

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

**Viabilidad económica de la implementación de energía
fotovoltaica residencial en la isla San Cristóbal, Galápagos**

Daniel Puma Keegan Ricaurte

Gestión Ambiental

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

Licenciado en Gestión Ambiental

Puerto Baquerizo Moreno, 2 de Mayo de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Viabilidad económica de la implementación de energía
fotovoltaica residencial en la isla San Cristóbal, Galápagos**

Daniel Puma Keegan Ricaurte

Diseño y Ejecución del Trabajo de Fin de Carrera

Marjorie del Carmen Riofrío Lazo, PhD

Presentación del Informe Final del Trabajo de Fin de Carrera

Stella de la Torre, PhD

Susana Cárdenas Díaz, PhD

Pto. Baquerizo Moreno, 2 de Mayo 2021

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Daniel Puma Keegan Ricaurte

Código: 00200207

Cédula de identidad: 1719217679

Lugar y fecha: Puerto Baquerizo Moreno, 25 de marzo de 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

La energía solar fotovoltaica presenta una alternativa más ecológica en comparación con métodos de generación de electricidad que funcionan con la quema de combustibles fósiles. Avances tecnológicos y mayor demanda han llevado a que la energía solar sea superior en términos de disponibilidad, rentabilidad, accesibilidad, capacidad y eficiencia en comparación con otras fuentes de energía renovable. Las islas Galápagos, por su ubicación estratégica, alta irradiación solar, pequeña población e importancia como motor turístico de Ecuador, presentan la oportunidad perfecta para la implementación de energía solar. Existen iniciativas de energías renovables, propuestas por diferentes ONGs y entidades del gobierno, sin embargo, la planta eléctrica actual en la Isla San Cristóbal, capital de la provincia de Galápagos, funciona a base de generadores de diésel. El transporte y la quema de combustibles presenta un riesgo hacia la flora y fauna local. El costo real del kWh proveniente de generación térmica diésel es mayor al precio cobrado, por lo cual, la recaudación por el servicio eléctrico no cubre el costo de producción energética, resultando en un déficit que debe ser cubierto por el estado. Este proyecto busca identificar la viabilidad económica de la implementación de sistemas de energía fotovoltaica residenciales en la isla San Cristóbal, Galápagos, al analizar el costo de producción de energía de la central eléctrica de la Isla y el equipo fotovoltaico necesario para abastecer una vivienda promedio. Se encontró que los costos de energía producida por sistemas fotovoltaicos son menores a los costos de energía producida por el sistema térmico diésel de la central eléctrica de la Isla. Se calculó el tiempo necesario para cubrir los costos de inversión en sistemas fotovoltaicos residenciales y se observó que los subsidios al costo de generación y distribución del sistema térmico diésel, reducen los incentivos de adoptar energía solar para la población local.

Palabras clave: Energía solar, islas Galápagos, costo de energía, viabilidad, inversión.

ABSTRACT

Solar energy offers a greener alternative when compared to electricity generation methods that run on fossil fuels. Technological advances and increased demand have led to solar energy becoming superior in terms of availability, profitability, accessibility, capacity, and efficiency in comparison to other renewable energy sources. The Galapagos Islands, due to their strategic location, high solar irradiation, small population and importance as a tourist attraction of Ecuador, present the perfect opportunity for the implementation of solar energy. Although there are renewable energy initiatives, proposed by different NGOs and government entities, the current power plant on San Cristóbal Island, capital of the Galápagos province, runs on diesel generators. The transportation and burning of fossil fuels is a risk to the local flora and fauna. The real cost of a kWh from thermal diesel generation on the island is higher than the price charged, therefore, the payments for the electricity service do not cover the cost of energy production, resulting in a deficit that must be covered by the state. This project seeks to identify the economic viability of the implementation of residential photovoltaic energy systems on San Cristóbal Island, Galapagos, by analyzing the cost of energy production from the Island's power plant and the photovoltaic equipment necessary to supply the average home. It was found that the energy costs produced by photovoltaic systems are lower than the energy costs produced by the thermal diesel system of the island's power plant. The time necessary to cover the investment costs in residential photovoltaic systems was calculated and it was observed that subsidies to the cost of generation and distribution of electricity from the thermal diesel system reduce the incentives to adopt solar energy for the local population.

Keywords: Solar energy, Galapagos islands, energy cost, feasibility, investment.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVO GENERAL	13
METODOLOGÍA	14
RESULTADOS	21
DISCUSIÓN	23
CONCLUSIONES	25
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
ANEXO A	29
ANEXO B	29
ANEXO C	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de barra sobre costo de consumo energético.....	21
Figura 2. Gráfico de barra apilada sobre periodo para cubrir costos de inversión.	22

INTRODUCCIÓN

La quema de combustibles fósiles es actualmente el origen de casi el 89% de las emisiones totales de CO₂ a nivel mundial, de este porcentaje el sector que mayor cantidad de emisiones genera es la producción de energía eléctrica, con 35.8% (Olivier, 2020). Además de las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación asociada a la quema de combustibles, la extracción de estos combustibles causa la pérdida de hábitat y biodiversidad. Se estima que cerca del 70% de las pérdidas de biodiversidad están relacionadas a contaminación, de manera directa, como derrames de petróleo y deforestación, y de manera indirecta a través de cambio climático acelerado por gases de efecto invernadero (Bhatnagar, 2019).

