



Implementación de sistemas fotovoltaicos para cubrir la demanda energética en hogares de Panamá

Implementation of photovoltaic systems to cover energy demand in Panamanian homes

Alexzandra Castrellón¹, Emmanuel Chávez¹, Ariadna Arguelles¹, Dafni Mora^{2*}

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

² Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas (ECEB), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: dafni.mora@utp.ac.pa

RESUMEN. La creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir la dependencia a los combustibles fósiles ha impulsado a muchos países a buscar alternativas renovables para la generación de electricidad. En este contexto, la energía fotovoltaica se presenta como una solución viable y accesible, permitiendo que los consumidores a nivel residencial e industrial puedan generar su propia energía e inyectar el excedente a la red. En Panamá, la información sobre el consumo energético y los sistemas fotovoltaicos instalados en residencias es escasa y poco precisa. Por lo tanto, este estudio busca proporcionar una visión general de los beneficios y desafíos que enfrentan los hogares panameños al optar por esta tecnología. A modo de contexto, se presenta una revisión literaria de estudios previos que han evaluado el impacto de estos sistemas y el efecto rebote en diversos contextos geográficos y socioeconómicos. Se aplicó una encuesta a 101 hogares, con un enfoque no probabilístico, para recopilar información sobre el consumo y los hábitos de los usuarios. Además, se realizaron auditorías energéticas y el diseño de los sistemas fotovoltaicos de tres residencias representativas a cada una de las tarifas de baja tensión simple. Se demostró que el 78% de los hogares participantes tienen interés por adoptar la energía solar y que se debe tomar en cuenta el impacto del efecto rebote en el diseño de los sistemas. El estudio evidenció que la implementación de sistemas fotovoltaicos tiene un potencial significativo para reducir el consumo de electricidad de la red.

Palabras clave. *Efecto rebote, energía renovable, energía solar, impacto socioeconómico, residencias, sistemas fotovoltaicos.*

ABSTRACT. Growing concern about climate change and the need to reduce dependence on fossil fuels has prompted many countries to seek renewable alternatives for electricity generation. In this context, photovoltaic energy is presented as a viable and accessible solution, allowing residential and industrial consumers to generate their own energy and inject the surplus into the grid. In Panama, information on energy consumption and photovoltaic systems installed in homes is scarce and inaccurate. Therefore, this study seeks to provide an overview of the benefits and challenges faced by Panamanian households when opting for this technology. As a context, a literature review of previous studies that have evaluated the impact of these systems and the rebound effect in various geographic and socioeconomic contexts is presented. A survey was conducted in 101 households, using a non-probabilistic approach, to gather information on consumption and user habits. In addition, energy audits were conducted, along with the design of photovoltaic systems in three representative homes at each of the simple low-voltage tariffs. It was shown that 78% of participating households are interested in adopting solar energy and that the impact of the rebound effect must be taken into account in system design. The study showed that the implementation of photovoltaic systems has significant potential to reduce grid electricity consumption.

Keywords. *Rebound effect, renewable energy, solar energy, socioeconomic impact, residences, photovoltaic systems.*

Citación: A. Castrellón, E. Chávez, A. Arguelles y D. Mora, "Implementación de sistemas fotovoltaicos para cubrir la demanda energética en hogares de Panamá", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 21, no. 1, pp. (0), 2025.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 13 de noviembre de 2024. **Recibido con correcciones:** 14 de marzo de 2025. **Aceptado:** 3 de abril de 2025.

DOI.

Copyright: 2025 A. Castrellón, E. Chávez, A. Arguelles y D. Mora. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

En las últimas décadas, las preocupaciones por el cambio climático y la necesidad de encontrar fuentes de energía sostenibles han impulsado a muchos países a buscar alternativas renovables para reducir su dependencia a los combustibles fósiles. En Panamá, este esfuerzo es especialmente relevante debido al aumento poblacional, que, con una tasa de crecimiento anual de 1.41% [1], ha generado una demanda energética creciente. Esta demanda alcanzó un récord histórico de 2235MW el 30 de agosto de 2023 [2], subrayando la urgente necesidad de desarrollar proyectos de generación de energía mediante fuentes renovables para lograr diversificar la matriz energética del país.

Aunado a esto, el sistema energético panameño enfrenta desafíos significativos debido a la ineficiencia en las líneas de transmisión, lo que resulta en cortes frecuentes y acceso irregular en diversas áreas [3][4]. Esta problemática, que afecta tanto a hogares como a empresas, resalta la necesidad de mejorar la infraestructura de transmisión para asegurar un suministro constante y fiable.

En este contexto, los sistemas fotovoltaicos han emergido como una solución viable y accesible a estos problemas. A nivel residencial, su implementación no solo podría reducir el costo final de la energía para los consumidores, sino también resolver las diversas problemáticas existentes, impulsando así la transición energética desde el mercado residencial [5].

Para fomentar su adopción, el gobierno panameño ha creado diversas estrategias como el Plan Energético Nacional 2015-2050 [6] y los Lineamientos Estratégicos de la Agenda de Transición Energética 2020-2030 [7], que promueven el uso de energías renovables e introducen el concepto de prosumidor. Este último permite a los usuarios generar energía para su propio consumo e inyectar el excedente a la red, contribuyendo al objetivo de incrementar la proporción de energía renovable en la matriz energética del país [6][7]. Estas políticas a su vez se alinean con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7, que pretende garantizar el acceso a energía asequible y no contaminante [8].

No obstante, a pesar de estas iniciativas, en Panamá no existen estudios detallados que analicen el consumo energético residencial. Aunque la Secretaría Nacional de Energía y la ASEP publican periódicamente reportes sobre la capacidad solar instalada total, no se dispone de

información pública sobre el impacto real de estos sistemas en el ahorro energético de los hogares. Esta falta de datos representa una barrera para evaluar con precisión la viabilidad de estos sistemas a nivel residencial. Por lo tanto, a través de este estudio se busca proporcionar una visión general de los beneficios y desafíos que enfrentan los hogares panameños al optar por esta tecnología, a través de una encuesta y el análisis de tres casos de estudio.

1.1 Objetivos de la investigación

El objetivo general de este estudio es analizar el potencial de la implementación de sistemas fotovoltaicos para cubrir la demanda energética en residencias unifamiliares de Panamá. Específicamente, se busca:

- Analizar el consumo energético residencial de tres tipos de facturación (BTS1, BTS2 y BTS3) identificando patrones de consumo y áreas de alta demanda para orientar la implementación de soluciones energéticas renovables.
- Segmentar la demanda para identificar el consumo y distinguir si este se debe a prácticas habituales de uso ineficiente o a la cantidad de equipos existentes en funcionamiento.
- Comparar el consumo energético antes y después de la incorporación de sistemas fotovoltaicos en las residencias auditadas.

