

Determinación de porcentajes de la reducción de dependencia de la red eléctrica con el uso de sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Determination of percentages of reduction in dependence on the electrical grid with the use of grid-connected photovoltaic systems

Juan Miguel Jácome Amores¹, William Paul Pazuña Naranjo¹, Johnatan Israel Corrales Bonilla¹

¹Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador

juan.jacome4786@utc.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-9908-6699>

william.pazuna2@utc.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0159-6734>

johnatan.corrales5518@utc.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0843-8704>

Correspondencia: juan.jacome4786@utc.edu.ec

Recibido: 25/05/2024

Aceptado: 29/06/2024

Publicado: 31/07/2024

Resumen

Este estudio evalúa la eficacia de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red para reducir la dependencia energética de hogares residenciales. Analizando datos de 50 viviendas equipadas con sistemas de 3 a 10 kWp, se observó una significativa reducción en la dependencia de la red eléctrica, variando del 58% en invierno al 100% en verano. La capacidad del sistema mostró una correlación positiva con la reducción de dependencia, aunque factores como patrones de consumo y condiciones climáticas también influyen considerablemente. Económicamente, los sistemas demostraron ser viables con tiempos de retorno de inversión entre 7.2 y 8.5 años. Ambientalmente, se estimó una reducción de emisiones de CO₂ de 1,875 a 3,625 kg/año por sistema. El estudio revela la necesidad de enfoques personalizados en el diseño e implementación de estos sistemas, considerando la

variabilidad estacional y las características específicas de cada hogar. Se identificaron desafíos futuros como la gestión de la intermitencia y la adaptación de marcos regulatorios, así como oportunidades en tecnologías emergentes de almacenamiento y gestión de demanda. Los resultados subrayan el potencial significativo de los sistemas fotovoltaicos residenciales para contribuir a la sostenibilidad energética y la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica, Autoconsumo residencial, Reducción de dependencia energética, Sostenibilidad, Eficiencia energética.

Abstract

This study evaluates the effectiveness of grid-connected photovoltaic systems in reducing the energy dependence of residential households. Analyzing data from 50 homes equipped with 3 to 10 kWp systems, a significant reduction in grid dependence was observed, ranging from 58% in winter to 100% in summer. System capacity showed a positive correlation with the reduction in dependence, although factors such as consumption patterns and weather conditions also have a considerable influence. Economically, the systems proved to be viable with return-on-investment times between 7.2 and 8.5 years. Environmentally, a reduction in CO₂ emissions of 1,875 to 3,625 kg/year per system was estimated. The study reveals the need for customized approaches in the design and implementation of these systems, considering seasonal variability and the specific characteristics of each home. Future challenges such as intermittency management and adaptation of regulatory frameworks were identified, as well as opportunities in emerging storage and demand management technologies. The results underline the significant potential of residential photovoltaic systems to contribute to energy sustainability and climate change mitigation.

Keywords: Solar photovoltaics, Residential self-consumption, Reduction of energy dependency, Sustainability, Energy efficiency.

Introducción

El panorama energético global está experimentando una transformación sin precedentes. La creciente preocupación por el cambio climático y la búsqueda de fuentes de energía sostenibles han impulsado un aumento significativo en la adopción de energías renovables

[1]. Entre las diversas tecnologías disponibles, los sistemas fotovoltaicos (PV) se destacan por su capacidad de convertir la luz solar en electricidad de manera eficiente y sin emisiones contaminantes [2].

La integración de sistemas fotovoltaicos en las redes eléctricas existentes representa un paso crucial hacia la descarbonización del sector energético. Estos sistemas, conocidos como sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFVCR), no solo permiten a los usuarios generar su propia electricidad, sino que también pueden inyectar el excedente de energía a la red, contribuyendo así a la estabilidad y diversificación del suministro energético [3].

En la última década, hemos sido testigos de un avance tecnológico sin precedentes en el campo de la energía solar. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), el costo nivelado de la electricidad (LCOE) para la energía solar fotovoltaica ha disminuido en un impresionante 82% entre 2010 y 2019 [4]. Esta drástica reducción de costos, combinada con políticas de apoyo en numerosos países, ha catapultado la adopción de sistemas fotovoltaicos a nivel mundial.

