



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Título del trabajo:

Optimización del suministro eléctrico de sistemas
aislados de la red en diversas localizaciones de
Ecuador

English title:

Optimisation of the electrical supply of off-grid
systems in several locations in Ecuador

Autor/es

Alex Jara Salguero

Director/es

Rodolfo Dufo López

Escuela de Ingeniería y Arquitectura / Universidad de Zaragoza 2019

Resumen

El principal objetivo de este proyecto es el estudio de tecnologías renovables para sistemas aislados para cubrir una demanda. El proyecto pretende contribuir con el avance investigativo del acceso a la energía, concretamente en las zonas más aisladas de Ecuador donde las soluciones sin conexión a la red es la mejor alternativa, aprovechando los recursos naturales y las tecnologías renovables.

Se realizará la optimización de energía eléctrica en sistemas aislados mediante diferentes combinaciones de casos que, con su debida comprobación y análisis técnico y económico, se pueda proponer como alternativa para cubrir el consumo eléctrico. A partir de los datos de irradiación, viento y consumo eléctrico, se intenta obtener la solución óptima para el consumo requerido, evaluando distintas configuraciones de tecnologías en diferentes localidades geográficas. Al tratarse de un sistema aislado el estudio se realizará para un consumo tipo vivienda. Se realizará una investigación de información acerca de los consumos energéticos que podría demandar una vivienda básica, proyectos similares realizados en la zona y también las localidades que más carecen de electricidad. El estudio se realiza utilizando el software iHOGA que es un programa de simulación y optimización de sistemas eléctricos híbridos basados en energías renovables, aislados de la red o conectados a la red eléctrica. La optimización se efectúa teniendo en cuenta la minimización de los costes totales del sistema a lo largo de su vida útil, actualizados al momento inicial de la inversión (VAN). Además de los paneles fotovoltaicos, baterías y aerogeneradores, se tendrá en cuenta un sistema un generador AC (diésel o gasolina) con el objetivo de aumentar la fiabilidad, ya que en el caso en el que la radiación solar sea insuficiente y la carga de las baterías se haya agotado el generador actuará como fuente de apoyo.

iHOGA permite realizar un análisis de sensibilidad el cual se aplicará al sistema óptimo resultante para la vivienda, dicho análisis será sobre variables que pueden influir en un cambio del resultado final, como la variación del precio de los componentes y el consumo.

Tabla de contenidos

1	Introducción-----	1
1.1	Sistematización del problema -----	3
1.2	Objetivos específicos -----	3
2	Marco Teórico -----	4
2.1	Revisión Bibliográfica-----	4
2.1.1	Potencial para desarrollar las energías renovables en Ecuador fuera de la red -----	4
3	Modelos de optimización existentes-----	6
3.1	Ejemplo 1-----	6
3.2	Ejemplo 2-----	7
3.3	Ejemplo 3-----	9
3.4	Ejemplo 4-----	9
4	Cobertura de servicio eléctrico en Ecuador -----	11
5	Tipos de Consumo -----	13
5.1	Consumo Tipo Vivienda-----	13
5.2	Consumo Tipo Granja -----	13
5.3	Consumo Tipo Casa turística de bajo consumo-----	13
6	Ilustración del Proyecto -----	14
6.1	Datos de partida -----	14
6.2	Descripción de regiones rurales seleccionadas -----	14
6.3	Estimación de la carga-----	15
7	Disponibilidad de recursos energéticos renovables en Ecuador-----	16
7.1	Irradiación-----	16
7.2	Viento -----	16
7.3	Agua-----	16
8	Simulación de los sistemas óptimos-----	17
8.1	Localidad de referencia -----	17
8.1.1	Características de la solución óptima -----	21
8.1.2	Estudio Económico-----	24
8.2	Optimización de todas las localidades -----	24
8.2.1	Resultados y Características de la simulación. -----	25
9	Análisis de Sensibilidad-----	28
9.1	Análisis de sensibilidad Consumo -----	28

9.2	Análisis de sensibilidad Precios Componentes	29
10	Conclusiones	31
11	Referencias	32
12	Anexos	34

Tabla de Ilustraciones

Gráfico 1. Sistema eléctrico ecuatoriano 2014 [5].....	4
Gráfico 2. Generación histórica de energía (GWh) de tecnologías solares y eólicas [8].....	5
Gráfico 3. Sistema híbrido en estudio [10].	7
Gráfico 4. Sistema híbrido en estudio [11].	8
Gráfico 5. Esquema SFVAR [12].....	9
Gráfico 6. Cobertura de servicio eléctrico (Fuente propia)	11
Gráfico 7. Perfil de consumo a lo largo del día. Fuente: iHOGA.....	15
Gráfico 8. Google Maps Gráfico 9. Google Maps	18
Gráfico 10. Fuente iHOGA	18
Gráfico 11. Parámetros económicos. Fuente: iHOGA.....	20
Gráfico 12. Restricciones. Fuente: iHOGA	20
Gráfico 13. Optimización mono.objetivo, caso fotovoltaico-baterías. Fuente: iHOGA.....	21
Gráfico 14. Coste Total. Fuente iHOGA Gráfico 15. Coste de la Energía. Fuente iHOGA	22
Gráfico 16. Simulación de 1 año: Fuente iHOGA	23
Gráfico 17. Coste del Proyecto según los componentes. Fuente: iHOGA	24
Gráfico 18. Coste Total. Fuente: iHOGA.....	25
Gráfico 19. Coste de la Energía. Fuente: iHOGA.....	26
Gráfico 20. Emisiones. Fuente: iHOGA	26
Gráfico 21. VAN del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad consumo. Fuente: iHOGA	29
Gráfico 22. VAN del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad precios. Fuente: iHOGA	29
Gráfico 23. Coste de la energía del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad coste de la energía precios. Fuente: iHOGA	30