2. Revisión literaria

En esta sección se analizaron estudios previos que han evaluado la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos, considerando beneficios, desafíos y el efecto rebote en diversos contextos geográficos y socioeconómicos. La figura 1 resume las principales tendencias identificadas en la literatura.

2.1. Impacto de los sistemas fotovoltaicos

El acceso a la electricidad es crucial para el desarrollo económico y la mejora de la calidad de vida de las comunidades rurales de los países en desarrollo. Ante esta necesidad, los sistemas de paneles fotovoltaicos emergen como una solución viable para proporcionar energía en áreas alejadas de la red eléctrica. Además, varios países están promoviendo el uso de sistemas fotovoltaicos en los techos de residencias como una alternativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por los sistemas convencionales de generación de energía y para permitir a los usuarios

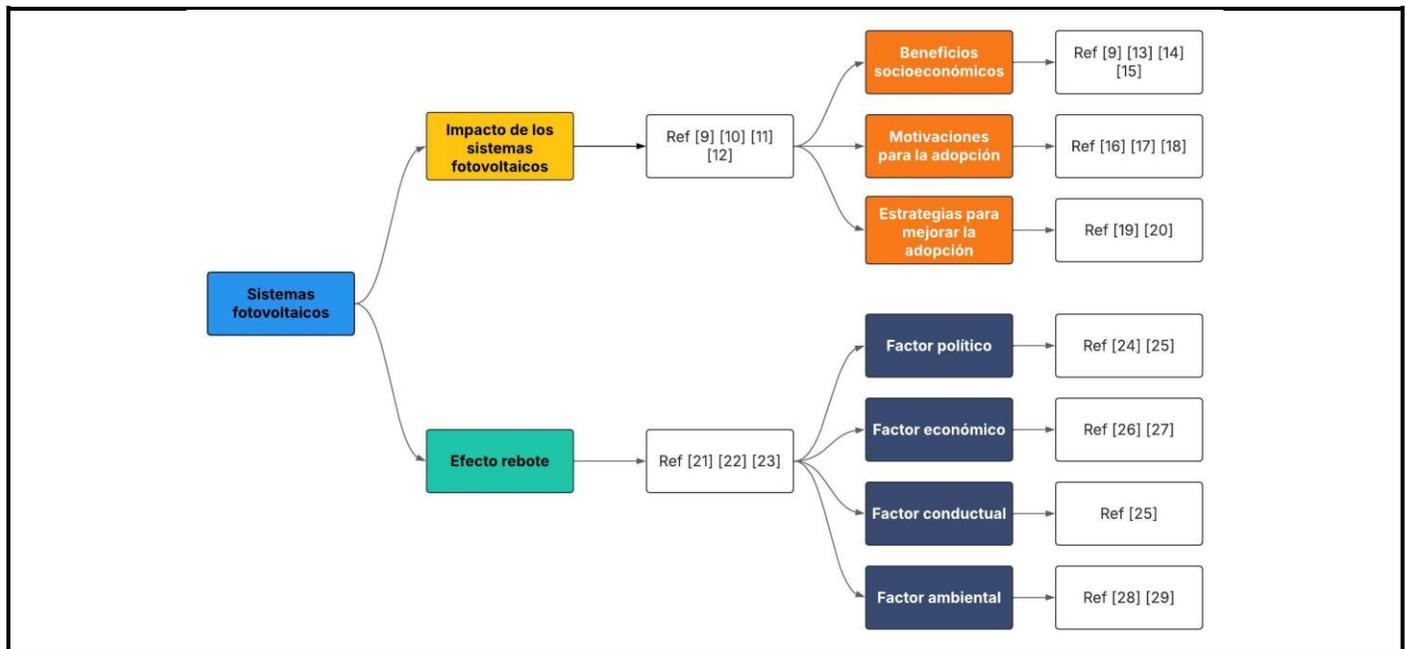


Figura 1. Representación esquemática de los puntos presentados en la revisión literaria.

ahorrar en sus facturas eléctricas.

Numerosos estudios han explorado los impactos socioeconómicos del uso de sistemas solares en hogares, destacando tanto los beneficios como los desafíos asociados a esta tecnología [9][10][11][12].

2.1.1. Beneficios socioeconómicos de los sistemas solares.

Los principales beneficios de la instalación de sistemas fotovoltaicos en hogares son el ahorro en los costes de electricidad y la mejora de la calidad de vida en áreas donde el acceso a la electricidad es limitado o inexistente.

Çamur et al. [13] investigaron la viabilidad y el desempeño tecnoeconómico de un sistema fotovoltaico de 5kW conectado a la red en Nahr El-Bared, Líbano. Para esto, analizaron el perfil de carga de una residencia típica. Obtuvieron que la producción anual de energía de un panel fotovoltaico fijo oscila entre 8564 kWh y 8776 kWh, con mayor producción en primavera y verano. En base a esto, concluyeron que los sistemas fotovoltaicos son económicamente justificables y pueden mitigar las interrupciones eléctricas en la zona

Cerezo-Narváez et al. [9] evaluaron el impacto energético, económico y ambiental de los sistemas fotovoltaicos en viviendas unifamiliares de España. Al comparar el consumo antes y después de la instalación, encontraron que las facturas de energía se reducen entre un 32% y un 81%, y que la inversión se recupera de 3.5

a 7 años cuando la producción se utiliza únicamente para reducir el consumo de electricidad, sin vender el excedente. Wassie y Adaramola [14] examinaron los impactos de la electrificación rural con sistemas fotovoltaicos en Etiopía. Para esto estudiaron 605 hogares rurales utilizando un análisis econométrico. Demostraron que un hogar rural electrificado con energía solar permite ahorrar el equivalente a 43.68 litros de queroseno, en comparación con uno no electrificado. Esta reducción permite ahorrar entre US \$65 y \$75 al año en costos de energía y mejorar la salud por la disminución de la contaminación interior.

Por otro lado, se debe considerar que el uso de paneles solares en los hogares no se limita a cubrir el consumo doméstico; también puede ser una fuente de ingresos adicional en países en desarrollo con acceso limitado a la electricidad, como es el caso de Tanzania. Un análisis del uso de electricidad y de los datos de reembolso de 70000 residencias que adquirieron sus sistemas fotovoltaicos a crédito, demostró que muchas de estas utilizan ocasionalmente el sistema para generar ingresos, lo que a su vez reduce las probabilidades de enfrentar dificultades de pago de sus créditos [15]. Esto sugiere que comercializar la energía excedente generada en los sistemas domésticos contribuye a reembolsar la inversión realizada y a fomentar la estabilidad económica de las residencias.