La energía eléctrica fotovoltaica es relativamente nueva, con las primeras celdas solares viables, creadas en 1956 (Jäger, 2020) y presenta una alternativa más amigable con el medio ambiente, al evitar la mayoría de los efectos negativos de la energía eléctrica tradicional. Hasta hace pocos años, la diferencia de costo entre equipos de generación solar y generadores por combustión presentaba una barrera hacia el cambio a energías limpias (Liu, 2018). Los equipos fotovoltaicos eran más costosos y eran más difíciles de escalar para proyectos grandes. Avances tecnológicos y mayor demanda han llevado a que la energía solar sea superior en términos de disponibilidad, rentabilidad, accesibilidad, capacidad y eficiencia en comparación con otras fuentes de energía renovable (Kannan, 2016). El costo de energía fotovoltaica ha caído hasta el punto en que ahora es la fuente de electricidad más barata en gran parte del mundo (Apostoleris, 2019).

La energía fotovoltaica es una de las tecnologías de generación de electricidad con mayor crecimiento en el mundo, con 60% de la capacidad del año 2014 creada únicamente en los 3

años anteriores. Sin embargo, solo representa alrededor de 0.9% de la producción mundial de energía, y 60% de este crecimiento ha sido en mercados de países asiáticos (Adib, 2015).

La demanda creciente de energía eléctrica en Latinoamérica ofrece la oportunidad de adopción de sistemas de energía renovable, evitando los problemas creados por el reemplazo de infraestructura existente que se requiere en países industrializados. Existe la posibilidad de satisfacer la demanda energética estimada de Latinoamérica para 2030 usando únicamente fuentes de energía renovable y estrategias de manejo y almacenamiento, como el uso de represas hídricas para almacenar energía solar y eólica, usando el excedente energético durante el día para bombear agua de vuelta a la represa (Barbosa,2017). Actualmente América central y América del sur son las regiones con la producción energética de menor impacto de carbono en el mundo, esto es gracias a un alto porcentaje de energía renovable, en su mayoría, energía hídrica (Barbosa,2017).

En Ecuador, alrededor del 50% de la producción nacional de energía eléctrica se abastece a través de represas hidroeléctricas, y con la culminación de algunos proyectos que ya están en progreso, este porcentaje podría subir a 90% (Mite-León, 2018). El costo medio de generación a nivel nacional en Ecuador es de \$0.0334 (ELECGALAPAGOS, 2021). La energía hídrica es vulnerable a cambios climáticos y sequías. Con la implementación de energía solar, se podría obtener una producción energética más variada y de menor vulnerabilidad (Mite-León, 2018).

Las islas Galápagos, ubicadas a 1000 km al oeste de Ecuador, reconocidas como patrimonio natural de la humanidad por su increíble biodiversidad y endemismo, son un ejemplo de conservación ante el mundo. El plan de Galápagos 2015-2020 propone incentivar el cambio hacia energías alternativas, en un intento por reducir su dependencia energética del Ecuador continental, reducir impacto ambiental y crear prestigio como ejemplo de desarrollo sostenible.

Actualmente la mayoría de energía eléctrica producida en las islas (78%) es a base de generadores de diésel (Carvajal, 2012).

En 2001 el tanquero Jessica encalló cerca de la isla San Cristóbal, y derramó 180000 galones de diésel y aceite (Dove, 2014). Esta contaminación tuvo efectos terribles sobre los ecosistemas frágiles de las islas, y es un ejemplo importante de lo que un cambio a energías renovables podría evitar. Aparte del peligro de mover combustible, el subsidio a los combustibles en Ecuador, demanda al año más de 3 mil millones de dólares equivalentes al 17% del presupuesto general del estado (PGE) (Ventosa, 2018).

Galápagos, por su ubicación estratégica, pequeña población e importancia como motor turístico de Ecuador presenta la oportunidad perfecta para la implementación de energía solar. La iniciativa “Zero fuels”, por parte del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, busca eliminar el uso de combustibles fósiles, al eliminar diésel de la producción energética reemplazándola con energía solar, eólica y biocombustible, permitir únicamente a vehículos híbridos, y eventualmente convertir las embarcaciones locales al uso de biocombustibles (Carvajal, 2012).

Un reporte sobre la sostenibilidad en las Islas Galápagos (Dove, 2014) estimó que para 2020 se habría reemplazado gran parte de la producción energética local con fuentes renovables, y que la mayoría del sector transporte se daría con vehículos híbridos o eléctricos. En la actualidad se observa la presencia de algunos vehículos eléctricos, sin embargo, existe una escasez de proyectos de energía solar a gran escala. Uno de los pocos siendo el sistema híbrido en la isla Floreana que usa paneles solares para reducir la cantidad de combustible usado para abastecer los requerimientos eléctricos de la isla (Moreno,2013).