Tabla de Ilustraciones

Tabla 1. Cobertura del servicio eléctrico por región y provincia [2].....	12
Tabla 2. Precios y vidas útiles (en baterías vida flotante) de los componentes considerados. Fuente [19]	19
Tabla 3. Especificaciones de la solución óptima, caso fotovoltaico-baterías. Fuente: elaboración propia	21
Tabla 4. Características de la solución óptima de cada configuración. Fuente: iHOGA.....	22
Tabla 5. Localidades para estudio. Fuente: Google Maps	24
Tabla 6. VAN del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad consumo. Fuente: iHOGA.....	28

Tabla de Ilustraciones

Anexo 1. Irradiación y coordenadas Simón Bolívar. Fuente: iHOGA.....	34
Anexo 2. Informe combinación óptima Simón Bolívar parte 1. Fuente iHOGA	35
Anexo 3. Informe combinación óptima Simón Bolívar parte 2. Fuente iHOGA	35

Anexo 4. Inflación diésel. Fuente [22].....	35
Anexo 5. Coste Total (VAN). Fuente: iHOGA	36
Anexo 6. Coste de la energía. Fuente: iHOGA	36
Anexo 7. Emisiones. Fuente: iHOGA.....	36
Anexo 8. VAN del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad precios. Fuente: iHOGA.....	36
Anexo 9. Coste de la energía del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad precios. Fuente: iHOGA	37
Anexo 10. Nubosidad en Santa Elena. Fuente: Weather Spark	37
Anexo 11. Nubosidad en Morona Santiago. Fuente: Weather Spark	38
Anexo 12. Nubosidad en Napo. Fuente: Weather Spark.....	38
Anexo 13. Nubosidad en Pastaza. Fuente: Weather Spark	39
Anexo 14. Nubosidad en Esmeraldas. Fuente: Weather Spark	39
Anexo 15. Nubosidad en Bolívar. Fuente: Weather Spark.....	40
Anexo 16. Días de autonomía. Fuente: iHOGA	40
Anexo 17. Ficha técnica panel FV Gi-Power, parte 1	41
Anexo 18. Ficha técnica panel FV Gi-Power, parte 2.....	41
Anexo 19. Ficha técnica panel FV Jinko, parte 1	42
Anexo 20. Ficha técnica panel FV Jinko, parte 2	43
Anexo 21. Ficha técnica panel FV Jinko, parte 3	44
Anexo 22. Ficha técnica panel FV Ecsolar, parte 1	45
Anexo 23. Ficha técnica panel FV Ecsolar, parte 2	46
Anexo 24. Ficha técnica Inversor	47
Anexo 25. Ficha técnica batería.....	48
Anexo 26. Ficha técnica batería.....	49
Anexo 27. Ficha técnica aerogenerador ZH 1,5kW, parte 1	50
Anexo 28. Ficha técnica aerogenerador ZH 1,5kW, parte 2	51
Anexo 29. Combinación óptima FV_BAT_GENac Timbiré. Fuente: iHOGA.....	52

1 Introducción

Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos a más tardar en 2030 sigue siendo posible, pero para conseguirlo se requerirán esfuerzos sostenibles. A pesar de los considerables progresos logrados en los últimos años, el mundo no está avanzando lo suficiente para alcanzar las metas mundiales en materia de energía para 2030 establecidas en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), siendo el principal objetivo llegar a poblaciones más pobres del mundo [1].

Según un nuevo informe preparado por la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), la División de Estadística de las Naciones Unidas, el Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud (OMS). En años recientes se han realizado notables avances en el acceso a la energía: el número de personas sin acceso a la electricidad se redujo a aproximadamente 840 millones, de 1000 millones en 2016 y 1200 millones en 2010. No obstante, si no se adoptan soluciones más eficientes y estas no se intensifican, en 2030 aún habrá 650 millones de personas sin acceso a la electricidad [1].

En cuanto al acceso a la electricidad según el informe, tras una década de progresos constantes, la tasa mundial de electrificación llegó al 89 %, y cada año, 153 millones de personas obtuvieron acceso a la electricidad [1]. En el caso de Ecuador se registra un promedio de 97,33% de cobertura del servicio eléctrico, pero teniendo grandes poblaciones rurales con un promedio por debajo del 90% de cobertura eléctrica [2]. Sin embargo, el mayor desafío sigue siendo las zonas más aisladas de todo el mundo. Para brindar conexión eléctrica a los hogares más pobres y más aislados, serán fundamentales las soluciones sin conexión a la red, como el alumbrado a partir de la energía solar, los sistemas solares domésticos y, en medida creciente, las mini redes. En 2017, en todo el mundo, al menos 34 millones de personas obtuvieron acceso a servicios básicos de electricidad a través de tecnologías sin conexión a la red [1].

Las enormes distancias de la mayoría de emplazamientos rurales a la red eléctrica, así como los altos precios de distribución del combustible a las mismas, hacen que la electrificación rural sea más dificultosa de lo normal. De esta manera, y si son explotadas adecuadamente, las energías renovables poseen un gran potencial para suministrar la energía de las comunidades aisladas, con fuentes autóctonas y tecnologías cada vez más económicas. Una metodología ampliamente utilizada y recomendada es la utilización de sistemas híbridos de energía, combinando tecnologías renovables entre sí o bien con alguna tecnología convencional que le otorgue al sistema mayor fiabilidad.

Un enfoque tecnológico y/o económico exclusivamente de la electrificación rural sería, en el mejor de los casos, insuficiente, ya que es necesario incluir en el planteamiento y en el resto del proceso los diferentes factores sociales y medioambientales que resultan clave en el resultado satisfactorio de los proyectos.