2.1.2. Motivaciones para la adopción de paneles solares

Entender los factores que motivan la adopción de sistemas fotovoltaicos es esencial para comprender su impacto económico y social en los hogares. Por esta razón, se han realizado estudios dedicados a evaluar por qué las personas deciden o no implementar esta tecnología. En estos estudios, se introducen los conceptos de “early adopters” (adoptantes tempranos) y “later adopters” (adoptantes tardíos). Los early adopters suelen estar motivados por preocupaciones ambientales y la tecnofilia, mientras que los later adopters suelen buscar beneficios económicos, como el ahorro en los costos de electricidad y el aprovechamiento de subsidios asociados a energías renovables [16].

Además de estas motivaciones, se han identificado variables sociales, como el nivel educativo y los ingresos, y variables relacionadas con el entorno, como el tamaño de las viviendas, la densidad de población por vivienda y el valor de las viviendas, que suelen relacionarse con la adopción de sistemas fotovoltaicos y se utilizan como predictores [17][18].

2.1.3. Estrategias para mejorar la adopción de los sistemas solares

Para maximizar la adopción de sistemas fotovoltaicos, se han sugerido diversas estrategias como la eliminación del impuesto al valor agregado (IVA) y aranceles de importación, la facilidad de préstamos, la creación de subsidios y la implementación de mecanismos de pago flexibles [19]. También, se ha destacado la importancia de implementar campañas de concientización y educación sobre los beneficios de los sistemas solares, así como la capacitación de técnicos para la instalación y mantenimiento de los sistemas [20]. Plam y Lantz [20] evaluaron cuantitativamente el efecto de una campaña de información para la adopción de energía solar fotovoltaica realizada en Suecia en 2017. Descubrieron que la participación en la campaña de los propietarios de las viviendas se asoció con un aumento del 29% en las solicitudes de subsidio aprobadas. Estudios como este demuestran que las campañas de información tienen un efecto positivo en aumentar la tasa de adopción de los sistemas fotovoltaicos.

2.2. Efecto rebote

El efecto rebote se refiere a una reacción económica en la cual los ahorros de energía previstos por el uso de

electrodomésticos más eficientes o la instalación de sistemas fotovoltaicos se ven parcialmente contrarrestados por un aumento en la demanda de energía en el hogar [21]. Esto ocurre porque el costo energético de utilizar estos equipos se reduce o se elimina casi por completo, incentivando a la adquisición de electrodomésticos adicionales o el uso extensivo de los existentes. Para obtener información relevante y confiable sobre el impacto del efecto rebote en la facturación final, se suele realizar un estudio de la demanda energética de la residencia, evaluando el historial de consumo antes y después de realizar la mejora o instalación del sistema fotovoltaico, para finalmente hacer una comparativa entre los resultados.

Basándose en esto, Australia realizó un estudio donde se analizó el cambio porcentual en el consumo de electricidad antes y después de la instalación del sistema fotovoltaico en un período de tres años, donde se obtuvo un incremento en promedio de 6% de consumo de energía y un 15% de efecto rebote [22]. Posteriormente, en un estudio empírico con una muestra de 1.7 millones de residencias en Sydney y regiones adyacentes, encontraron efectos rebotes de 16 a 21% por kWh de energía solar generada.

Estos mismos resultados de efecto rebote fueron obtenidos en el año 2019 por Qiu Y. al realizar una recopilación de datos de una empresa de servicios públicos en los EE. UU, donde se incluyen datos de medidores eléctricos y de encuestas. A diferencia de los estudios citados anteriormente, incluyeron la estimación del efecto rebote solar entre hogares prosumidores y no prosumidores, dando un valor de hasta el 18% de incremento al comparar el consumo de energía en las residencias prosumidor [23].

2.2.1. Factor político

El efecto rebote puede ser influenciado por diversos factores políticos que podrían afectar en la adopción de la tecnología y el propósito de desarrollo del proyecto en sitio. Beneficios como los subsidios e incentivos, políticas de energía renovable, regulaciones tarifarias y normativas, pueden aumentar la adopción de los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, al ser tan accesibles, podrían llevar a un uso menos consciente de la energía. En un estudio desarrollado en el año 2020, Le et al. [24], quienes también combinaron datos de medición y encuestas, encontraron un pequeño efecto de conservación para los prosumidores fotovoltaicos

estadounidenses que están incentivados financieramente a inyectar a la red la mayor cantidad posible de su electricidad excedente [24]. Por otro lado, en Alemania se desarrollaron diferentes normativas que fueron modificadas con el transcurrir de los años. En estas se les daban ciertos beneficios a aquellas residencias con sistemas fotovoltaicos. Por lo tanto, dependiendo de la época en la cual se instaló el sistema fotovoltaico, es más atractivo para los hogares inyectar toda la electricidad a la red o más rentable utilizarla ellos mismos, aunque con algunas diferencias en cuanto al beneficio económico preciso. Por ejemplo, al mediodía en verano, los propietarios de sistemas fotovoltaicos en Alemania están obligados a permitir que los operadores de la red regulen su sistema (recibiendo una compensación global por los ingresos perdidos). Alternativamente, los sistemas más pequeños por debajo de 30 kW pueden limitar su inyección al 70% de su potencia efectiva máxima. Es por esto por lo que, para la mayoría de los hogares con instalaciones fotovoltaicas recientes, existe un límite en la cantidad que pueden inyectar a la red [25].

2.2.2. Factor económico

El factor económico actúa como un potente catalizador del efecto rebote debido a su influencia directa en el poder adquisitivo de una residencia. En contextos de mayores ingresos, las familias suelen tener más recursos disponibles para satisfacer una variedad de necesidades y deseos, lo que frecuentemente se traduce en la adquisición de una mayor cantidad de equipos eléctricos para el hogar.

El aspecto económico no solo conlleva desafíos, ya que la disponibilidad de mayores ingresos en una residencia aumenta la probabilidad de que se realicen inversiones impulsadas por lograr la eficiencia en el uso de equipos [26]. En este aspecto, destacan los sistemas de domótica aplicados a la eficiencia energética. Estos permiten supervisar, controlar y racionalizar el consumo de energía eléctrica de cada elemento, para obtener una reducción significativa del consumo que va del 30 al 40% [27].