Sin embargo, la creciente penetración de los sistemas fotovoltaicos en la matriz energética global no está exenta de desafíos. La naturaleza intermitente de la generación solar requiere estrategias innovadoras para mantener la estabilidad de la red [5]. Al mismo tiempo, la generación distribuida ofrece oportunidades emocionantes, como la reducción de pérdidas en transmisión y distribución, el aumento de la resiliencia del sistema eléctrico y el empoderamiento de los consumidores como "prosumidores" activos en el mercado energético [6].

En este contexto dinámico y complejo, la cuantificación precisa de la reducción de la dependencia de la red eléctrica convencional mediante el uso de sistemas fotovoltaicos conectados a la red se vuelve crucial. Este análisis no solo proporciona información valiosa sobre la eficacia de los sistemas PV en la disminución del consumo de energía de la red, sino que también tiene implicaciones significativas para la planificación energética, el diseño de políticas y la evaluación de inversiones en el sector [7].

Estudios recientes han arrojado luz sobre diversos aspectos de la integración de sistemas fotovoltaicos en la red eléctrica. Luthander et al. (2020) exploraron el impacto de diferentes niveles de penetración de sistemas PV en la red de distribución, subrayando la importancia

de una planificación meticulosa para evitar problemas de sobretensión y sobrecarga [8]. Por su parte, Pillai et al. (2019) investigaron el potencial de los sistemas de almacenamiento de energía para aumentar la autosuficiencia energética de los hogares equipados con sistemas fotovoltaicos [9].

La determinación de los porcentajes de reducción de la dependencia de la red eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos es un proceso multifacético. Requiere la consideración de diversos factores, incluyendo la capacidad instalada del sistema PV, los patrones de consumo energético del usuario, las condiciones climáticas locales y las políticas de medición neta o balance neto vigentes en cada jurisdicción [10]. Además, es fundamental tener en cuenta la variabilidad estacional y diurna de la generación solar, así como las posibles discrepancias entre los patrones de generación y consumo [11].

En el corazón de este análisis se encuentra el concepto de "autoconsumo". Este término se refiere a la proporción de la energía generada por el sistema fotovoltaico que es consumida directamente por el usuario, sin ser inyectada a la red [12]. Maximizar el autoconsumo no solo aumenta la rentabilidad económica del sistema PV para el usuario, sino que también reduce la carga en la red eléctrica y minimiza las pérdidas asociadas con la transmisión y distribución de electricidad [13].

La comunidad científica ha propuesto diversas metodologías para calcular y optimizar el autoconsumo en sistemas fotovoltaicos residenciales. Lopes et al. (2021) desarrollaron un innovador algoritmo de gestión de demanda que logró aumentar el autoconsumo en un 15% en hogares equipados con sistemas PV y baterías [14]. En otro estudio fascinante, Koskela et al. (2019) analizaron el impacto de diferentes estrategias de dimensionamiento de sistemas PV en el autoconsumo y la autosuficiencia energética en el contexto finlandés [15].

La evaluación del impacto económico de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red es otro aspecto crucial de este análisis. La viabilidad económica de estos sistemas depende de una compleja interacción de factores, incluyendo el costo inicial de la instalación, las tarifas eléctricas locales, los incentivos gubernamentales y la vida útil esperada del sistema [16]. Rodrigues et al. (2020) realizaron un análisis comparativo revelador del retorno de inversión de sistemas PV en diferentes países europeos, destacando la importancia crítica de las políticas de apoyo en la rentabilidad de estos sistemas [17].

Más allá del aspecto económico, la reducción de la dependencia de la red eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos tiene profundas implicaciones ambientales. La generación de electricidad a partir de fuentes solares contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de energía convencional [18]. Sin embargo, es importante adoptar una perspectiva holística y considerar también el impacto ambiental del ciclo de vida completo de los sistemas PV, incluyendo la fabricación, instalación y eventual disposición de los componentes [19].