Se debe tener en cuenta inicialmente la disponibilidad de los recursos de los cuales se aprovechan las diferentes tecnologías. Los recursos renovables, más dispersos generalmente y repartidos de una forma más homogénea, poseen una mayor facilidad de implantación en las zonas rurales, y una

oportunidad de aprovechamiento autóctono e in situ de los mismos. Los principales recursos de que se disponen son: energía solar, con un potencial bastante mayor que el que posee en Europa, sobre todo en el continente africano, aunque también en Latinoamérica y Asia, debido a la incidencia más perpendicular de los rayos solares; energía eólica, cuyos datos de disponibilidad y cantidad de recurso no son muy extensos ni fiables en las zonas rurales de los países en vías de desarrollo, ni en principio igual de importante el recurso como el solar, debido a las zonas geográficas y las características climáticas de la mayoría de emplazamientos rurales. No obstante, las particularidades de cada zona y caso pueden otorgarle cierta importancia a dicho recurso, y ser por tanto una opción más que válida.

Durante muchos años se ha promovido un conjunto de objetivos y procedimientos para prevenir el cambio climático y varios problemas energéticos a largo plazo. Los sistemas aislados de energía renovable ofrecen expectativas prometedoras para cubrir eléctricamente comunidades ubicadas en áreas remotas donde la red eléctrica no está disponible o la extensión de la red no es económica. El tamaño adecuado del sistema de conversión de energía renovable junto con la capacidad de almacenamiento es el elemento clave para lograr la viabilidad técnica y económica de dicho sistema aislado basado en renovables.

La investigación realizada tuvo como principal premisa el estudio de tecnologías renovables para sistemas aislados para cubrir una demanda. Dentro de la alternativa de los sistemas aislados se ha considerado la utilización de tecnologías híbridas renovables ya que éstas juegan un papel importante en la optimización de las diferentes configuraciones para la producción de energía y pueden aportar beneficios económicos y en la naturaleza.

Según el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable de Ecuador es un desafío llegar al 100% en la cobertura eléctrica en la región, por lo que se están fomentando proyectos de investigación que contribuyan a cubrir la demanda en poblaciones pobres o de difícil acceso a la red y que a la vez técnicamente y económicamente represente un servicio asequible para el sector desfavorecido eléctricamente del país.

De acuerdo a un reporte de la situación de los sistemas fotovoltaicos en América Latina, la Organización Latinoamericana de Energía (Olade) indicaba que Ecuador ha tenido importantes iniciativas de electrificación rural con sistemas fotovoltaicos aislados, como consecuencia de las inversiones realizadas por el Fondo de Electrificación Urbano Marginal (Ferum), entre otras iniciativas. Además, indica Olade, Ecuador ha sido pionero en el desarrollo de proyectos de microrredes de sistemas fotovoltaicos aislados. [3]

En función de los aspectos comentados con anterioridad se procede al estudio de la optimización de energía eléctrica en sistemas aislados mediante diferentes combinaciones de tecnologías renovables, que con su debida comprobación y análisis de sensibilidad técnico y económico, se pueda proponer como alternativa para cubrir el consumo eléctrico en sectores con menor porcentaje de cobertura eléctrica de Ecuador, además de contribuir con el medio ambiente partiendo de la utilización de las energías renovables.

Luego de lo antes mencionado se plantea la siguiente pregunta, como un posible problema a resolver, ¿cómo contribuyen los sistemas aislados en la optimización del suministro eléctrico? Para lo cual la respectiva pregunta se responderá con el procedimiento de este proyecto.

1.1 Sistematización del problema

¿Qué ventajas y propiedades tecnológicas caracterizan a los sistemas aislados?

¿Qué elementos teóricos sustentan la utilización de sistemas aislados para optimizar el suministro eléctrico?

¿Qué recurso experimental es adecuado para el estudio de los sistemas aislados?

¿Qué factibilidad genera el uso de sistemas aislados para optimizar el suministro eléctrico?

Con todo esto nace la necesidad del planteamiento de un objetivo principal a cumplir y este es estudiar la optimización de suministro en sistemas aislados a la red en diversas localidades de Ecuador.

Por consecuencia del objetivo principal es necesario plantear objetivos específicos para desarrollar el proyecto.

1.2 Objetivos específicos

- Optimizar el suministro eléctrico de sistemas aislados en Ecuador.
- Determinar los elementos teóricos que sustentan la utilización de las diferentes tecnologías renovables y sistemas aislados de la red incluyendo lo relativo a Ecuador
- Consultar empresas especializadas para obtener precios actualizados de los distintos componentes.
- Describir el recurso experimental adecuado para el estudio de los sistemas aislados.
- Evaluar distintos casos con diferentes localizaciones con el software iHOGA obteniendo conclusiones.
- Realizar análisis de sensibilidad de las variables más importantes

Como justificación a los objetivos propuestos se ha determinado que existe la oportunidad de proponer una herramienta tecnológica para mejorar las prestaciones en sistemas aislados de la red. El estudio se realiza utilizando el software iHOGA que es un programa de simulación y optimización de sistemas eléctricos híbridos basados en energías renovables, aislados de la red o conectados a la red eléctrica, que permite la optimización mediante la minimización de los costes totales del sistema (o maximización de beneficios) a lo largo de su vida útil, trasladados o actualizados al momento inicial de la inversión (Valor Actual Neto, VAN). Es decir, en general la optimización es económica (mono-objetivo) [4]

El uso de este software de forma experimental genera la tentativa de poder remplazar la obtención de la energía eléctrica de manera convencional por la obtenida mediante tecnologías renovables mediante sistemas aislados a la red, lo que ayuda a optimizar costos y tener una energía más limpia y asequible

2 Marco Teórico

2.1 Revisión Bibliográfica

2.1.1 Potencial para desarrollar las energías renovables en Ecuador fuera de la red

La oferta de energía eléctrica en Ecuador, determinada por su potencia nominal generada por fuentes renovables para el año 2016, la constituyen: hidroelectricidad 49,82 %; biomasa 1,96 %; fotovoltaica 0,36 %; eólica 0,29 %; biogás y el 57,54 % corresponde a fuentes que usan combustibles fósiles [5].

