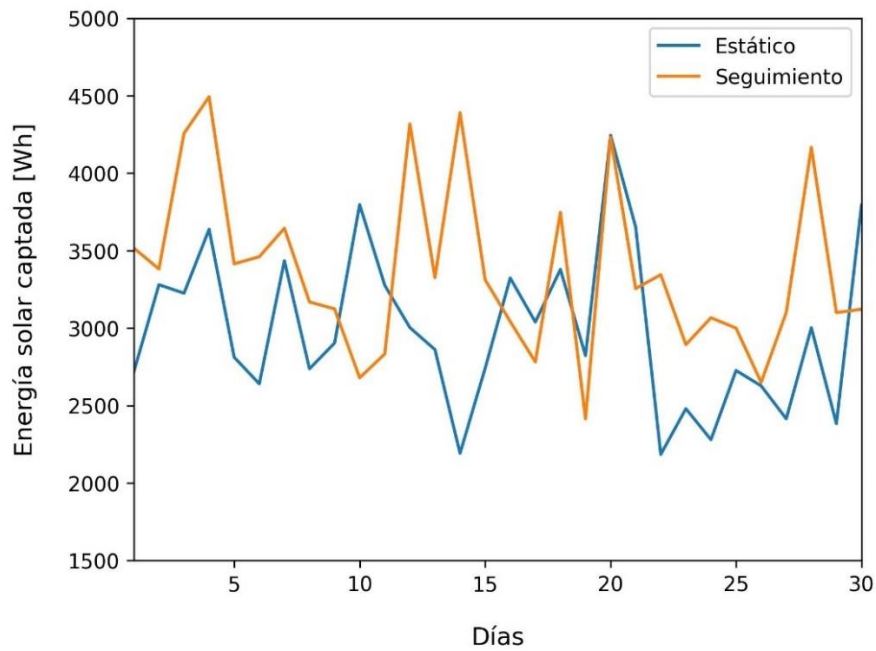
4.2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL SFASS INSTALADO EN UNA VIVIENDA DE TECAXIC

Ante la pobreza energética de los hogares entrevistados, se le propuso a una familia la instalación de un SFASS, y se realizaron mediciones en el periodo comprendido del 15 de mayo de 2022 al 23 de julio del mismo año. La finalidad de las mediciones era comparar la eficiencia de captación de energía solar del SFA, para ello se eligieron 30 días donde se usó el seguidor solar y 30 días con los paneles estáticos. En el análisis de este periodo se identificaron los días en que hubo menos energía solar, y los días con mayor obtención de energía, por ejemplo: en los días con seguimiento, el día 7 de julio se obtuvo 2415 Wh y el día 11 de junio se obtuvo 4493 Wh; mientras que, en los días sin seguimiento, el día 22 de junio se registró menos energía siendo esta de 2185 Wh, y el día 4 de junio se alcanzó 4245 Wh.

Respecto a la diferencia de energía captada por el SFA con seguidor solar en un día nublado y un día despejado, se comparó el día 7 de julio y el 11 de junio respectivamente, encontrándose que la diferencia de energía captada fue del 53.8% por lo que en días nublados se reduce cerca de la mitad de la cantidad de energía que puede producir el SFASS.

En seguida se comparan los datos mediante la graficación de los 30 días con seguimiento señalados en color naranja, y 30 días sin seguimiento indicados con el color azul. La suma total de energía solar captada de los 30 días con seguimiento fue de 101 kWh; mientras que la suma total de energía solar captada de los días sin seguimiento da como resultado 90 kWh. En otras palabras, la energía solar captada total de los 30 días con seguimiento aporta un 11% más que la captada durante los 30 días sin seguimiento.