La planta eléctrica actual en la Isla San Cristóbal funciona a base de generadores de diésel. Este método de producción de energía eléctrica abastece a la mayoría de la población. Poco

después de la inauguración del parque eólico de San Cristóbal en 2007, se pudo reducir a 50% el uso de los generadores de diésel (Global Sustainable, 2008). Con el aumento de la demanda energética de la isla y el deterioro del equipo eólico, el porcentaje de demanda cubierto por generación eólica ha ido disminuyendo, a tal punto que, en 2021, la totalidad de la demanda energética en San Cristóbal es cubierta por el sistema térmico diésel. (ELECGALAPAGOS, 2021). En agosto de 2018 se firmó un documento de cooperación entre el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable y El Instituto Coreano De Desarrollo y Tecnología KIAT, para construir un sistema fotovoltaico de 1MW con 1.4MW de almacenamiento, en la isla San Cristóbal (MERNNR, 2021). Este sistema aún no está en operación (ELECGALAPAGOS, 2021).

La mayoría de los sistemas de generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles, funcionan con turbinas. En un generador de diésel, el gas caliente, producto de la combustión, se expande y pasa a través de las turbinas, estas turbinas hacen girar a un generador, que produce energía eléctrica. La eficiencia de transformación de energía térmica a energía eléctrica varía bastante entre plantas eléctricas y tecnología usada. Para turbinas simples, la eficiencia varía entre 20% y 35% (US DOE, 2012).

Los paneles solares funcionan al permitir que los fotones generados por el sol, desplacen a electrones por las celdas solares, generando corriente. Su eficiencia energética es menor a la de la mayoría de los generadores a base de combustible fósil, con valores de eficiencia entre 15 y 20% en convertir energía solar a energía útil. Esta eficiencia también varía dependiendo de las condiciones en las que funcionan los paneles, como el ángulo de luz y temperatura del panel (Aris, 2021; Hantula,2009). Los paneles solares son más manejables que otros sistemas de generación eléctrica renovable, y son ideales para sistemas pequeños, independientes y autofinanciados. Cuando la mayoría de energía en un sistema es producida por paneles solares,

se requiere de almacenamiento de energía eléctrica, para poder proveer electricidad durante la noche (Hou, 2011). Los costos de los equipos de almacenamiento representan una porción significativa del costo total de un sistema de energía fotovoltaica. El sistema híbrido reduce los costos del sistema, al usar un medidor bidireccional que permite al sistema fotovoltaico devolver el excedente energético a la red durante las horas de mayor actividad solar, y consumir energía de la red durante la noche. Tomando en cuenta la energía devuelta a la red durante el día, con suficiente producción solar, el consumo neto de un hogar equipado con un sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red podría ser nula (Maharaja, 2016).

Dado a la situación económica de Ecuador, la capacidad de inversión en proyectos sociales a gran escala por parte del gobierno ecuatoriano es reducida (Iturralde, 2020). Con el reducido apoyo del estado ecuatoriano, el cambio a energías renovables podría darse a través de acción local apoyada por instituciones locales y organizaciones externas al país. Con el fin de animar a la población local de la isla San Cristóbal a adoptar sistemas fotovoltaicos residenciales, este proyecto analizará los costos y ahorros que se derivan de invertir en energía solar.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad económica de la implementación de sistemas de energía fotovoltaica residenciales en la isla San Cristóbal, Galápagos, contrastando los costos de infraestructura, energía generada y tiempo de vida de los equipos fotovoltaicos con el costo de generación del kWh y el gasto mensual que realiza la vivienda promedio de la Isla en consumo energético. Compilar información referente al costo de adquisición de sistemas de paneles solares y tiempo funcionamiento necesario para cubrir costos de inversión en cuotas del mismo valor que pagos basados en el consumo de la planilla eléctrica promedio y el costo real del kWh.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Investigar el costo de 1 kWh generado por el sistema térmico diésel en la Isla San Cristóbal y el consumo anual promedio de energía de una vivienda en isla.
- Investigar el equipo fotovoltaico necesario para abastecer una vivienda promedio tanto para un sistema independiente, como un sistema híbrido.
- Comparar los costos reales y cobrados(subsidiados) con los costos potenciales de sistemas independientes y sistemas híbridos, del consumo energético residencial anual del usuario promedio.
- Determinar el tiempo de funcionamiento necesario de los sistemas de generación fotovoltaica para cubrir los costos de inversión.

METODOLOGÍA

Área de estudio:

La Isla San Cristóbal es la quinta más grande del archipiélago, con una superficie de 557 km² también es la más cercana a Ecuador continental. Puerto Baquerizo Moreno, ubicado en la isla San Cristóbal, es la capital de la provincia de Galápagos, tiene su propio aeropuerto, varias oficinas gubernamentales y una base naval. Su población es de aproximadamente 6000, haciéndola la segunda isla más poblada del archipiélago, superada únicamente por Santa Cruz. La mayoría de los habitantes viven de turismo, trabajo gubernamental y pesca (Galapagos Conservancy, 2021).

Debido a la logística a través de contenedores, el costo de importación de bienes es elevado. Han ocurrido varios accidentes marítimos, dos de ellos en 2014 y 2015 en la Bahía Naufragio,

Puerto Baquerizo Moreno. En las operaciones de logística, la prioridad es hacia la naturaleza, sin embargo, aun se transportan miles de galones de diésel y otros aceites que presentan un riesgo constante (Mazón, 2018).