Desde 2016, Ecuador ha tratado de acoplarse a otros países (Costa Rica, Paraguay, Uruguay) con una red eléctrica casi sostenible gracias a la construcción de ocho centrales hidroeléctricas que suman una capacidad instalada de 2,76 GWp y alguna capacidad menor de Energías Renovables no Convencionales (ERNC) [6].

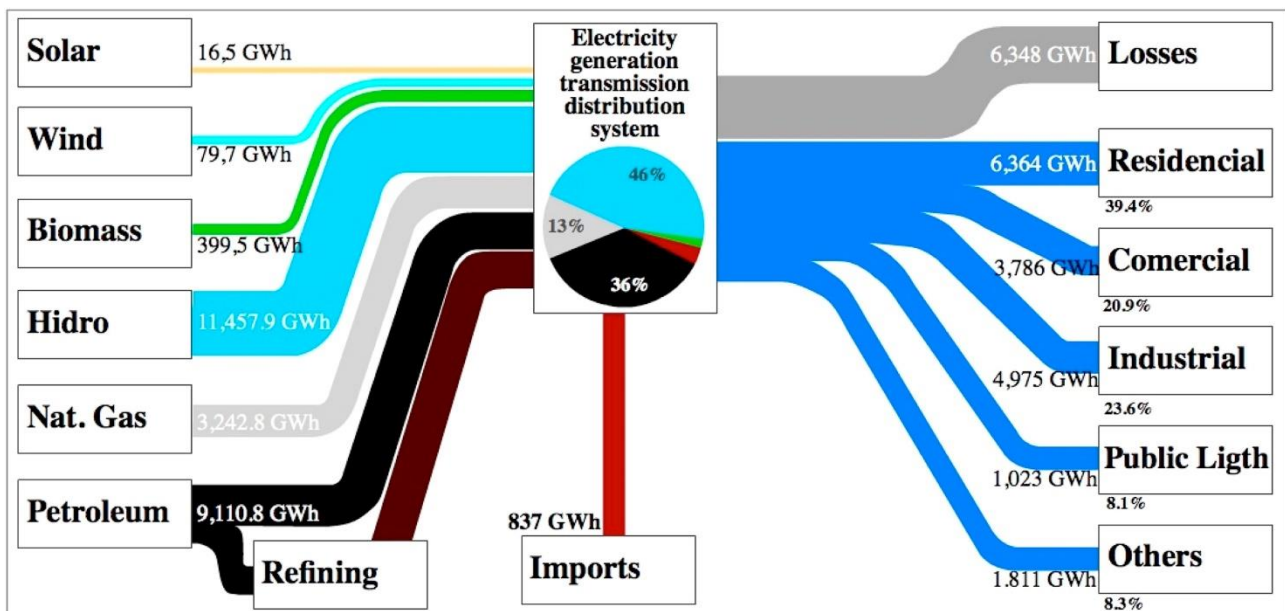


Gráfico 1. Sistema eléctrico ecuatoriano 2014 [5]

El Gráfico 1, indica que Ecuador es un país lleno de recursos naturales y durante décadas ha podido usarlos para producir electricidad. A pesar de que el gobierno se ha esforzado por la utilización de las tecnologías de energía renovable en el país, a través de la emisión de diversas regulaciones que promueven su participación. El 2016 el balance de energía todavía estaba por debajo del uno por ciento pese a la participación de las centrales eléctricas de ERNC en el país. Sin embargo, las pocas plantas de energía ERNC que se han puesto en servicio en el país han demostrado ser altamente efectivas. Un ejemplo de esto es el parque eólico Villonaco, que en 2014 mostró un factor de capacidad del 53%, que es considerablemente alto en comparación con el factor de capacidad promedio para este tipo de plantas. Las plantas solares fotovoltaicas también han demostrado una alta eficiencia, gracias a la posición privilegiada del país con respecto al sol. Debido a la alta efectividad

de los proyectos mencionados, es de gran importancia promover el uso de estas tecnologías en la región [7].

En 2014, la capacidad efectiva nacional sumó un total de 5745 MW, donde el 87.2% está conectado al Sistema Nacional Interconectado (SNI), y el resto se usa en áreas remotas como las regiones del Amazonas y Galápagos donde esta red no puede llegar a la población. El 45,7% de esta capacidad genera energía a partir de fuentes renovables, donde la energía hidroeléctrica representa más del 95%; el 5% restante es compartido por biomasa y tecnologías eólicas [8].

En cuanto a la energía solar en tierra firme, la primera planta solar comenzó a producir energía en 2011, y se encuentra en la región amazónica de Morona Santiago con una capacidad instalada de 0,37 MWp, desde entonces la capacidad instalada nacional ha aumentado rápidamente su participación, alcanzando en 2014 la capacidad total de 15,3 MWp, distribuido en 24 plantas ubicadas en diversas regiones del país [9].

En el Gráfico 2, se muestra la expansión de la generación eléctrica con ERNC durante la última década.