2.2.3. Factor conductual

Va estrictamente relacionado con rutinas cotidianas que generalmente están determinadas principalmente por hábitos, prácticas sociales, esquemas aprendidos y señales situacionales. Factores psicológicos pueden fomentar o limitar la aparición de efectos rebote. Esto

tiene que ver con el grado en que las necesidades ya están satisfechas [25]. Otro de los aspectos relevantes que aportan al efecto rebote es la falta de conocimiento del comportamiento del mercado eléctrico, donde los usuarios finales desarrollan tareas diarias con equipos electrodomésticos o eléctricos en horarios donde la generación de energía es más costosa para aquellos países donde no se subsidia la energía. De igual forma, no combinan esto con programación de temporizadores o algún tipo de domótica, por lo que se suele dejar equipos encendidos a pesar de no ser necesario.

2.2.4. Factor ambiental

Dentro del factor ambiental surge el término licencia moral, el cual es un concepto psicológico y ético donde las personas tienden a justificar comportamientos cuestionables o menos morales después de haber realizado una acción considerada ética o moralmente positiva. Si los individuos ven la acción inicial como una señal de compromiso con un objetivo específico, es más probable que actúen de manera coherente con ese objetivo [28]. No obstante, si la acción inicial se percibe como un avance o incluso como la culminación del objetivo, es más probable que ocurra el fenómeno de la licencia moral.

La conciencia sobre las cuestiones ambientales determina el cambio en sus comportamientos de consumo. Los consumidores son cada vez más competentes, sensibles al medio ambiente y agradecidos de los valores de sostenibilidad [29]. Cada vez con más frecuencia toman decisiones informadas en el área de su huella ecológica y tienen una propensión cada vez mayor a influir en la de otros.

3. Metodología

En esta sección, se describen los métodos y procedimientos utilizados para cumplir con los objetivos de la investigación. La estrategia utilizada se enmarca en cinco etapas, las cuales se muestran en la figura 2.

3.1 Recopilación de datos

Para evaluar el consumo energético y los hábitos de los usuarios, se diseñó una encuesta para recopilar información de diversas residencias a nivel nacional. Se utilizó un cuestionario, con preguntas categóricas y cuantitativas, aplicado a una muestra de 101 hogares mediante un enfoque de muestreo no probabilístico,

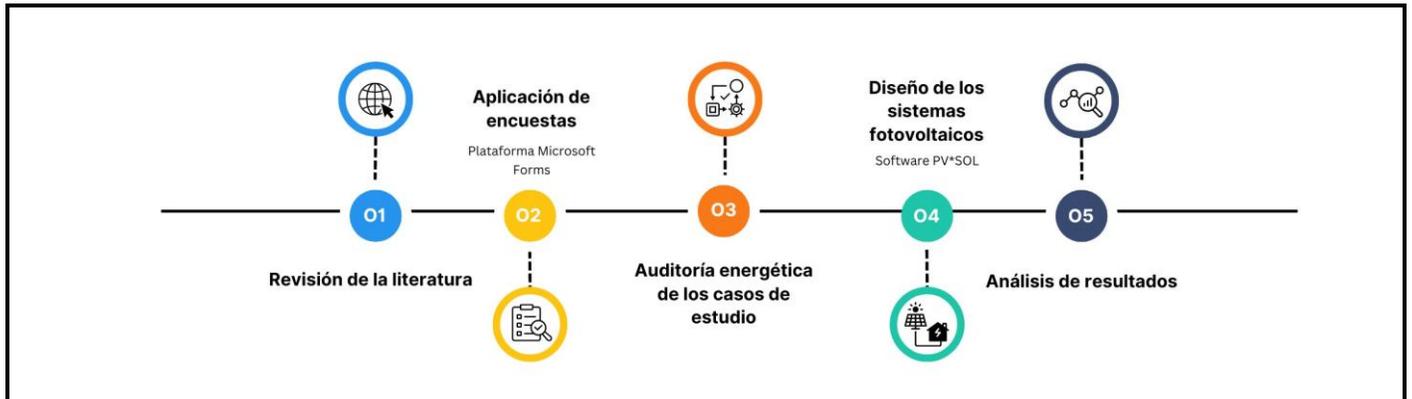


Figura 2. Diagrama esquemático de la metodología.

basado en accesibilidad y conveniencia. La encuesta fue distribuida en línea a través de redes sociales, lo que permitió recopilar respuestas de hogares dispuestos a participar en el estudio. Aunque este método no garantiza una representatividad estricta de la población panameña, proporciona una visión preliminar sobre los hábitos de consumo energético.

El cuestionario constó de 31 preguntas organizadas en dos secciones: datos demográficos y características del hogar, y uso de electricidad.

Esta fue elaborada a través de la plataforma Microsoft Forms.

3.2 Análisis del consumo energético en las residencias

Para evaluar el consumo, se realizó una auditoría energética y un análisis histórico de consumo de tres viviendas unifamiliares en Panamá conectadas a la red eléctrica, cada una representativa de una de las tarifas de baja tensión simple [31]. La selección de estas se realizó con el fin de evaluar el impacto de las distintas tarifas sobre el consumo residencial y explorar las oportunidades de ahorro en cada caso.

Para estructurar la metodología, se siguió la norma **ISO 50002:2014**, específicamente los puntos 3.12, 3.7 y 3.4. Esta se presenta a continuación:

- Se seleccionaron tres residencias que representan las tarifas BTS1, BTS2 y BTS3. La residencia BTS1 se ubica en la provincia de Veraguas (San Martín de Porres, Las Palmeras), con 4 habitantes fijos y 2 intermitentes; la residencia BTS2 en la provincia de Veraguas (Santiago, Rodrigo Luque, El Quindío), con 3 habitantes fijos y 1 intermitente; y la residencia BTS3 en la provincia de Panamá (San Miguelito, José Domingo Espinar, Villa Lucre), con 4 habitantes. Las

características constructivas de las residencias se muestran en la tabla 1.

- Se recopilaron los datos históricos de consumo eléctrico de cada una de las residencias durante un período de 12 meses. Esta información se obtuvo de las facturas eléctricas proporcionadas por los propietarios.
- Se determinaron los patrones de uso de energía y los meses de mayor y menor demanda.
- Se realizó una auditoría energética en cada residencia para identificar los patrones de consumo y las principales fuentes de demanda. La auditoría incluyó la inspección de electrodomésticos y equipos eléctricos, el análisis del uso diario de cada uno de los equipos y la identificación de las áreas y usos finales de mayor consumo.
- Se identificaron posibles ineficiencias energéticas en las residencias y se plantearon diversas medidas de ahorro.