Latitudes más cercanas a la línea ecuatorial presentan un mayor recurso solar (Ayala, 2005). La irradiación solar en el centro de Puerto Baquerizo Moreno, con coordenadas geográficas -00°54'13", -89°36'36" presenta una potencia fotovoltaica específica de 4.56 kWh/kWp por día, o 1664 kWh/kWp al año (ESMAP, 2020).

Para obtener los datos necesarios para los cálculos de los objetivos del proyecto, se emitió un oficio dirigido a ELECGALAPAGOS SA. El área de planificación de la institución respondió en 15 días entregando todos los datos necesarios para poder realizar el estudio:

Costos de generar un kWh en San Cristóbal 2021

Costos de distribución de energía 2021

Precio medio cobrado por servicio eléctrico 2021

Consumo energético residencial anual de usuario promedio 2018 (abreviado CERAUP)

Total de ventas

1. Costo de un kWh de la central eléctrica de la Isla San Cristóbal

Para estimar el costo total de 1 kWh producido en el sistema térmico diésel en San Cristóbal necesitamos tomar en cuenta los gastos realizados por Elecgalapagos para producir electricidad, estos gastos incluyen:

-Administración, (costo fijo)

-Operación y mantenimiento, mantenimiento mayor (costo fijo)

-Costo variable de generación térmica diésel (costo variable)

-Costo medio de distribución

$$\text{Costo } \$/kWh = \frac{\text{Costos fijo} + \text{Costo Variable}}{\text{Total kWh}} + \text{Costo medio de distribución } \$/kWh$$

$$\text{Costo } \$/kWh = 0.39$$

2. Para conocer el equipo de generación fotovoltaica necesario, me basé en la metodología explicada en el libro: *Solar electricity handbook: A simple, practical guide to solar energy-designing and installing photovoltaic solar electric systems* (Boxwell, 2011) y datos del mapa del recurso potencial eléctrico fotovoltaico de Ecuador (ESMAP, 2020)

Equipo necesario para abastecer una vivienda promedio independiente de la red.

Dividiendo el CERAUP de 2320 kWh para 365, se obtuvo el consumo energético residencial diario promedio, de 6.36 kWh. Los cálculos a continuación permitieron estimar los equipos para un sistema ligeramente sobre construido.

Insertando el consumo energético residencial diario promedio en la siguiente formula

$$\text{vatios Paneles} = \frac{\text{consumo energético residencial diario promedio kWh}}{\text{potencia fotovoltaica específica San Cristóbal kWh/kWp}}$$

$$\text{vatios Paneles} = \frac{6.36}{4.56} \text{ kWp}$$

Se obtuvo el valor en vatios que debe poder producir el equipo fotovoltaico

$$\text{vatios Paneles} = 1395 \text{ W}$$

El equipo independiente a la red usa un inversor. Por lo general, los inversores tienen una eficiencia de 90% y con un sistema regulador de carga, los paneles pueden transferir el 90% de su producción a las baterías (Boxwell, 2011), por lo que podemos compensar por pérdidas en el sistema dividiendo *vatios paneles* por 0.8

$$\text{vatios Paneles final} = 1395 \text{ W} / 0.8$$

$$\text{vatios Paneles final} = 1743$$

Usando paneles JA Solar JAM60S02-305/PR de 305 W, calculamos el número de paneles necesarios

$$n \text{ paneles} = \frac{\text{vatios paneles final}}{\text{vatios panel individual}}$$

$$n \text{ paneles} = \frac{1743 \text{ W}}{305 \text{ W}}$$

$$n \text{ paneles} = 5.73 \approx 6$$

Inversor, regulador de voltaje y monitoreo

Para cargar las baterías y transformar la energía de corriente continua a corriente alterna de manera eficiente, se eligió Victron EasySolar 12/1600/70-16 MPPT 100/50 que combina las funciones de inversor, cargador de baterías y sistema de monitoreo.

Baterías

Para almacenar la carga entera de 1 día se requiere una capacidad de 6.36 kWh, Esto ofrece amplio margen para cubrir 5-10% de pérdidas en baterías y evitar descarga completa durante horas de menor o nula actividad solar.

Victron 6V/240Ah AGM Deep Cycle Battery

$$n \text{ baterías} = \frac{\text{Energía almacenada total}}{\text{almacenamiento de 1 batería}}$$

$$n \text{ baterías} = \frac{6.36 \text{ kWh}}{1.44 \text{ kWh}}$$

$$n \text{ baterías} = 4.42 \approx 5$$

3. Comparar los costos reales y cobrados(subsidiados) con los costos potenciales de sistemas independientes y sistemas híbridos, del consumo energético residencial anual del usuario promedio.