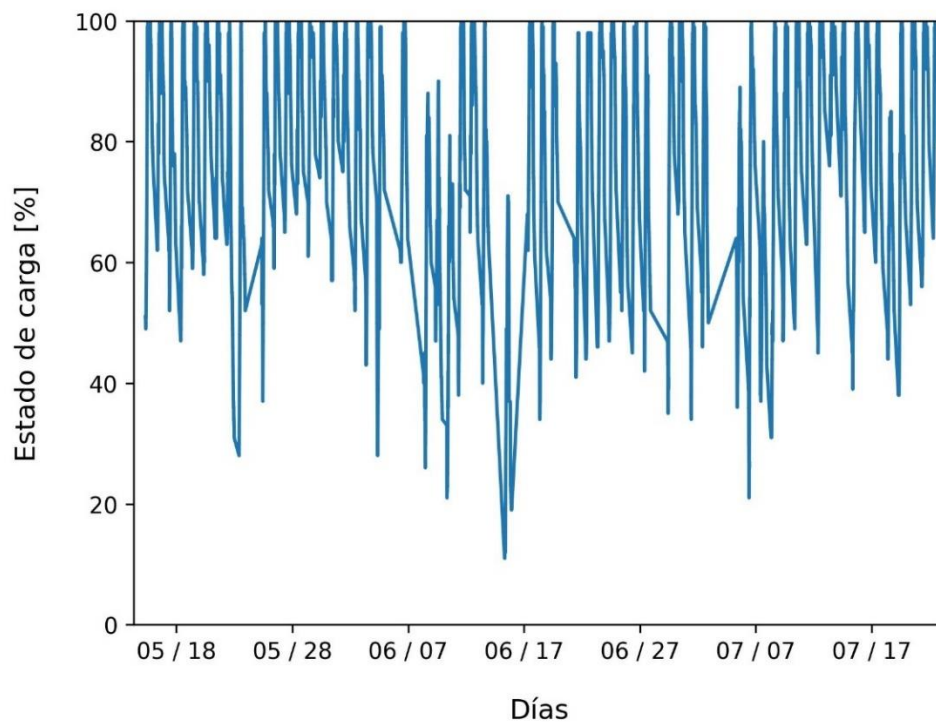
FIGURA 5
Comparación de la energía captada sin seguimiento y con seguimiento solar en el periodo de 15 de mayo al 23 de julio de 2022



Fuente: ELABORACIÓN PROPIA (2022).

También durante el periodo evaluado se midió el estado de carga de la batería, el cual se puede observar en la gráfica 6 que a continuación se presenta.

FIGURA 6
Estado de carga de la batería en el periodo de 15 de mayo al 23 de julio de 2022.



Fuente: ELABORACIÓN PROPIA (2022).

Se observó que en la mayoría de los días hubo momentos en que el estado de carga llegó a un 100%, únicamente se registró un día (15 de junio) en el que el estado de carga fue de 11%. En ningún día el estado de carga llegó a 0%, lo que demuestra que la capacidad de la batería es suficiente para satisfacer la demanda de energía eléctrica en el hogar evaluado, aunado al seguimiento solar proporciona a la familia seguridad energética.

5. CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

La pobreza energética en México es un fenómeno recién abordado en el siglo XXI, pero son pocos los autores que lo han investigado sin profundizar en estudios de caso; en este sentido, la presente investigación contribuye en el conocimiento de un espacio rural con el nombre de Tecaxic, ubicado en la ciudad de Toluca, donde con base en el análisis de los datos de las personas entrevistadas, se identificó que viven en pobreza energética en sus hogares.

Las necesidades energéticas de las familias no son satisfechas de manera suficiente y con energía limpia. La mayoría de los hogares recurren al consumo de leña, el cual se incrementó con la contingencia sanitaria. No obstante, como ya es sabido, el humo de la quema de leña afecta a las personas que lo inhalan desencadenando problemas de salud en el sistema respiratorio, lo que significa que por un lado cubren en cierta medida las necesidades energéticas, pero por otro, afectan su salud vulnerándola aún más con la existencia de la pandemia.