3.3 Diseño de los sistemas fotovoltaicos

Se diseñaron sistemas fotovoltaicos personalizados para cada residencia, en base a los resultados de la auditoría energética y el análisis histórico de consumo. Para esto, se consideró la ubicación e irradiación de cada caso, sin incluir el efecto rebote. El diseño y simulación se realizó con PV*SOL [31], un software especializado que permite planificar, dimensionar y analizar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, aunque sus predicciones son detalladas, se debe considerar que dependen de datos climáticos disponibles y supuestos idealizados. PV*SOL cuenta con un margen de error de 5% a 10% para la estimación de generación anual de energía en comparación con mediciones reales.

Tabla 1. Características constructivas de las residencias.

Caso de estudio	Año de construcción	m ² de Construcción	Material del tejado	Material de las paredes	Material del suelo	Tipo de ventana
BTS 1	1996	103	Lámina de zinc + lámina de cielo raso de yeso	Bloque de concreto + repello de cemento	Losa de concreto + baldosas	Ventana de celosía
BTS 2	2004	185	Lámina de zinc	Bloque de concreto + repello de cemento	Baldosas	Ventana de celosía
BTS 3	1999	153	Tejas sobre lámina de zinc	Bloque de concreto + repello de cemento	Baldosas	Ventana de celosía

4. Resultados y discusión

4.1 Recopilación de datos

La tabla 2 presenta los resultados de la encuesta realizada. Las preguntas relacionadas con los datos demográficos son variables categóricas (género, lugar y tipo de residencia), discretas (cantidad de residentes) y continuas (edad). Las variables relacionadas con el uso de electricidad, como el tipo de facturación y tipo de iluminación, son considerados datos categóricos.

La media de edad de los entrevistados fue de 28.62 años. En cuanto al género, el 46.5% de los encuestados fueron hombres, el 52.5% mujeres y el 1% prefirió no indicar su género. El 84.2% de los encuestados indicaron que residen en casas unifamiliares y el 15.8% en apartamentos. El 50.5% de los encuestados residen en la provincia de Panamá.

Con respecto al uso de electricidad, el 83.2% de los encuestados tienen conocimiento del tipo de facturación residencial y el 16.8% no lo tiene. En términos de consumo eléctrico mensual, el 43.6% de los encuestados pertenecen a la tarifa BTS1, el 28.7% a BTS2, el 19.8% a BTS3 y el 7.9% indicaron que no tiene conocimiento de su consumo.

Los electrodomésticos más utilizados por los encuestados son: lavadora (86.1%), televisión (66.3%), aire acondicionado (50.5%), horno/microondas (41.6%), secadora (30.7%) y otros electrodomésticos (30.7%).

4.2 Análisis de consumo energético en las residencias BTS1, BTS2 y BTS3

De las auditorías energéticas realizadas a las tres residencias seleccionadas como casos de estudio representativos se obtuvieron los siguientes resultados. La residencia BTS1 tiene un consumo mensual aproximado de 162.77 kWh/mes. La distribución de este consumo por usos finales se presenta en la figura 3, donde se observa que los electrodomésticos, equipos de refrigeración (refrigerador) y abanicos son los de mayor

consumo, con un 30.3%, 29.3% y 26.6% respectivamente.

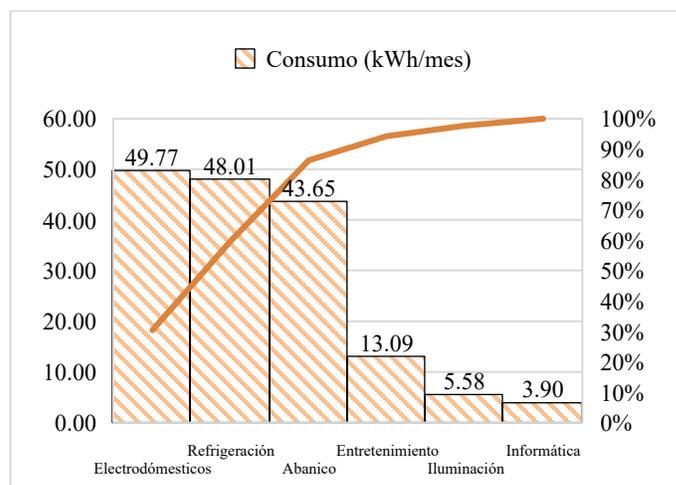


Figura 3. Consumo por uso final en la residencia BTS1.

Para el caso de la residencia BTS2, se obtuvo un consumo mensual de 641.20 kWh/mes. La figura 4 muestra la distribución de consumo por usos finales de esta, siendo los equipos de refrigeración (refrigerador) los de mayor consumo, representado un 37.7% del total.

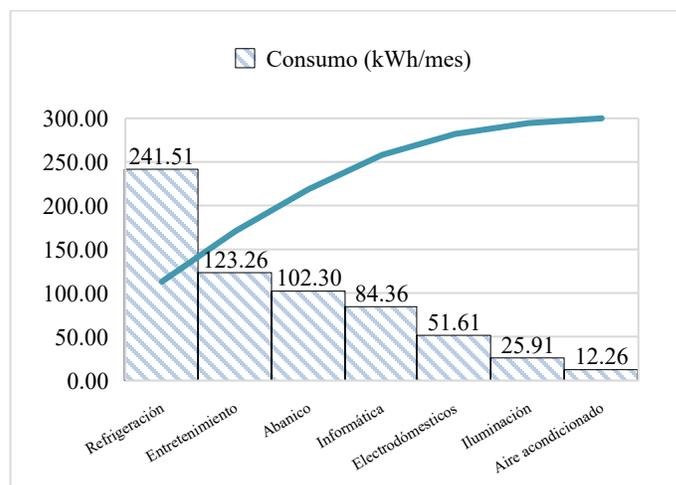


Figura 4. Consumo por uso final en la residencia BTS2.

Por último, para la residencia BTS3 se obtuvo un consumo de 1116.79 kWh/mes. En la figura 5 se muestra la distribución de consumo por usos finales. En esta residencia el aire acondicionado representa el 64.4% del consumo mensual total.

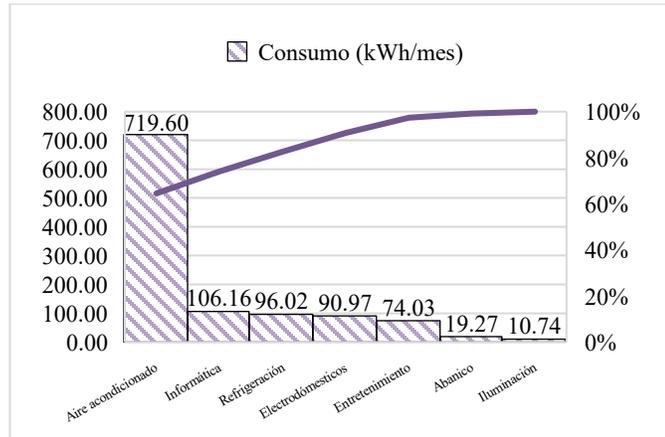


Figura 5. Consumo por uso final en la residencia BTS3.