3.1 Costo real del consumo residencial anual del usuario promedio.

$$\text{Costo real} = \text{CERAUP} \times \text{Costo real } \$/\text{kWh}$$

$$\text{Costo real} = 2320 \text{ kWh} \times 0.39 \text{ } \$/\text{kWh}$$

$$\text{Costo real} = \$905$$

3.2 Costo cobrado del consumo residencial anual del usuario promedio.

$$\text{Costo cobrado} = \text{CCERAUP} \times \text{precio medio cobrado } \$/\text{kWh}$$

$$\text{Costo cobrado} = 2320 \text{ kWh} \times 0.144 \text{ } \$/\text{kWh}$$

$$\text{Costo cobrado} = \$334$$

3.3 Costo potencial de energía eléctrica generada por un sistema fotovoltaico independiente

Tiempo de vida de equipos: 20 años

$$\$/kWh \text{ sistema independiente} = \frac{\text{Costo total de equipo}}{\text{CERAUP} \times n \text{ años}}$$

$$\$/kWh \text{ sistema independiente} = \frac{\$4936}{2320 \text{ kWh} \times 20}$$

$$\$/kWh \text{ sistema independiente} = 0.1064 \$/kWh$$

$$\text{Costo potencial sistema independiente} = \text{CERAUP} \times \$/kWh \text{ sistema independiente}$$

$$\text{Costo potencial sistema independiente} = 2320 \text{ kWh} \times 0.1064 \$/kWh$$

$$\text{Costo potencial sistema independiente} = \$257$$

3.4 Costo potencial de energía eléctrica generada por un sistema fotovoltaico híbrido.

Tiempo de vida de equipos: 20 años

$$\$/kWh \text{ sistema híbrido} = \frac{\text{Costo total de equipo}}{\text{Energía generada al año} \times n \text{ años}}$$

$$\$/kWh \text{ sistema híbrido} = \frac{\$2920}{2320 \text{ kWh} \times 20}$$

$$\$/kWh \text{ sistema híbrido} = 0.0629 \$/kWh$$

$$\text{Costo potencial, Sistema híbrido} = \text{CERAUP} \times \$/kWh \text{ sistema híbrido}$$

$$\text{Costo potencial, Sistema híbrido} = 2320 \text{ kWh} \times 0.0629 \$/kWh$$

$$\text{Costo potencial, Sistema híbrido} = \$146$$

4. Tiempo de funcionamiento necesario de los sistemas de generación fotovoltaica para cubrir los costos de inversión. Calculado con costo real y costo cobrado.

Sistema independiente/ Costo real

$$n \text{ años} = \frac{\text{Costo total de sistema fotovoltaico independiente}}{\text{costo real anual}}$$

$$n \text{ años} = \frac{\$4936}{\$905}$$

$$n \text{ años} = 5.454$$

Sistema independiente/ Costo cobrado

$$n \text{ años} = \frac{\text{Costo total de sistema fotovoltaico independiente}}{\text{Costo cobrado anual}}$$

$$n \text{ años} = \frac{\$4936}{\$334}$$

$$n \text{ años} = 14.778$$

Sistema hibrido/ Costo real

$$n \text{ años} = \frac{\text{Costo total de sistema fotovoltaico hibrido}}{\text{Costo real anual}}$$

$$n \text{ años} = \frac{\$2920}{\$905}$$

$$n \text{ años} = 3.227$$

Sistema híbrido/ Costo cobrado

$$n \text{ años} = \frac{\text{Costo total de sistema fotovoltaico híbrido}}{\text{Costo cobrado anual}}$$

$$n \text{ años} = \frac{\$2920}{\$334}$$

$$n \text{ años} = 8.743$$

RESULTADOS

Para satisfacer el consumo diario de energía eléctrica, un hogar promedio (6.36kWh) necesita un equipo de 6 paneles solares, 5 baterías y un inversor/cargador, con un costo (incluyendo transporte) de \$4936 (Anexo A)

El equipo híbrido no requiere de baterías, por lo que su costo incluyendo transporte es \$2920 (Anexo B)

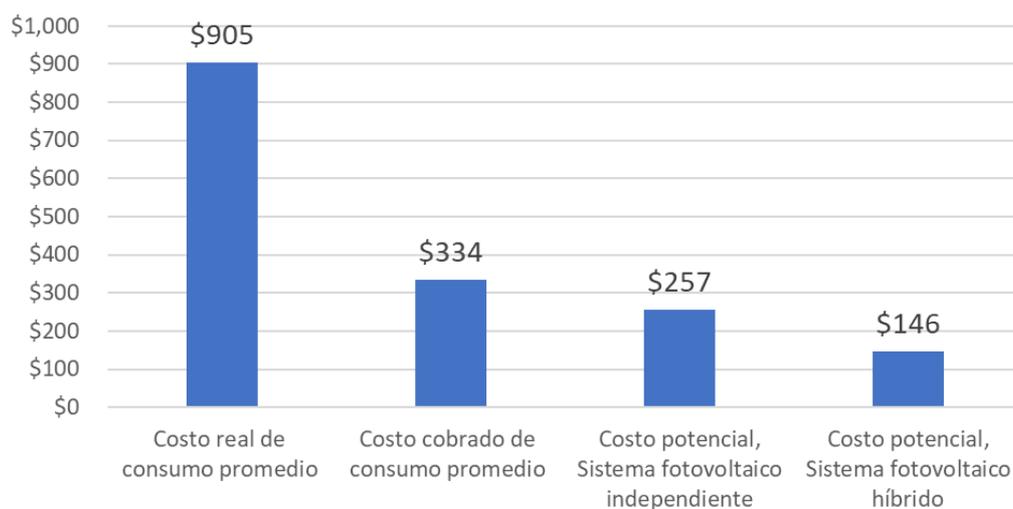


Figura 1. Gráfico de barra sobre costo de consumo energético.