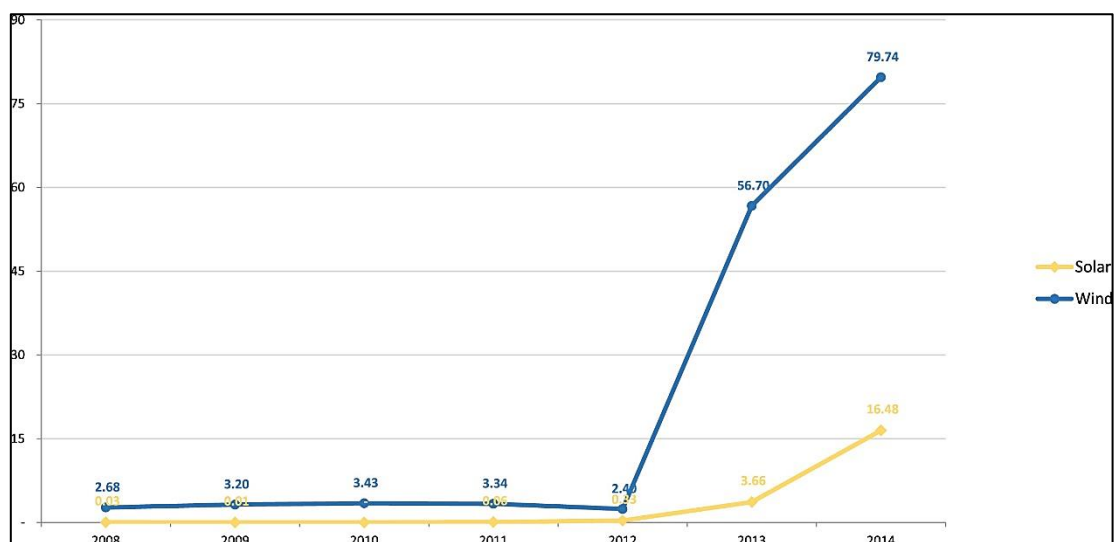


Gráfico 2. Generación histórica de energía (GWh) de tecnologías solares y eólicas [8].

3 Modelos de optimización existentes

La generación de energía fotovoltaica puede ser de dos tipos: sistemas aislados o granjas solares. Los primeros, es decir, sistemas fotovoltaicos que se instalan en domicilios, granjas, etc., permiten llevar la energía eléctrica a lugares de la geografía ecuatoriana que carecen de interconexión al Sistema Nacional Interconectado (SNI), o en donde realizar las conexiones son muy costosas. “Se ha instalado diversidad de sistemas aislados en lugares remotos como la Amazonía, islas en el Golfo de Guayaquil y lugares apartados de la serranía” [3]

Los sistemas fotovoltaicos aislados funcionan de manera similar que las granjas solares, con la diferencia de que después de transformar la energía eléctrica continua (DC) en energía eléctrica alterna (AC), en el inversor, la energía es distribuida al interior del domicilio, además de precisar de almacenamiento energético (baterías) para suministrar el consumo en las horas en que la irradiación no es suficiente. Para el mantenimiento del sistema aislado, es necesario limpiar los paneles solares para captar la radiación solar, cargar las baterías o añadir agua destilada y cambiar por una batería nueva. No sobrecargar el sistema fotovoltaico al conectar más equipos eléctricos que superen su capacidad de generación.

Existen diferentes configuraciones y soluciones para dimensionar un sistema aislado dependiendo del diseñador y del recurso experimental para obtener resultados. Muchos de estas configuraciones utilizan como principal recurso la radiación solar (fotovoltaica), el viento (eólica), la presión del agua (mini o micro hidráulica) y la ubicación geográfica para tener un estudio específico de una ubicación designada.

3.1 Ejemplo 1

Como antecedente un estudio realizado en Ecuador, presenta un proyecto híbrido; (Fotovoltaico – Hidroeléctrico) para satisfacer una demanda de consumo eléctrico, teniendo en cuenta que a sus alrededores hay un río importante del sector, por lo tanto, fue necesario una ubicación óptima para las turbinas hidráulicas y las placas fotovoltaicas. El estudio reveló que el sistema híbrido diseñado es técnicamente viable, puede satisfacer la demanda aprovechando al máximo las fuentes renovables (PV y HKT), con una gestión adecuada de los dispositivos de almacenamiento de energía (batería y sistema de hidrógeno), cuya energía de almacenamiento se mantiene a niveles adecuados [10].

Para determinar la ubicación óptima de la turbina, se utilizó el software HEC-RAS para obtener las velocidades del agua en diferentes estaciones de una sección transversal del río a partir de datos de batimetría y flujo en el río Guayas.

La optimización del sistema híbrido propuesto basado en PV, HKT (el uso de energía de la energía cinética del agua en canales abiertos se conoce como hidrocínética), batería e hidrógeno, pila de combustible, tanque de hidrógeno y electrolizador) se llevó a cabo utilizando el software HOMER. Se estudió la viabilidad técnica, tecnoeconómica y se analizaron parámetros tales como el capital inicial, el valor presente de todos los costos incurridos a lo largo de la vida (TNPC), escasez de

capacidad, el costo promedio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema (LCOE) y mantenimiento anualizado, carga eléctrica no satisfecha, coste operativo y de reemplazo [10].