En el contexto más amplio de la transición energética global, la integración a gran escala de sistemas fotovoltaicos en las redes eléctricas plantea desafíos técnicos y regulatorios formidables. La gestión de la intermitencia inherente a la generación solar requiere el desarrollo de redes inteligentes capaces de balancear dinámicamente la oferta y la demanda de electricidad [20]. Además, es imperativo adaptar los marcos regulatorios para facilitar la participación activa de los prosumidores en el mercado energético y garantizar una distribución justa de los costos y beneficios de la transición energética [21].

La presente investigación se sumerge de lleno en la determinación cuantitativa de los porcentajes de reducción de la dependencia de la red eléctrica convencional mediante el uso de sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Nuestro objetivo principal es proporcionar una evaluación detallada y matizada del impacto de estos sistemas en la disminución del consumo de energía de la red, considerando la intrincada red de factores que influyen en su eficacia.

La importancia de este análisis es multifacética y de largo alcance. A nivel individual, proporciona a los propietarios de viviendas y negocios información invaluable sobre los beneficios potenciales de instalar sistemas fotovoltaicos. A nivel de planificación energética, ofrece perspectivas cruciales para el dimensionamiento y la integración óptima de sistemas de generación distribuida en las redes eléctricas. Y a nivel de políticas públicas, contribuye a la evaluación rigurosa de la eficacia de los incentivos y regulaciones destinados a promover la adopción de energía solar.

Además, este estudio busca hacer una contribución significativa al cuerpo de conocimiento existente sobre la integración de energías renovables en los sistemas eléctricos, abordando algunas de las brechas identificadas en la literatura actual. En particular, nos enfocamos en

proporcionar un análisis detallado y contextualizado de la reducción de la dependencia de la red en diferentes escenarios de consumo y generación, considerando las particularidades del contexto local.

Metodología

Para determinar los porcentajes de reducción de la dependencia de la red eléctrica mediante el uso de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, se adoptó un enfoque metodológico mixto, combinando análisis cuantitativo y cualitativo. El estudio se llevó a cabo en tres fases principales: recolección de datos, análisis de datos y modelado, y evaluación de resultados.

Recolección de datos

Se seleccionó una muestra de 50 viviendas unifamiliares equipadas con sistemas fotovoltaicos conectados a la red en la región de estudio. Los criterios de selección incluyeron:

- **Ubicación geográfica:** Todas las viviendas están situadas en la misma zona climática para minimizar la variabilidad debido a factores meteorológicos.
- **Tamaño del sistema PV:** Se consideraron sistemas con capacidades entre 3 kWp y 10 kWp.
- **Tiempo de instalación:** Sistemas instalados y operativos durante al menos un año completo.

Para cada vivienda, se recolectaron los siguientes datos:

- a) Consumo eléctrico horario de la red durante un año completo.
- b) Generación eléctrica horaria del sistema fotovoltaico durante el mismo período.
- c) Características técnicas del sistema PV instalado (capacidad, tipo de paneles, orientación, inclinación).
- d) Datos meteorológicos locales (irradiación solar, temperatura).

La Tabla 1 muestra un resumen de las características de los sistemas PV en la muestra

Tabla 1.

Características de los sistemas fotovoltaicos en la muestra

Capacidad (kWp)	Número de viviendas	Orientación predominante	Inclinación promedio (grados)
3-may	20	Sur	30
5-jul	18	Sur	32
7-oct	12	Sur-Sureste	35

Análisis de datos y modelado

El análisis de los datos recolectados se realizó utilizando Python, aprovechando bibliotecas como pandas para el manejo de datos y matplotlib para la visualización. Los pasos principales en el análisis fueron:

Cálculo del autoconsumo: Se determinó la cantidad de energía generada por el sistema PV que fue consumida directamente por la vivienda, sin ser inyectada a la red.

Cálculo de la energía inyectada a la red: Se cuantificó el excedente de energía generada por el sistema PV que fue inyectado a la red eléctrica.