Fuente: Elaborado por el autor, 2021

En la figura 1, se observan los costos del consumo energético residencial anual del usuario promedio, e inmediatamente se destaca la gran diferencia entre el costo real, y el resto de los valores. Las diferencias entre el costo cobrado y los costos potenciales de sistemas fotovoltaicos son menores.

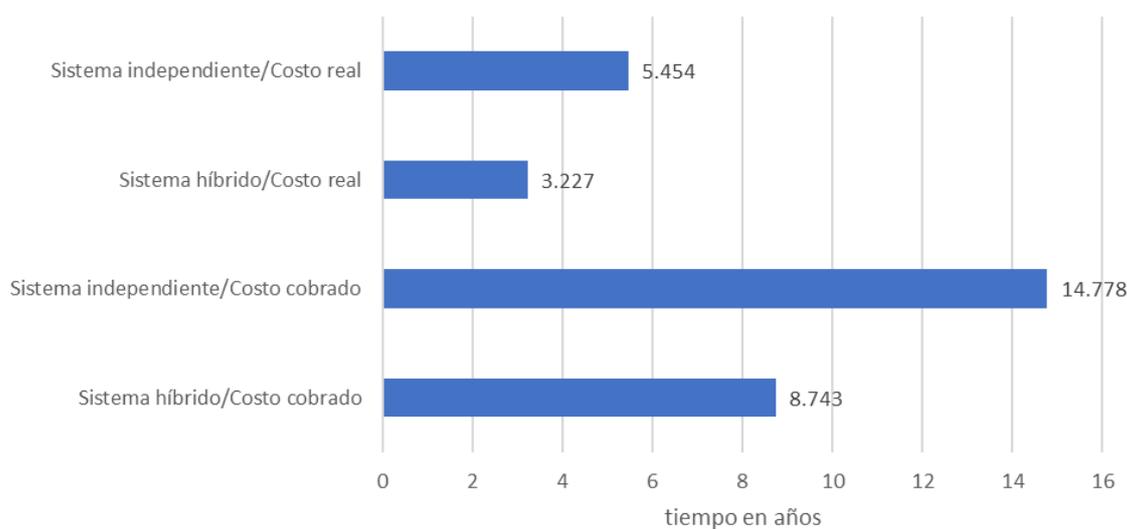


Figura 2. Gráfico de barra apilada sobre periodo para cubrir costos de inversión.

Fuente: Elaborado por el autor, 2021

En la figura 2 observamos el tiempo necesario para cubrir los costos de inversión en sistemas fotovoltaicos residenciales. El tiempo ha sido calculado tanto para el costo real, y el costo cobrado del servicio eléctrico. Cuando el tiempo se calcula con el costo real, los periodos para los sistemas independientes e híbridos son 5.45 y 3.23 años, respectivamente. Este periodo es más que el doble cuando es calculado con el precio cobrado (subsidiado) 14.78 y 8.74 años respectivamente.

DISCUSIÓN

Los resultados indican que la implementación de energía fotovoltaica residencial en la Isla San Cristóbal es económicamente viable. Los costos de energía producida por sistemas fotovoltaicos independientes e híbridos son menores a los costos de energía producida por el sistema térmico diésel de la central eléctrica de la Isla.

Por su ubicación geográfica cercana a la línea ecuatorial, la isla San Cristóbal es ideal para aprovechar energía solar. Esto se observa en los costos de equipos necesarios para abastecer el consumo energético residencial anual del usuario promedio, (Tablas 1 y 2) que son reducidos al ubicarse en una región de potencia fotovoltaica específica alta. Esta ubicación también eleva los costos de transporte de equipos, sin embargo, no eleva los costos de manera suficiente como para reducir su competitividad con el sistema de generación térmico diésel.

El costo real de 1 kWh proveniente de generación térmica diésel es de \$0.39, y el precio medio cobrado por el mismo kWh es de \$0.1438. Esto significa que la recaudación por el servicio eléctrico solo cubre el 37% del costo real de producción energética, y el 63% restante del costo, queda como déficit y debe ser cubierto por el estado. El costo potencial de 1 kWh generado por un sistema fotovoltaico independiente es de \$0.1064, esto lo hace menor al precio subsidiado que paga el usuario promedio. El costo potencial de 1kWh proveniente de un sistema híbrido, es incluso menor, en 0.0629 \$/kWh. Ninguno de estos valores, es menor al costo de generación promedio nacional, de 0.0334 \$/kWh (Elecgalapagos, 2021), por lo que no podrían competir en Ecuador continental.