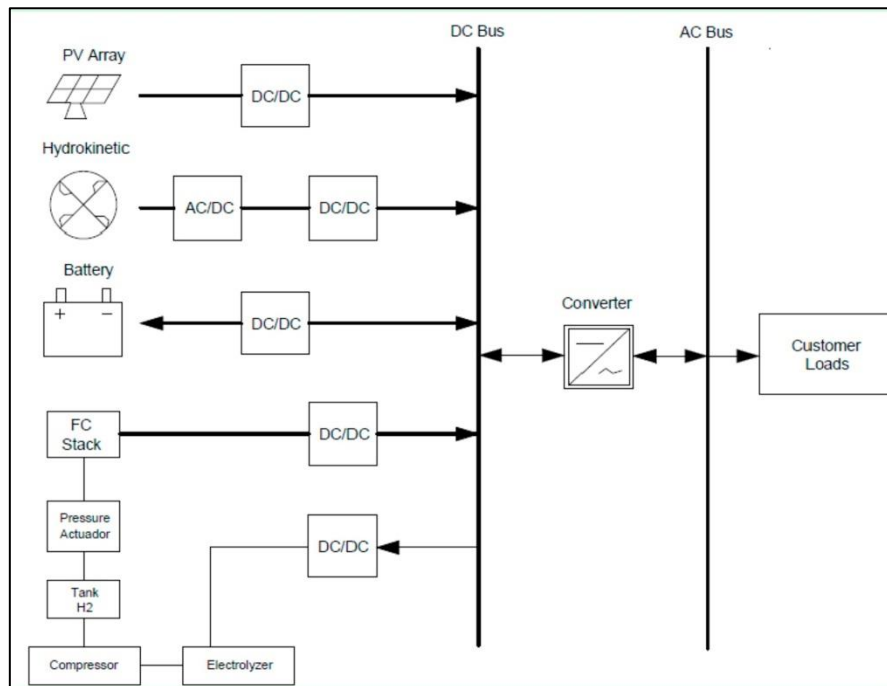


Gráfico 3. Sistema híbrido en estudio [10].

Las ventajas de utilizar un sistema híbrido (PV, HKT) es claramente el tipo de fuente de energía primaria para abastecerse, se utiliza un método limpio para proporcionar energía utilizando el potencial de los ríos y océanos aledaños a la ubicación y las 12 horas constantes de irradiación para los paneles fotovoltaicos.

Otra ventaja es que los costes de O&M en el tanque de hidrógeno y PV son cero debido a la falta de partes móviles o consumibles [10].

En cuanto a las desventajas se evidencian los costos de capital del electrolizador, el tanque y la pila de combustible son altos y también que el precio actual del subsistema de hidrógeno no es económicamente rentable, aunque se espera que en los próximos años el precio de los componentes más caros disminuya y el HKT tiene el costo de reemplazo más alto seguido por las baterías [10].

Países como Perú, Colombia, Venezuela tienen similitudes en la zona en cuanto a porcentaje de generación renovable y accesibilidad a la red eléctrica por lo que se tomará en cuenta proyectos de estos países como revisión bibliográfica.

3.2 Ejemplo 2

Otro caso a tener en cuenta es el Sistema híbrido para casas rurales (fotovoltaica, eólica, generador Diesel) con el objetivo de electrificar las áreas rurales y remotas con acceso limitado o nulo a la conexión a la red en Colombia (Puerto Estrella, Unguia y Jerico). Para este proyecto se propusieron 7 casos diferentes para analizar el óptimo, teniendo en cuenta una evaluación de comportamiento en el caso de solo utilizar una de ellas y luego evaluar al combinar dos de las tecnologías y para finalizar

las 3 tecnologías juntas. Se desarrolló un modelo dinámico de la planta con el software HOMER para realizar un análisis paramétrico completo en las configuraciones del sistema y seleccionar el más conveniente desde las perspectivas económicas además de los siguientes indicadores: el costo actual neto (“Net Present Cost”, NPC), el costo de capital inicial y el costo de la energía (“Costo f Energy”, COE). También se determinaron las emisiones anuales de CO₂ resultantes, como índice ambiental [11].

Los resultados del análisis de costos para una de las ubicaciones revelaron que la combinación de diésel, energía solar fotovoltaica y turbinas eólicas fue la opción óptima, con una inversión de capital inicial bajo y un VPN admisible.

Para las 2 últimas ubicaciones el sistema solar-diésel condujo al diseño económicamente más conveniente, teniendo en cuenta los requisitos de carga de estas comunidades y los recursos renovables disponibles en sus regiones correspondientes [11].