Además, aquellos hogares que no disponen de energía eléctrica, no tienen una iluminación adecuada, lo que reduce la posibilidad de poder realizar algunas actividades laborales y domésticas en la noche, es decir, la dinámica familiar de quienes no cuentan con energía eléctrica es diferente y reducida en actividades nocturnas. Asimismo, estos hogares no usan refrigerador para conservar sus alimentos, por lo que hacen poca comida para poder consumirla pronto y evitar desperdiciarla. Lo anterior también ocurre con los hogares que no disponen de refrigerador a pesar de tener energía eléctrica.

El estudio además de medir la pobreza energética, propuso una solución que consistió en implementar un SFASS en uno de los hogares con el propósito de incidir en la satisfacción de las necesidades energéticas de la familia.

El análisis comparativo permitió observar que el SFASS capta más energía fotovoltaica que un SFA fijo, aunque ambos sistemas son afectados por las condiciones climáticas, como la neblina, las nubes, la lluvia. Las mediciones que se hicieron en esta investigación prácticamente se ubican en la temporada de lluvias; luego, hay una alta probabilidad de que en temporadas de otoño, invierno y parte de la primavera el SFASS tenga la capacidad de captar mayor cantidad de energía solar.

Para que los SFASS sean más confiables, se recomienda que en futuras investigaciones se profundice en el análisis y diseño de estructuras contemplando distintas condiciones climáticas. En este caso, se ha encontrado que el SFASS en un día nublado produce menos de la mitad de la energía que en un día despejado.

Los SFASS además de proporcionar energía limpia, suficiente y de calidad tienen el potencial de poder contribuir en la lucha contra la pobreza y vulnerabilidad energética que asolan tanto a México como al resto de América Latina y el Caribe.

Para ampliar el apoyo a comunidades rurales en México, como en el caso de la comunidad de Tecaxic, instituciones como INEGI podrían incluir en los censos o en otro tipo de encuesta preguntas relacionadas con las necesidades energéticas, con la finalidad de que el gobierno obtenga datos que ayuden a conocer la pobreza energética de todas regiones del país, y se legisle en el desarrollo de políticas públicas que combatan y eliminen la pobreza energética, por ejemplo, se puede crear una institución que investigue las necesidades energéticas de México para así contribuir en la profundización sobre el tema, y se puedan proponer apoyos que involucren la implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos en localidades mexicanas que lo necesiten.

6. BIBLIOGRAFÍA

AL-ROUSAN, N., MAT ISA, N. A., y MAT DESA, M. K. (2018): "Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.