Aunque el costo potencial de 1 kWh del sistema híbrido es el menor de las opciones presentadas para San Cristóbal, se debe tomar en cuenta que este sistema debe estar conectado a la red

eléctrica central para proveer energía eléctrica durante la noche, por lo que debe trabajar en conjunto con el sistema térmico diésel, reduciendo el uso de diésel, mas no remplazándolo.

Los sistemas fotovoltaicos son más económicos a largo plazo, ya que después de cubrirse el costo de los equipos, el costo de energía se hace nula por el resto de tiempo de vida de los equipos, sin embargo, se hace más difícil justificar el tamaño de la inversión necesaria cuando el periodo de rendimiento de la inversión requiere entre 8 y 14 años. Los subsidios al costo real de producción energética dificultan la adopción de energía solar, ya que reducen el incentivo económico aparente de adoptar energía solar.

Reconociendo las limitaciones de este informe: los datos obtenidos son aproximados, y algunos de los cálculos no están hechos con los datos ideales. Los costos del consumo energético residencial anual del usuario promedio han sido calculados usando datos de costo de 2021, y datos de consumo energético de 2018. En los cálculos de equipos necesarios, los valores son extraídos de un sitio de ventas de equipos solares, expuesto a fluctuaciones de precios. En el costo total del equipo fotovoltaico, no está incluido el costo de la instalación, se asume que la empresa eléctrica colaboraría con la instalación, o que los mismos usuarios la realizarían.

Para analizar a mayor profundidad la viabilidad de opciones solares en San Cristóbal se requiere de más estudios. La predisposición y capacidad local de realizar la considerable inversión inicial sería un factor clave para el cambio a energía solar. Si existiera la posibilidad de redirigir los recursos que actualmente son usados en subsidios, a programas de financiamiento de sistemas de paneles, aumentaría el atractivo de opciones fotovoltaicos y el gobierno podría ahorrar millones de dólares en producción energética a largo plazo.

CONCLUSIONES

Ya finalizado el análisis, podemos concluir que los objetivos establecidos se cumplieron, mostrando que es económicamente viable la adopción de sistemas de energía fotovoltaica residenciales en la Isla San Cristóbal. Los altos costos de la producción y distribución de energía eléctrica generada a través del sistema térmico diésel, y la elevada potencia fotovoltaica específica en Puerto Baquerizo Moreno, llevan a que tanto los sistemas fotovoltaicos independientes como los sistemas híbridos tengan un costo de producción energética menor a la de la central eléctrica de la isla, que funciona a base de generación térmica diésel.

Por el riesgo que presenta la importación de combustibles, no existe duda en cuanto al argumento ecológico de adoptar energía solar, sin embargo, sin el argumento económico, se hace difícil la transición a energías alternativas. Los subsidios al costo de generación y distribución del sistema térmico diésel, reducen los incentivos de adoptar energía solar, sin embargo, si se encuentra una manera de redirigir este gasto a la adquisición de equipos fotovoltaicos, se podría acelerar la adopción de energía solar en la isla San Cristóbal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abusoglu, A., & Kanoglu, M. (2008). First and second law analysis of diesel engine powered cogeneration systems. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2026-2031.
- Adib, R., Murdock, H. E., Appavou, F., Brown, A., Epp, B., Leidreiter, A., ... & Farrell, T. C. (2015). *Renewables 2015 global status report*. REN21 Secretariat, Paris, France, 162.
- Apostoleris, H., Stefancich, M., & Chiesa, M. (2019). How did solar energy get so cheap, and how much cheaper can it get?. *APS*, 2019, K47-010.
- Aris, V. (2021 febrero 16) How Efficient Are Solar Panels? *Greenmatch.co.uk*
<https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/11/how-efficient-are-solar-panels#:~:text=While%20solar%20panel%20efficiency%20is,is%20measured%20under%20laboratory%20conditions>.
- Ayala, G. (2005). Solar Energy Potential At Different Latitudes, *Altenergymag*, extraído el 18 de marzo de 2021 de: <https://www.altenergymag.com/article/2005/08/solar-energy-potential-at-different-latitudes/120/>
- Barbosa, L. D. S. N. S., Bogdanov, D., Vainikka, P., & Breyer, C. (2017). Hydro, wind and solar power as a base for a 100% renewable energy supply for South and Central America. *PloS one*, 12(3), e0173820.
- Bhatnagar, S., Jain, A., & Kumari, R. (2019) Effect of Pollution on Environment, Ecosystem, and Biodiversity.
- Boxwell, M. (2010). *Solar electricity handbook: A simple, practical guide to solar energy-designing and installing photovoltaic solar electric systems*. Greenstream publishing.
- Carvajal, P. (2012). Galapagos Islands Zero Fossil Fuel Initiative. Ministry of Electricity and Renewable Energy-Ecuador. Retrieved from http://www.irena.org/DocumentDownloads/events/MaltaSeptember2012/Pablo_Carvajal.pdf.
- Dove, S. (2014). Sustainable Energy in the Galapagos. *Bridges: A Journal of Student Research*, 8(8), 1.
- ELECGALAPAGOS SA. (2021). Costos SPEE (información institucional, no publicada).
- Eras-Almeida, A. A., Egido-Aguilera, M. A., Blechinger, P., Berendes, S., Caamaño, E., & García-Alcalde, E. (2020). Decarbonizing the Galapagos Islands: Techno-Economic Perspectives for the Hybrid Renewable Mini-Grid Baltra–Santa Cruz. *Sustainability*, 12(6), 2282.