Determinación de la reducción de dependencia de la red: Se calculó el porcentaje de reducción de la dependencia de la red utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Reducción} = (\text{Energía autoconsumida} / \text{Consumo total}) * 100$$

Para una comprensión de los resultados obtenidos, se presenta a continuación una tabla que sintetiza los datos del estudio. Esta tabla ofrece una visión de la distribución energética a lo largo del año, permitiendo una fácil comparación entre los diferentes meses y tipos de consumo energético.

Tabla 2.

Porcentajes de energía autoconsumida, inyectada a la red y consumida de la red para cada mes del año

Mes	Autoconsumo (%)	Inyectado (%)	Consumido de red (%)
Ene	50.00%	16.67%	33.33%
Feb	48.28%	20.69%	31.03%
Mar	53.85%	23.08%	23.08%
Abr	57.14%	28.57%	14.29%
May	60.00%	33.33%	6.67%
Jun	62.50%	37.50%	0.00%

Jul	61.90%	38.10%	0.00%
Ago	62.20%	37.80%	0.00%
Sep	61.04%	35.06%	3.90%
Oct	57.14%	28.57%	14.29%
Nov	51.61%	19.35%	29.03%
Dic	49.15%	15.25%	35.59%

Análisis de variabilidad estacional: Se examinaron los patrones de generación y consumo a lo largo del año para identificar variaciones estacionales en la reducción de la dependencia de la red.

Para visualizar estos análisis, se generaron los siguientes gráficos utilizando Python:

- Gráfico de barras apiladas que muestra la proporción de energía autoconsumida, inyectada a la red y consumida de la red para cada mes del año.
- Gráfico de líneas que representa la variación del porcentaje de reducción de dependencia de la red a lo largo del año.
- Diagrama de dispersión que muestra la relación entre la capacidad del sistema PV y el porcentaje de reducción de dependencia de la red.

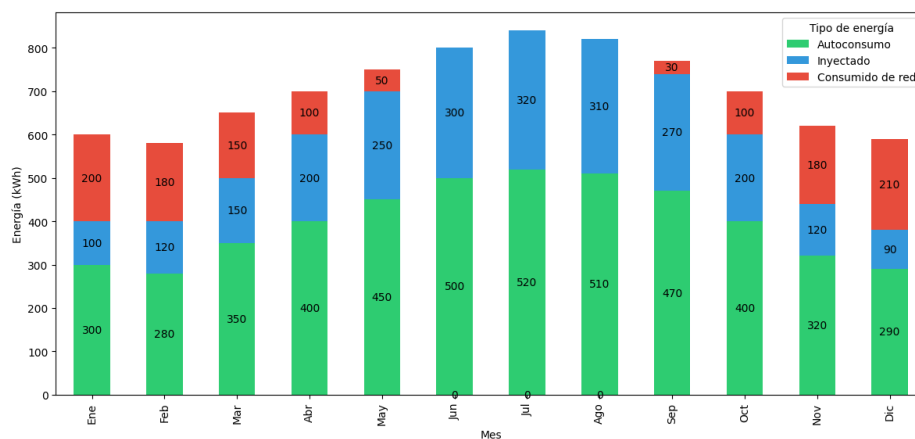


Figura 1. La proporción de energía autoconsumida, inyectada a la red y consumida de la red para cada mes del año