- 82, n° 3, p. 2548-2569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077>
- ARRIETA, M., OLMOS, L. C., IZQUIERDO, J. L., y ÁLVAREZ, R. A. (2012): “Diseño de prototipo de sistema solar fotovoltaico optimizando el ángulo de inclinación de los paneles solares”. *PROSPECTIVA*, vol. 10, n° 1, p. 97-107. <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496250733011.pdf>
- ASOCIACIÓN DE CIENCIAS AMBIENTALES [ACA]. (s. f.-a): *¿Qué es la pobreza energética?*. <https://www.cienciasambientales.org.es/index.php/ique-es-la-pobreza-energetica> [consulta: octubre 2022]
- ASOCIACIÓN DE CIENCIAS AMBIENTALES [ACA]. (s. f.-b): *Semana Europea de la Pobreza Energética*. <http://www.pobrezaenergetica.info/> [consulta: octubre 2022]
- BAHILL, A. T., y CHAVES, A. (2013): “Risk Analysis of Solar Photovoltaic Systems”. *Proceedings of the 23rd Annual INCOSE International Symposium*.
- BÁRCENA, A., SAMANIEGO, J., PERES, W., y ALATORRE, J. E. (2020): *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe ¿Seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 383 pp. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/45677>
- BENTLY, E., KOTTER, R., WANG, Y., DAS, R., PUTRUS, G., VAN DER HOOGT, J., VAN BERGEN, E., WARMERDAM, J., HELLER, R., y JABLONSKA, B. (2019): “Pathwats to energy autonomy—Challenges and opportunities”. *International Journal of Enviromental Studies*, vol. 76, n° 6, p. 893-921. <https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1662219>
- BERTINAT, P., y CHEMES, J. (2020): *Aportes del sector energético a una transición social-ecológica*. Friedrich-Ebert-Stiftung, 58 pp. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/16911.pdf>
- BOUZAROVSKI, S., y PETROVA, S. (2015): “A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary”. *Energy Research & Social Science*, vol 10., n° 2015, p. 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007>
- BRIDGE, B. A., ADHIKARI, D., & FONTENLA, M. (2016): “Electricity, income, and quality of life”. *The Social Science Journal*, vol. 53, n° 1, p. 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.soscij.2014.12.009>
- CASTEJÓN, A., y SANTAMARÍA, G. (2010): *Instalaciones solares fotovoltaicas*. EDITEX, 228 pp.
- CHANONA, A., IRACHETA, A., CÁLIX, Á., DE LISIO, A., DENZIN, C., WANDERLEY, F., ARDILA, G., MARTNERS, G., CODAS, G., MORA, H., SÁNCHEZ, J., DE ECHAVE, J., RODRÍGUEZ BECERRA, M., IVETTE AGUILAR, M., BERTINAT, P., KREIMERMANN, R., SARANDÓN, S., y VENTURA-DIAS, V. (2019): *Esto no da para más. Hacia la transformación social-ecológica en América Latina*. Friedrich-Ebert-Stiftung, 98 pp. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/15793.pdf>
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE [CEPAL]. (s. f.): *México: Perfil nacional energético*. <https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/perfil-nacional.html?theme=4&country=mex&lang=es> [consulta: noviembre de 2020]
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE [CEPAL]. (2020): *El desafío social en tiempos del COVID-19 (N.o 3; Informe Especial COVID-19)*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45527-desafio-social-tiempos-covid-19>
- ELISEEVA, I. (2013): “Energy and Poverty Measurement in Russia: Energy Poverty in the Energy Rich Country”. *Proceedings 59th ISI World Statistics Congress, 25-30 August 2013, Hong Kong (Session STS013)*, p. 1363-1365. <https://2013.isiproceedings.org/Files/STS013-P3-S.pdf>
- GARCÍA, R. (2014): “Pobreza energética en América Latina”. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/36661-pobreza-energetica-america-latina>
- GARCÍA-OCHOA, R., y GRAIZBORD, B. (2016): “Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional”. *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. XVI, n° 51, p. 289-337.
- GLIGO, N., ALONSO, G., BARKIN, D., BRAILOVSKY, A., BRZOVIC, F., CARRIZOSA, J., DURÁN, H., FERNÁNDEZ, P., GALLOPÍN, G., LEAL, J., MARINO, M., MORALES, C., ORTIZ, F., PANARIO, D., PENGUE, W., RODRÍGUEZ, M., ROFMAN, A., SAA, R., SEJENOVICH, H., ... VILLAMIL, J. (2020): *La tragedia ambiental de América Latina y el Caribe*. CEPAL, 127 pp. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46101-la-tragedia->