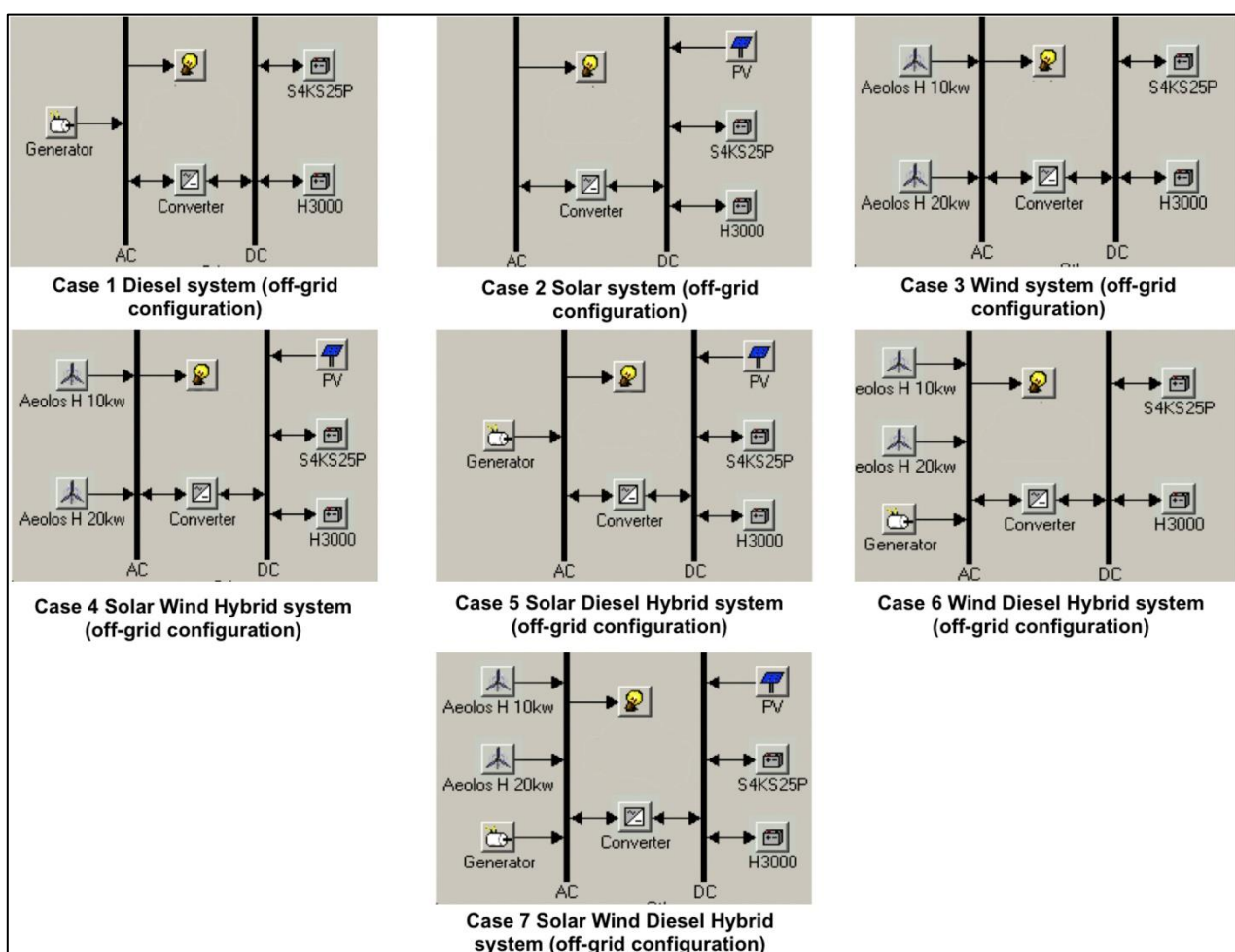


Gráfico 4. Sistema híbrido en estudio [11].

La ventaja de este proyecto es que las configuraciones totalmente renovables e híbridas son aparentemente los diseños más preferidos desde el punto de vista medioambiental y también pueden ser económicamente convenientes a largo plazo. Desde el punto de vista económico en caso de que el costo de capital fuera considerado como el único criterio, entre las configuraciones propuestas, el sistema basado en diésel es el más conveniente [11].

La desventaja de este proyecto es la necesidad de costos de inversión significativamente más altos. Además, aparte de la inversión inicial requerida, la aplicación de estas unidades da como resultado costos de operación y mantenimiento que claramente no pueden pagar las comunidades consideradas de bajos ingresos [11].

3.3 Ejemplo 3

Sistema Fotovoltaico (SFVAR) Proyecto Sistemas Fotovoltaicos Autónomos Fijos Residenciales. En este proyecto renovable los componentes de generación son los paneles fotovoltaicos y baterías más los elementos necesarios para el funcionamiento correcto del sistema (inversor y regulador). Los SFVAR son de baja potencia, generalmente desde 40 Wp hasta 200 Wp. La corriente generada por los paneles se almacena en un banco de baterías a través del regulador de carga que controla la tensión y corriente del sistema [12].

Recaltar que este proyecto se montó en Taisha en la provincia de Morona Santiago. Entre lo más relevante de este proyecto es que para las cargas en corriente continua la conexión es directa, y para las cargas de corriente alterna se instala un inversor, se muestra un ejemplo de esta instalación a continuación [12].

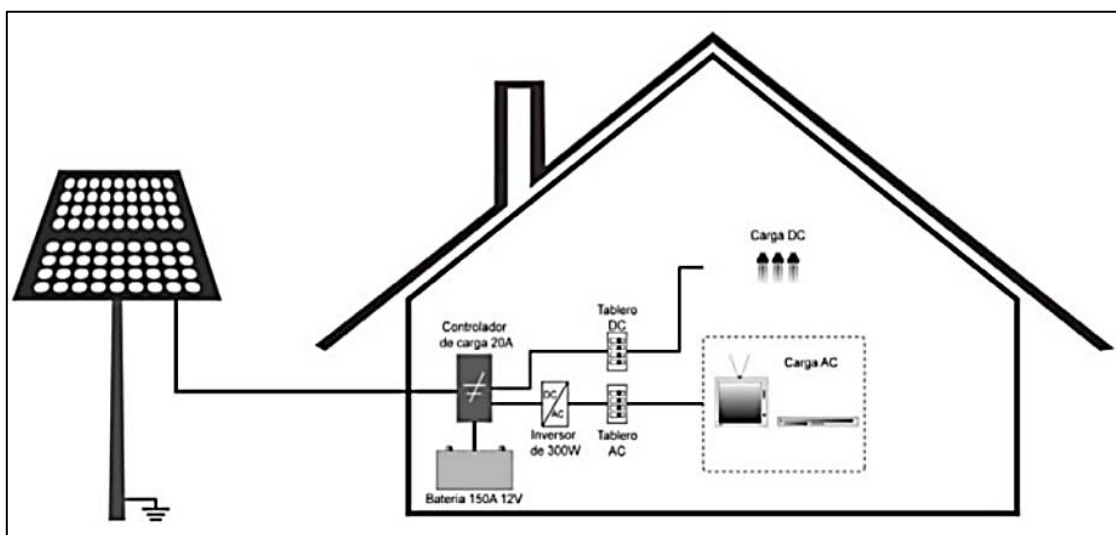


Gráfico 5. Esquema SFVAR [12]

Las ventajas de este sistema es el beneficio en cuanto al impacto con el ambiente ya que este se reduce al mínimo al disminuir en gran medida o incluso eliminar el consumo de combustible fósiles y la utilización de pilas desechables cuya disposición final genera riesgos al ambiente y las personas. La instalación de la misma no representa gran inversión ya que con un solo panel puede suministrar el consumo total de la vivienda.

3.4 Ejemplo 4

Modelo de optimización basado en tres tipos de tecnología renovable (energía solar fotovoltaica, energía eólica y energía hidroeléctrica de pasada) además de baterías y generador diésel como posibles respaldos del sistema. El modelo se lleva a cabo en una aldea rural costera fuera de la red, Playa Potes, en Bahía Solano, un municipio del departamento de Chocó en la región del noroeste del Pacífico de Colombia.