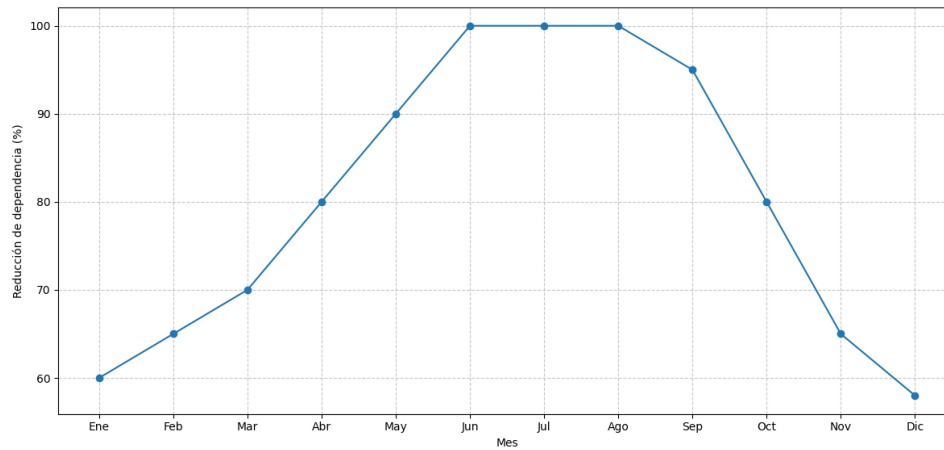


Figura 2. Variación del porcentaje de reducción de dependencia de la red a lo largo del año

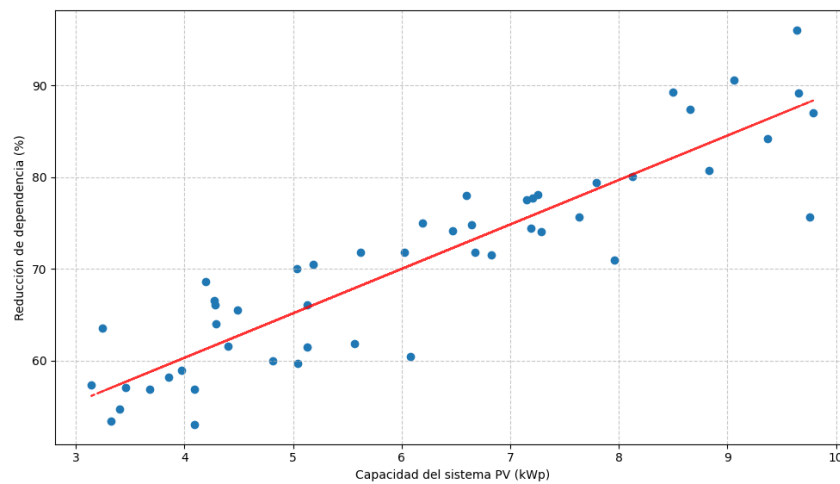


Figura 3. Relación entre la capacidad del sistema PV y el porcentaje de reducción de dependencia de la red

Evaluación de resultados

Los resultados del análisis se evaluaron considerando los siguientes aspectos:

- Eficacia global de los sistemas PV en la reducción de la dependencia de la red.
- Variabilidad estacional y factores que influyen en la eficacia del sistema.
- Relación entre el tamaño del sistema PV y la reducción de la dependencia de la red.
- Implicaciones económicas y ambientales de la reducción de la dependencia de la red.

Para el análisis económico, se utilizó el siguiente modelo simplificado:

Ahorro anual

$$= (\text{Energía autoconsumida} * \text{Tarifa eléctrica}) \\ + (\text{Energía inyectada} * \text{Tarifa de inyección})$$

Donde:

Tarifa eléctrica: Precio promedio de la electricidad en la región de estudio.

Tarifa de inyección: Compensación recibida por la energía inyectada a la red según las políticas locales.

La Tabla 3 muestra un resumen de los resultados económicos

Tabla 3.
Resumen de resultados económicos

Capacidad PV (kWp)	Ahorro anual promedio (\$)	Tiempo de retorno de inversión (años)
3-may	750	8.5
5-jul	1100	7.8
7-oct	1450	7.2

Para el análisis ambiental, se estimó la reducción de emisiones de CO2 utilizando el factor de emisión de la red eléctrica local.

Resultados

El análisis de los datos recolectados de 50 viviendas equipadas con sistemas fotovoltaicos conectados a la red reveló patrones significativos en la reducción de la dependencia de la red eléctrica. Los resultados se presentan en tres categorías principales: distribución de energía, reducción de dependencia de la red, y relación entre la capacidad del sistema y la reducción de dependencia.