- ambiental-america-latina-caribe
- GLOBAL SOLAR ATLAS. (2022): *Calixtlahuaca*. <https://globalsolaratlas.info/map> [consulta: noviembre de 2022]
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA [INEGI]. (2018): *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares*. ENCEVI 2018.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA [INEGI]. (2020): *Espacio y datos de México*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?ag=151060095>
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY [IRENA]. (2019): *Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access: An opportunity not to be missed*. <https://www.irena.org/publications/2019/Jan/Off-grid-renewable-energy-solutions-to-expand-electricity-to-access-An-opportunity-not-to-be-missed>
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY [IRENA]. (2022): *Tracking SDG7. The energy progress report 2022*. https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jun/SDG7_Tracking_Progress_2022.pdf
- KIM, D., CHEN, Z., ZHOU, L. F., y HUANG, S. X. (2018): "Air pollutants and early origins of respiratory diseases". *Chronic diseases and translational medicine*, vol. 4, n° 2, p. 75-94. <https://doi.org/10.1016/j.cdtm.2018.03.003>
- MARTÍN-CULLELL, J. (2021): "El apagón expone la dependencia energética de México y su déficit de infraestructura". *EL PAÍS*. <https://elpais.com/mexico/2021-02-17/el-apagon-expone-la-dependencia-energetica-de-mexico-y-su-deficit-de-infraestructura.html>
- MOUSAZADEH, H., KEYHANI, A., JAVADI, A., MOBLI, H., ABRINIA, K., y SHARIFI, A. (2009): "A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 2009, p. 1800-1818. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022>
- NACIONES UNIDAS. (s. f.): *Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- OBSERVATORIO DE POBREZA ENERGÉTICA EN MÉXICO [OPEM]. (s. f.): <https://pobrezaenergetica.mx/inicio> [consulta: junio de 2021]
- PERPIÑÁN, O. (2020): *Energía Solar Fotovoltaica*. Creative Commons, 186 pp.
- PNUD. (s. f.): *Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. ¿Qué son los Objetivos de Desarrollo Sostenible?*. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals#energia-asequible-no-contaminante> [consulta: octubre de 2022]
- PROGRAMA INCLUSIÓN ENERGÉTICA E HÍDRICA. (s. f.): <https://inclusionenergetica.com/> [consulta: octubre 2022]
- RANABHAT, K., PATRIKKEEV, L., REVINA, A. A., ANDRIANOV, K., LAPSHINSKY, V., y SOFRONOVA, E. (2016): "An introduction to solar cell technology". *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 14, n° 4, p. 481-491. <https://doi.org/10.5937/jaes14-10879>
- RED DE POBREZA ENERGÉTICA [REDPE]. (s. f.): *The network*. <https://redesvid.uchile.cl/pobreza-energetica/en/the-network/> [consulta: noviembre de 2022]
- SÁNCHEZ, L. (2012): "Hogares y consumo energético en México". *Revista Digital Universitaria*, vol. 13, n° 10, p. 1-8. <http://www.revista.unam.mx/vol.13/num10/art101/>
- SANTILLÁN, A. (2016): "Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos" [Tesis de maestría, Universitat de Barcelona]. http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/101966/1/TFM_MERSE_Alberto%20Santill%C3%A0n.pdf
- SOKOLOWSKI, J., LEWANDOWSKI, P., KIELCZEWSKA, A., y BOUZAROVSKI, S. (2020): "A multidimensional index to measure energy poverty: The Polish case". *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 15, n° 2, p. 92-112. <https://doi.org/10.1080/15567249.2020.1742817>
- SOLAR CENTER. (2019): *Cálculo y diseño de sistemas autónomos*. <https://www.youtube.com/watch?v=Viqv4th6nkQ> [consulta: noviembre 2022]
- STRATEGY&. (2019): *El suministro eléctrico en México*. Strategy& / PwC. <https://www.pwc.com/mx/es/industrias/archivo/2019/20190228-el-suministro-electrico-en-mexico.pdf>
- WASSIE, Y. T., y ANDARAMOLA, M. S. (2020): "Socio-economic and environmental impacts of rural electrification with Solar Photovoltaic systems: Evidence from southern Ethiopia". *Energy for Sustainable Development*, vol. 60, n° 2021, p. 52-66.

<https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.12.002>
WORLD WIDE FUND FOR NATURE [WWF]. (2022): *Living Planet Report 2022. Building a nature-positive society.*
https://wwflpr.awsassets.panda.org/downloads/lpr_2022_full_report.pdf