- ESMAP. 2020. Global Photovoltaic Power Potential by Country. Washington, DC: World Bank.
- Galapagos Conservancy. (2021). San Cristóbal. extraído el 18 de marzo 2021 de: https://www.galapagos.org/about_galapagos/about-galapagos/the-islands/san-cristobal/
- Global Sustainable Energy Partnership. (2008). The San Cristobal wind and solar projects. Energy in Action. Retrieved from <http://www.globalelectricity.org/en/index.jsp?p=121&f=124>.
- Hantula, R. (2009). How Do Solar Panels Work?. Infobase Publishing.
- Hou, Y., Vidu, R., & Stroeve, P. (2011). Solar energy storage methods. *Industrial & engineering chemistry research*, 50(15), 8954-8964.
- Iturralde, P. (2020). The IMF's Role in the Devastating Impacts of Covid-19—The Case of Ecuador. *Bretton Woods Observer*.
- Jäger-Waldau, A. (2020, April). Material research for photovoltaics: from lab to market. In *Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications X* (Vol. 11387, p. 1138708). International Society for Optics and Photonics.
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world:-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105.
- Leones, W. (2010). Estudio Tecnológico, Viabilidad Energética y Económico para la Generación Eléctrica Sostenible a través de la Energía Solar, con Aporte al medio ambiente. *Revista Técnica" energía"*, 6(1), 95-105.
- Liu, Z. (2018). What is the future of solar energy? Economic and policy barriers. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 13(3), 169-172.
- Macancela Cabrera, J. P. (2018). Dimensionamiento óptimo para pequeños sistemas híbridos aislados aplicado en las islas Galapagos (Bachelor's thesis).
- Maharaja, K., Balaji, P. P., Sangeetha, S., & Elakkiya, M. (2016, April). Development of bidirectional net meter in grid connected solar PV system for domestic consumers. In *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)* (pp. 46-49). IEEE.
- Mazón, R. (2018). La logística contenerizada y su influencia en el desarrollo portuario en la provincia de Galápagos Containerized logistics and its influence on port development in the Galapagos province. *Revista Carácter*, 6(1).

- MERNNR, Ministerio De Energía y Recursos No Renovables. (2021). Galápagos contará con nueva planta fotovoltaica. extraído el 18 de marzo 2021 de:
<https://www.recursoyenergia.gob.ec/209-2/>
- Mite-León, M., & Barzola-Monteses, J. (2018). Statistical model for the forecast of hydropower production in Ecuador. *Int. J. Renew. Energy Res*, 10(2), 1130-1137.
- Moreno, A., & Carvajal, P. (2013). Simulación y Análisis del Sistema Híbrido Isla Floreana en Galápagos. *Revista Técnica" energía"*, 9(1), 136-142.
- Olivier, J. G. J., & Peters, J. A. H. W. (2020). TRENDS IN GLOBAL CO2 AND TOTAL GREENHOUSE GAS EMISSIONS.
- RASUNI (2021). All products, extraído el 17 de marzo de 2021 de:
<https://www.rasuni.com/collections/all>
- Sanabria Orozco, A. F. (2016). Análisis costo/beneficio de la implementación de tecnologías de energía con paneles solares en la ese hospital San Cristóbal.
- US DOE (2012). Office of Fossil Energy. How Gas Turbine Power Plants Work.
<https://www.energy.gov/fe/how-gas-turbine-power-plants-work>
- Ventosa, I. P., Sojos, A. M., del Pozo, Z. V., Vela, G. C., & Rivera, P. Á. (2018). Subsidios a los combustibles fósiles en Ecuador: diagnosis y opciones para su progresiva reducción. *REVIBEC-REVISTA IBEROAMERICANA DE ECONOMÍA ECOLÓGICA*, 87-106.
- Wikelski, M., Romero, L. M., & Snell, H. L. (2001). Marine iguanas oiled in the Galapagos. *Science*, 292(5516), 437-437.

ANEXO A

Tabla 1: Equipo fotovoltaico necesario para abastecer una vivienda promedio independiente de la red eléctrica.

Ítem	cantidad	costo unitario	Costo total
JA Solar JAM60S02-305/PR	6	\$152	\$914
Victron 6V/240Ah AGM Deep Cycle Battery	5	\$332	\$1660
Victron EasySolar 12/1600/70-16 MPPT 100/50	1	\$1412	\$1412
Costo estimado de envío a EC200150 (Cristóbal)	1	\$950	\$950
Total			\$4936

ANEXO B

Tabla 2: Equipo fotovoltaico híbrido.

Ítem	cantidad	costo unitario	Costo total
JA Solar JAM60S02-305/PR	6	\$152	\$914
Victron EasySolar 12/1600/70-16 MPPT 100/50	1	\$1412	\$1412
Costo estimado de envío a EC200150 (Cristóbal)	1	\$594	\$594
Total			\$2920

ANEXO C

Mapa de irradiación solar Ecuador