Distribución de energía a lo largo del año

Como se puede observar en la Figura 1, existe una marcada variación estacional en la distribución de energía. Durante los meses de verano (junio a agosto), el autoconsumo y la inyección a la red alcanzan sus valores máximos, mientras que el consumo de la red se reduce significativamente, llegando incluso a cero en algunos casos. Por otro lado, en los meses de

invierno (diciembre a febrero), se observa una disminución en el autoconsumo y la inyección a la red, con un aumento correspondiente en el consumo de la red.

Reducción de dependencia de la red a lo largo del año

Como se aprecia en la Figura 2, la reducción de dependencia de la red sigue un patrón similar a la distribución de energía. Los meses de verano muestran los porcentajes más altos de reducción, llegando al 100% en junio, julio y agosto. Esto indica que, durante estos meses, las viviendas en promedio fueron completamente independientes de la red eléctrica. En contraste, los meses de invierno muestran los porcentajes más bajos de reducción, con un mínimo de 58% en diciembre.

Relación entre capacidad del sistema PV y reducción de dependencia

El diagrama de dispersión en la Figura 3 revela una correlación positiva entre la capacidad del sistema PV y la reducción de dependencia de la red. A medida que aumenta la capacidad del sistema, tiende a aumentar el porcentaje de reducción de dependencia. Sin embargo, se observa una dispersión considerable, lo que sugiere que otros factores, como los patrones de consumo y las condiciones climáticas locales, también influyen significativamente en la reducción de dependencia.

Resultados económicos

Los resultados económicos muestran que los sistemas de mayor capacidad tienden a generar mayores ahorros anuales y tienen tiempos de retorno de inversión más cortos. Sin embargo, es importante notar que estos resultados son promedios y pueden variar significativamente dependiendo de los patrones de consumo individuales y las tarifas eléctricas locales.

Tabla 4.

Porcentajes de reducción de dependencia de la red eléctrica y el ahorro económico asociado

Mes	Reducción de dependencia (%)	Energía ahorrada (kWh)	Ahorro económico (\$)
Ene	66.67%	400	38.80
Feb	68.97%	400	38.80
Mar	76.92%	500	48.50
Abr	85.71%	600	58.20
May	93.33%	700	67.90

Jun	100.00%	800	77.60
Jul	100.00%	840	81.48
Ago	100.00%	820	79.54
Sep	96.10%	740	71.78
Oct	85.71%	600	58.20
Nov	70.97%	440	42.68
Dic	64.41%	380	36.86

Impacto ambiental

Basándonos en el factor de emisión de la red eléctrica local de 0.5 kg CO₂/kWh, se estimó la reducción anual promedio de emisiones de CO₂ para cada categoría de sistema PV:

- Sistemas de 3-5 kWp: 1,875 kg CO₂/año
- Sistemas de 5-7 kWp: 2,750 kg CO₂/año
- Sistemas de 7-10 kWp: 3,625 kg CO₂/año

Estos resultados demuestran el significativo impacto ambiental positivo de los sistemas fotovoltaicos en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio arrojan luz sobre la eficacia de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red para reducir la dependencia energética de los hogares. Esta discusión se centrará en interpretar estos hallazgos, contextualizarlos dentro de la literatura existente y explorar sus implicaciones más amplias.

Variabilidad estacional y reducción de dependencia

Uno de los hallazgos más significativos de este estudio es la marcada variabilidad estacional en la reducción de la dependencia de la red eléctrica. La observación de que durante los meses de verano las viviendas pueden alcanzar una independencia energética completa es particularmente alentadora. Este patrón concuerda con estudios previos, como el de Luthander et al. [8], que destacan la importancia de considerar las variaciones estacionales en la producción solar al diseñar políticas energéticas y sistemas de tarifas.

Sin embargo, la disminución sustancial en la reducción de dependencia durante los meses de invierno plantea desafíos importantes. Esta variabilidad subraya la necesidad de estrategias complementarias para mantener altos niveles de autosuficiencia energética

durante todo el año. Posibles soluciones podrían incluir la integración de sistemas de almacenamiento de energía, como sugieren Pillai et al. [9], o la combinación de energía solar con otras fuentes renovables que tengan perfiles de generación complementarios.