4.3 Diseño de los sistemas fotovoltaicos residenciales

Mediante el software PV*SOL se diseñaron sistemas fotovoltaicos personalizados para cada una de las tres residencias auditadas, considerando sus necesidades energéticas y las condiciones climáticas de su ubicación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos, los cuales se basan en las simulaciones realizadas con este software.

4.3.1. Diseño FV para BTS 1

Para la residencia BTS1 se diseñó un sistema de 2kWp, compuesto por cuatro módulos fotovoltaicos marca Longi Solar modelo Lr5-66 Hph 500 M y un inversor Huawei Technologies modelo Sun2000-2ktl-1. La superficie de generación es de 9.39 m², con una producción mensual estimada de 240 kWh/mes. La figura 6 refleja el consumo de energía y la inyección a la red durante un año.

Tabla 2. Resumen de las respuestas obtenidas en los parámetros del cuestionario realizado

	Pregunta	Respuesta	N	Pregunta	Respuesta	N
<i>Datos Demográficos</i>	Edad	18 – 24	54	¿En qué distrito de Coclé reside?	Penonomé	1
		25 – 34	26	¿En qué distrito de Colón reside?	Colón	1
		35 – 44	9	¿En qué distrito de Herrera reside?	Chitré	1
		45 – 54	8	¿En qué distrito de Panamá reside?	Balboa	1
		55 - 64	4		Panamá	30
	Género	Masculino	47		San Miguelito	18
		Femenino	53	¿En qué distrito de Veraguas reside?	Atalaya	1
		Prefiero no decirlo	1		Río de Jesús	1
	Tipo de residencia	Apartamento	16		Santiago	19
		Casa unifamiliar	85		Soná	2
	¿Cuántas personas viven en su residencia?	1	2	¿En qué distrito de Panamá Oeste reside?	Arрайján	13
		2	18		La Chorrera	8
		3	28			
		4	28			
		5 o más	25			
	¿En qué provincia reside?	Coclé	1			
		Colón	1			
		Herrera	1			
Panamá		51				
Veraguas		24				
	Panamá Oeste	23				

Tabla 2. Continuación 1

	Pregunta	Respuesta	N	Pregunta	Respuesta	N	
	<i>Uso de Electricidad</i>	¿Conoces el tipo de facturación de tu residencia?	Sí	84	Si encuentras una habitación con la luz encendida y necesitas ir a otro lugar:	Apagas la luz	60
No			17	La mantienes encendida		41	
¿Cuál es su consumo promedio mensual de electricidad?		BTS 1 (B/. 1 – B/. 54)	44	Si estás utilizando el celular o la computadora, ¿Sueles tener la televisión encendida?	Sí	32	
		BTS 2 (B/. 55 – B/. 134)	29		No	69	
		BTS 3 (arriba de B/. 135)	20		Si encuentras la luz encendida de una habitación donde no se hay nadie, ¿la apagarías?	Sí	97
		No sé / Desconozco	8			No	4
¿Qué tipo de iluminación utiliza principalmente?		Incandescentes	11	A la hora de comprar un electrodoméstico me fijo en:	El tamaño	6	
		Fluorescentes	10		Tipo de tecnología	52	
		Led	80		Nivel de eficiencia energética	43	
Las bombillas que utiliza irradian más luz según:		La potencia de la bombilla	28	Si tuviese otro electrodoméstico similar, pero con mayor eficiencia, ¿Cambiarías de opinión?	Mantengo mi decisión	12	
		Los lúmenes de la bombilla	37		Considero cambiar	48	
		No sé / Desconozco	36		Compro el equipo	41	
		Apagar las luces cuando no se usan	94				
¿Qué medidas tomas para reducir su consumo energético?		Desconectar los electrodomésticos	57	¿Conoces como funcional el mercado de energía en Panamá?	Sí	41	
		Utilizar electrodomésticos de bajo consumo	40		No	57	
		Usar bombillas de bajo consumo	63		¿Tiene algún sistema de energía renovable en casa?	Sí	7
		Utilizar programas de ahorro energético	25			No	94
		Otras	4			¿Cuál fue el motivo que le impulsó a instalar paneles solares?	Costo de energía elevado
Lavadora		87	Conciencia ambiental	4			
Secadora		31	Muy costoso	58			
¿Qué electrodomésticos utiliza con mayor frecuencia?		Lavavajillas	1	¿Cuál es su principal impedimento?	No sé quién los vende	3	
		Horno / Microondas	42		Desconocimiento	30	
		Aire Acondicionado	51	¿Te gustaría instalar sistemas fotovoltaicos?	Sí	71	
		Calefacción Eléctrica	8		No	4	
		TV	67		Quizás	16	
		Otras	31				

4.3.2. Diseño FV para BTS 2

Para la residencia BTS2 se diseñó un sistema de 6kWp, compuesto por 12 módulos fotovoltaicos marca Longi Solar modelo Lr5-66 Hph 500 M y un inversor Huawei Technologies modelo Sun2000-5ktl-1. La superficie de generación es de 28.5 m², con una producción mensual

estimada de 720 kWh/mes. La figura 7 refleja el consumo de energía y la inyección a la red durante un año.

4.3.3. Diseño FV para BTS 3

Para la residencia BTS3 se diseñó un sistema de 10kWp, compuesto por 20 módulos fotovoltaicos marca Longi Solar modelo Lr5-66 Hph 500 M y un inversor

marca Huawei Technologies modelo Sun2000-10k-Lco. La superficie de generación es de 47.49 m², con una producción mensual estimada de 1200 kWh/mes. La figura 8 refleja el consumo de energía y la inyección a la red durante un año.

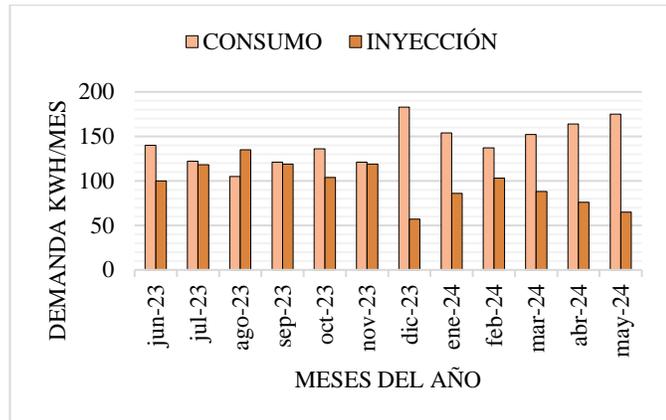


Figura 6. Consumo de energía vs inyección a la red (simulación para la residencia BTS1).