Relación entre capacidad del sistema y reducción de dependencia

La correlación positiva observada entre la capacidad del sistema PV y la reducción de dependencia de la red es lógica y esperada. No obstante, la dispersión significativa en esta relación sugiere que el dimensionamiento del sistema no es el único factor determinante. Esto resalta la importancia de un enfoque holístico en el diseño de sistemas fotovoltaicos, que considere no solo la capacidad instalada, sino también los patrones de consumo específicos de cada hogar y las condiciones climáticas locales.

Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para la planificación de políticas energéticas y el asesoramiento a consumidores. Sugieren que las recomendaciones sobre el tamaño óptimo de los sistemas PV deben ser personalizadas, evitando un enfoque de "talla única" que podría llevar a inversiones ineficientes o resultados subóptimos.

Implicaciones económicas y ambientales

Los resultados económicos obtenidos, con tiempos de retorno de inversión entre 7.2 y 8.5 años, son prometedores y están en línea con estudios recientes sobre la viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos residenciales [17]. Sin embargo, es crucial reconocer que estos resultados son promedios y pueden variar significativamente dependiendo de factores locales como las tarifas eléctricas, los esquemas de incentivos y los costos de instalación.

La reducción estimada de emisiones de CO₂ subraya el potencial de los sistemas fotovoltaicos residenciales para contribuir significativamente a los objetivos de mitigación del cambio climático. No obstante, es importante considerar estos beneficios en el contexto del ciclo de vida completo de los sistemas PV, incluyendo la producción y el eventual desecho de los componentes, como señalan Fthenakis y Kim [18].

Desafíos y oportunidades futuras

A medida que aumenta la penetración de sistemas fotovoltaicos en la red eléctrica, surgen nuevos desafíos técnicos y regulatorios. La gestión de la intermitencia y la necesidad de

equilibrar la oferta y la demanda en tiempo real requieren el desarrollo de redes más inteligentes y flexibles [20]. Además, la transición hacia un modelo de "prosumidor", donde los consumidores también son productores de energía, necesita marcos regulatorios adaptados que fomenten la participación activa en el mercado energético [21].

Por otro lado, las tecnologías emergentes ofrecen oportunidades emocionantes para mejorar aún más la eficacia de los sistemas fotovoltaicos. Los avances en almacenamiento de energía, como las baterías de ion-litio más eficientes y asequibles, podrían resolver en gran medida el problema de la variabilidad estacional. Además, las tecnologías de gestión de demanda basadas en inteligencia artificial tienen el potencial de optimizar el autoconsumo, alineando mejor los patrones de consumo con la generación solar.

Limitaciones del estudio y direcciones futuras

Es importante reconocer las limitaciones de este estudio. La muestra de 50 viviendas, aunque significativa, puede no ser completamente representativa de todas las situaciones posibles. Futuros estudios podrían beneficiarse de muestras más grandes y diversas, abarcando diferentes regiones geográficas y tipos de viviendas.

Además, este estudio se centró principalmente en aspectos técnicos y económicos. Investigaciones futuras podrían explorar más a fondo los factores sociales y conductuales que influyen en la adopción y el uso eficaz de sistemas fotovoltaicos residenciales. Comprender mejor cómo los hábitos de consumo energético se adaptan a la presencia de generación solar podría proporcionar perspectivas valiosas para maximizar los beneficios de estos sistemas.

Conclusiones

Este estudio ha arrojado luz sobre la eficacia de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red para reducir la dependencia energética de los hogares. A través de un análisis exhaustivo de 50 viviendas equipadas con estos sistemas, hemos llegado a las siguientes conclusiones clave:

Los sistemas fotovoltaicos demostraron ser capaces de reducir sustancialmente la dependencia de la red eléctrica, con porcentajes de reducción que oscilan entre el 58% en

los meses de invierno y el 100% en los meses de verano. Esta variabilidad estacional subraya la importancia de considerar los ciclos anuales en la planificación y diseño de sistemas energéticos residenciales.