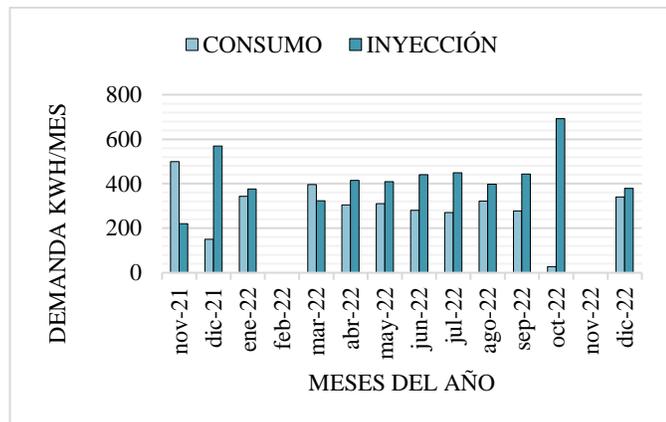


Figura 7. Consumo de energía vs inyección a la red (simulación para la residencia BTS2).



Figura 8. Consumo de energía vs inyección a la red (simulación para la residencia BTS3).

Para asegurar que el sistema fotovoltaico pueda satisfacer las necesidades energéticas futuras, es fundamental anticipar y planificar para un posible incremento en el consumo. Un aumento del 15% atribuido al efecto rebote es una estimación razonable para evitar subdimensiones en el sistema, lo cual podría reducir la efectividad económica y ambiental del sistema fotovoltaico.

Debido a esto, se tomó el mes de facturación más alta dentro del historial de consumo de las residencias en estudio. En diciembre de 2023, el consumo fue de 183 kWh en la residencia BTS1, ajustándose a una nueva demanda de 210.45 kWh/mes tras un incremento del 15%. Con el sistema fotovoltaico diseñado, se logra inyectar 29.55 kWh a la red.

En noviembre de 2021, para la residencia BTS2, el consumo fue significativamente mayor, 500 kWh, ajustándose a 575 kWh/mes. Esto permite una inyección a la red de 145 kWh, revelando un sobredimensionamiento del sistema.

Finalmente, en mayo de 2023, el consumo alcanzó 1044 kWh/mes para la residencia BTS3, y tras el ajuste, la nueva demanda fue de 1200.6 kWh, con una leve inyección negativa de -0.6 kWh, por lo que se requiere absorber energía de la red.

Estos datos indican que los ajustes del 15% en la demanda influyen considerablemente en la inyección de energía, variando según el consumo inicial y la tarifa aplicada.

5. Conclusiones

Este estudio demostró el potencial de los sistemas fotovoltaicos para reducir el consumo de electricidad de la red. La encuesta reveló que existe un alto interés y disposición entre los hogares panameños para adoptar la energía solar, aunque existen barreras como el alto costo inicial y el desconocimiento sobre la tecnología. Esto resalta la necesidad de realizar campañas de promoción y educación sobre los beneficios, funcionamiento, opciones de financiamiento e incentivos económicos disponibles para facilitar la adopción de estos sistemas.

Los resultados de las auditorías energéticas y los diseños realizados confirman que la energía solar puede cubrir el consumo energético de las residencias. No obstante, es esencial considerar las variaciones anuales en generación y consumo, así como el efecto rebote, que podría aumentar la demanda energética. Para respaldar esta afirmación, se recomienda realizar mediciones reales

de los datos de generación y consumo en residencias con sistemas fotovoltaicos ya instalados.

Para mejorar la precisión de la encuesta se recomienda continuar la recolección de datos y realizar un análisis financiero detallado de los sistemas fotovoltaicos diseñados, considerando los parámetros establecidos por el Manual de Procedimiento para Autoconsumo con Fuentes Nuevas, Renovables y Limpias.

Los hallazgos presentados pueden servir como base para futuros estudios y como apoyo a diversas iniciativas que buscan promover la adopción de energía solar en Panamá. Además, se identifica un posible incremento en el consumo energético tras la instalación de sistemas fotovoltaicos, lo que podría ser relevante para el programa Operación Solar de la Secretaría Nacional de Energía. Este programa, que busca donar sistemas fotovoltaicos a 663 residencias BTS1 en sectores vulnerables, podría beneficiarse de estos resultados para evaluar el efecto rebote en Panamá y ajustar la planificación energética, garantizando un margen de seguridad en la generación.

Por último, se debe tener en cuenta que este estudio tiene limitaciones debido al enfoque de muestreo no probabilístico utilizado, lo que restringe la representatividad de los datos de la encuesta. Además, no se realizaron pruebas de sensibilidad ni validación cruzada en los modelos de consumo energético empleados para el diseño de los sistemas fotovoltaicos, por lo que sus estimaciones pueden presentar variaciones respecto a la generación real. Se sugiere realizar estudios adicionales con muestras más amplias y representativas, así como validar los modelos para mejorar la precisión de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los dueños de las residencias por permitarnos realizar las auditorias energéticas y a todas las personas que participaron en las encuestas, cuyos aportes fueron clave para enriquecer el trabajo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

A.A. se encargó de la recolección y análisis de datos y de la redacción del documento.

A.C. se encargó de la revisión literaria, elaboración de auditorías, revisión y redacción del documento.

E.C. se encargó de la revisión literaria, diseño de sistemas fotovoltaicos y redacción del documento.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Contraloría General de la República, “Comentario de la Población,” Panamá, 2023. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.inec.gob.pa/archivos/P053342420231009161532Comentarios_Poblacion%20RFB%202023%20VF.pdf
- [2] ASEP, “Estadística del mercado eléctrico panameño,” Panamá, Aug. 2023. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/electricidad/estadisticas_mensuales/2023/A_GOSTO_2023.pdf
- [3] IRENA, “Evaluación de la flexibilidad del sistema eléctrico de Panamá,” Panamá, Dec. 2018. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Dec/FLEXT_OOL_Panama.pdf
- [4] ETESA, “PESIN 2020-2034. Tomo III Plan de expansión de transmisión,” Panamá, Nov. 2022. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.etsa.com.pa/es/plan-expansion-del-sistema-interconectado-naciona>
- [5] H. Moyano-Bojorque, “Economía residencial: Impacto en la Implementación de Energías Alternativas,” *Journal of Science and Research*, Dec. 2024, doi: 10.5281/zenodo.14804459.
- [6] Secretaría Nacional de Energía, “Plan Energético Nacional 2015 - 2050,” Panamá, Apr. 2016. Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://www.energia.gob.pa/wp-content/uploads/2020/08/Plan-Energetico-Nacional-2015-2050-1_compressed-1.pdf
- [7] Ministerio de la Presidencia: Secretaría de Energía, “Lineamientos Estratégicos Agenda de Transición Energética 2020-2030,” Panamá, Nov. 2020. Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.energia.gob.pa/mdocs-posts/lineamientos-de-la-agenda-de-transicion-energetica/>
- [8] ONU, “Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna,” Organización de las Naciones Unidas. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/#:~:text=El%20Objetivo%207%20pretende%20garantizar,pero%20no%20lo%20suficientemente%20r%C3%A1pido.>
- [9] A. Cerezo-Narváz, M. J. Bastante-Ceca, J.-M. Piñero-Vilela, and J.-M. Piñero-Vilela, “Economic and Environmental Assessment on Implementing Solar Renewable Energy Systems in Spanish Residential Homes,”

- Energies (Basel)*, vol. 14, no. 14, p. 4183, 2021, doi: 10.3390/en14144183.
- [10] G. Martinopoulos, "Are rooftop photovoltaic systems a sustainable solution for Europe? A life cycle impact assessment and cost analysis," *Appl Energy*, vol. 257, p. 114035, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114035>.
- [11] A. D. Beyene, A. Mekonnen, M. Jeuland, and S. Czakon, "The Socioeconomic Impacts of Off-Grid Solar Home Systems in Rural Ethiopia," *SSRN*, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4480025.
- [12] J. Lee and M. M. Shepley, "Benefits of solar photovoltaic systems for low-income families in social housing of Korea: Renewable energy applications as solutions to energy poverty," *Journal of Building Engineering*, vol. 28, p. 101016, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101016>.
- [13] H. Çamur, Y. Kassem, and E. Alessi, "A Techno-Economic Comparative Study of a Grid-Connected Residential Rooftop PV Panel: The Case Study of Nahr El-Bared, Lebanon," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 11, no. 2, pp. 6956–6964, Apr. 2021, doi: 10.48084/etasr.4078.
- [14] Y. T. Wassie and M. S. Adaramola, "Socio-economic and environmental impacts of rural electrification with Solar Photovoltaic systems: Evidence from southern Ethiopia," *Energy for Sustainable Development*, vol. 60, pp. 52–66, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.12.002>.
- [15] C. Weisser, F. Lenel, Y. Lu, K. Kis-Katos, and T. Kneib, "Using solar panels for business purposes: Evidence based on high-frequency power usage data," *Dev Eng*, vol. 6, p. 100074, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2021.100074>.
- [16] E. K. Schwartz and M. Krarti, "Review of Adoption Status of Sustainable Energy Technologies in the US Residential Building Sector," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: 10.3390/en15062027.
- [17] E. Schulte, F. Scheller, D. Sloot, and T. Bruckner, "A meta-analysis of residential PV adoption: the important role of perceived benefits, intentions and antecedents in solar energy acceptance," *Energy Res Soc Sci*, vol. 84, p. 102339, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102339>.
- [18] N. Balta-Ozkan, J. Yildirim, P. M. Connor, I. Truckell, and P. Hart, "Energy transition at local level: Analyzing the role of peer effects and socio-economic factors on UK solar photovoltaic deployment," *Energy Policy*, vol. 148, p. 112004, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112004>.
- [19] A. C. Lemay, S. Wagner, and B. P. Rand, "Current status and future potential of rooftop solar adoption in the United States," *Energy Policy*, vol. 177, p. 113571, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113571>.
- [20] A. Palm and B. Lantz, "Information dissemination and residential solar PV adoption rates: The effect of an information campaign in Sweden," *Energy Policy*, vol. 142, p. 111540, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111540>.
- [21] J. E. Mejía Alvarado, "Propuesta de mejora en instalación de proyecto fotovoltaico a nivel residencial, SMARTSOLAR," Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.unitec.edu/xmlui/handle/123456789/9685>
- [22] S. H. Toroghi and M. E. Oliver, "Framework for estimation of the direct rebound effect for residential photovoltaic systems," *Appl Energy*, vol. 251, p. 113391, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.113391.
- [23] Y. Qiu, M. E. Kahn, and B. Xing, "Quantifying the rebound effects of residential solar panel adoption," *J Environ Econ Manage*, vol. 96, pp. 310–341, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.JEEM.2019.06.003.
- [24] X. Li, M. K. Lim, D. Ni, B. Zhong, Z. Xiao, and H. Hao, "Sustainability or continuous damage: A behavior study of prosumers' electricity consumption after installing household distributed energy resources," *J Clean Prod*, vol. 264, p. 121471, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121471>.
- [25] H. Wirth and F. Ise, "Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland", Accessed: Jun. 02, 2024. [Online]. Available: www.pv-fakten.de
- [26] N. Boogen, C. Daminato, M. Filippini, and A. Obrist, "Can information about energy costs affect consumers' choices? Evidence from a field experiment☆," *J Econ Behav Organ*, vol. 196, pp. 568–588, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JEBO.2022.02.014.
- [27] R. Arroyo and J. Angulo, "La domótica como aplicación de eficiencia energética en Ecuador.," *Portal de revista ULA*, Dec. 2022.
- [28] S. R. Sorrell *et al.*, "Moral Licensing-Another Source of Rebound?," *Frontiers in Energy Research | www.frontiersin.org*, vol. 1, p. 38, 2018, doi: 10.3389/fenrg.2018.00038.
- [29] M. Jaciow, E. Rudawska, A. Sagan, J. Tkaczyk, and R. Wolny, "The Influence of Environmental Awareness on Responsible Energy Consumption—The Case of Households in Poland," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/EN15155339.
- [30] Empresa de Distribución Eléctrica Metro-Oeste S.A., "Pliego Tarifario aplicable a los clientes regulados y grandes clientes habilitados en el mercado mayorista de Electricidad de EDEMET," Oct. 2023. Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: https://asep.gob.pa/wp-content/uploads/electricidad/anexos/anexo_a_18737_elec.pdf
- [31] "PV*SOL – Planifique y diseñe mejores sistemas fotovoltaicos con software solar profesional | PV*SOL y PV*SOL premium." Accessed: Jun. 17, 2024. [Online]. Available: <https://pvsol.software/en/>