Se observó una correlación positiva entre la capacidad instalada del sistema fotovoltaico y la reducción de la dependencia de la red. Sin embargo, la dispersión en esta relación indica que otros factores, como los patrones de consumo y las condiciones climáticas locales, juegan un papel crucial en la eficacia del sistema.

Los resultados económicos son prometedores, con tiempos de retorno de inversión que varían entre 7.2 y 8.5 años, dependiendo de la capacidad del sistema. Esto sugiere que los sistemas fotovoltaicos residenciales no solo son beneficiosos desde el punto de vista energético, sino que también representan una inversión financiera atractiva a largo plazo.

La reducción estimada de emisiones de CO₂, que oscila entre 1,875 y 3,625 kg CO₂/año por sistema, demuestra el potencial significativo de los sistemas fotovoltaicos residenciales para contribuir a los esfuerzos de mitigación del cambio climático.

Referencias

- [1]. International Energy Agency, "World Energy Outlook 2023," IEA, Paris, 2023.
- [2]. N. M. Kumar et al., "Solar energy: Market potential and contribution to energy system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 149, p. 111421, 2021.
- [3]. T. Sousa et al., "Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, pp. 367-378, 2019.
- [4]. IRENA, "Renewable Power Generation Costs in 2020," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.
- [5]. M. Obi and R. Bass, "Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1082-1094, 2016.
- [6]. Y. Parag and B. K. Sovacool, "Electricity market design for the prosumer era," *Nature Energy*, vol. 1, no. 4, pp. 1-6, 2016.

- [7]. J. Hoppmann et al., "The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 1101-1118, 2014.
- [8]. R. Luthander et al., "Photovoltaic self-consumption in buildings: A review," *Applied Energy*, vol. 142, pp. 80-94, 2015.
- [9]. G. R. Pillai et al., "Prosumer-based energy ecosystem in smart cities: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, p. 111071, 2021.
- [10]. D. Parra et al., "An interdisciplinary review of energy storage for communities: Challenges and perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 730-749, 2017.
- [11]. J. Jurasz et al., "A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions," *Solar Energy*, vol. 195, pp. 703-724, 2020.
- [12]. R. McKenna et al., "On the development and performance of a fully renewable European energy system," *Renewable Energy*, vol. 185, pp. 1395-1409, 2022.
- [13]. S. Ø. Jensen et al., "IEA EBC annex 67 energy flexible buildings," *Energy and Buildings*, vol. 155, pp. 25-34, 2017.
- [14]. R. A. Lopes et al., "Cooperative energy management system for residential PV prosumers in a local electricity market," *Applied Energy*, vol. 283, p. 116277, 2021.
- [15]. J. Koskela et al., "Using a time series database for energy flexibility analysis in smart buildings," *Energy and Buildings*, vol. 202, p. 109352, 2019.
- [16]. A. Jäger-Waldau, "Snapshot of photovoltaics—February 2023," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2254, 2023.
- [17]. S. Rodrigues et al., "Economic feasibility analysis of small scale PV systems in different countries," *Solar Energy*, vol. 131, pp. 81-95, 2016.
- [18]. V. Fthenakis and H. C. Kim, "Land use and electricity generation: A life-cycle analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6-7, pp. 1465-1474, 2009.
- [19]. R. Frischknecht et al., "Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems," *International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-19:2020*, 2020.

- [20]. P. D. Lund et al., "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 785-807, 2015.
- [21]. Y. Zhou et al., "Socio-economic transition toward renewable energy production? Technological innovation, employment, and inequality," *Energy Economics*, vol. 104, p. 105691, 2021.

Los autores no tienen conflicto de interés que declarar. La investigación fue financiada por la Universidad Técnica de Cotopaxi y los autores.

Copyright (2024) © Juan Miguel Jácome Amores, William Paul Pazuña Naranjo, Johnatan Israel Corrales Bonilla

Este texto está protegido bajo una licencia
[Creative Commons de Atribución Internacional 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