Este proyecto se realiza mediante una Optimización estocástica implícita, este es un modelo de optimización que ayudará a planificar sistemas de energía independientes. Tiene un enfoque matemático y computacionalmente simple que utiliza, en repetidas ocasiones, la optimización determinista para abordar un problema estocástico. Además, utiliza rangos de valores, o datos sintéticos, para representar posibles escenarios futuros, y luego encuentra una solución óptima para cada escenario [13]

Las ventajas de este proyecto es que independientemente del escenario analizado, la combinación óptima de tecnologías siempre consistió en una disposición de paneles solares fotovoltaicos con un sistema de almacenamiento de batería. A pesar de tales variaciones, la combinación óptima de tecnologías siempre permanece igual, esto se debe a los altos niveles de radiación solar encontrados en la región y a los bajos costos operativos de la tecnología fotovoltaica [13].

Como se observa en la solución óptima no incluye generador diésel, ya que las tecnologías basadas en diésel son costosas de operar debido a la compra de combustible y los costos de transporte. Estos costos, cuando se transfieren a una comunidad de bajos ingresos, hacen que la solución de combustibles fósiles de la generación de diésel sea insostenible [13].

4 Cobertura de servicio eléctrico en Ecuador

En base a los datos del último censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos – INEC, al 2010 se registró una población de 15.012.228 habitantes y para el año 2018 la población proyectada fue de 16.776.977 habitantes [2]

En el año 2008 la cobertura fue de 93,80 %, la misma que se ha incrementado hasta alcanzar los 97,33 % en el 2018, a nivel nacional. En el periodo 2008 – 2018, el incremento de la cobertura eléctrica en las regiones Sierra, Costa, Amazonía e Insular fue de 2,39%, 3,78%, 12,91% y 0,51%, respectivamente [2].

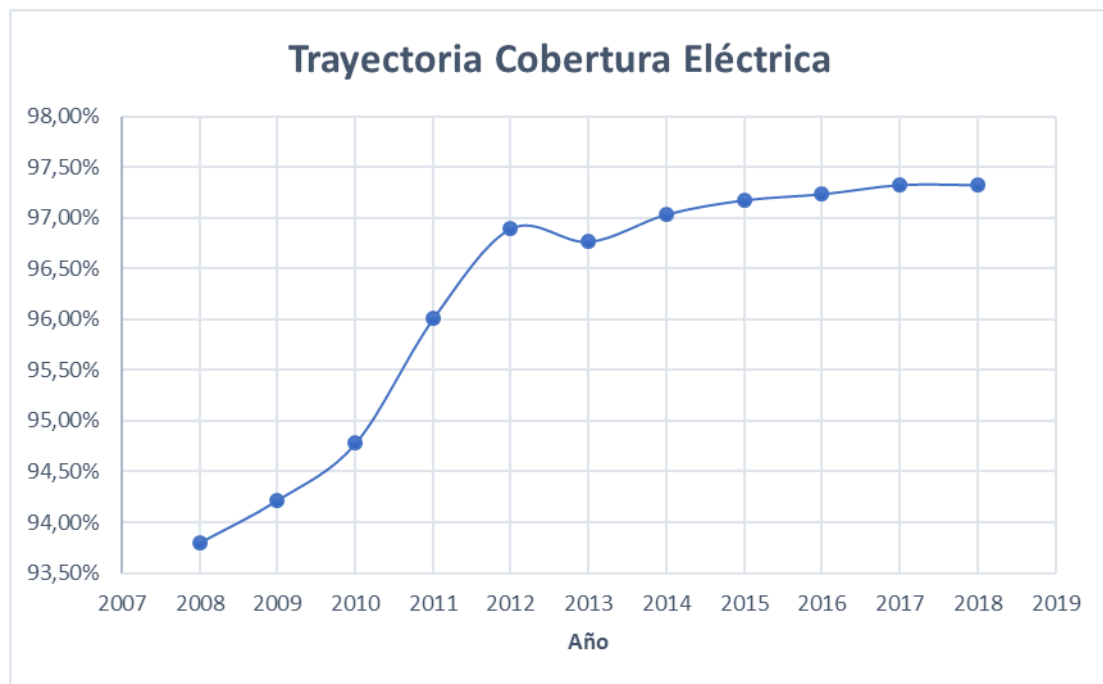


Gráfico 6. Cobertura de servicio eléctrico (Fuente propia)

Al 2018 la cobertura eléctrica nacional fue de 97,33 %, evidenciándose que las provincias con mayor cobertura de servicio eléctrico fueron Galápagos (99,63 %), Pichincha (99,53 %), Tungurahua (99,50 %) y Loja (99,40 %). Por otro lado, los porcentajes de cobertura eléctrica más bajos (menores al 90 %) se registraron en las provincias de Napo, Santa Elena, Pastaza, Esmeraldas y Morona Santiago [2].

Regiones / Provincias	2017
Azuay	98,81%
Bolívar	91,07%
Cañar	96,24%
Carchi	99,11%
Cotopaxi	96,97%
Chimborazo	93,89%
Imbabura	98,31%

Loja	99,40%
Pichincha	99,53%
Tungurahua	99,50%
Santo Domingo	98,93%
Región Sierra	98,47%
El Oro	98,25%
Esmeraldas	92,56%
Guayas	96,08%
Los Ríos	98,40%
Manabí	97,69%
Santa Elena	92,00%
Región Costa	96,72%
Morona Santiago	86,16%
Napo	89,47%
Pastaza	89,30%
Zamora Chinchipe	97,92%
Sucumbíos	96,99%
Orellana	97,16%
Región Amazónica	93,12%
Galápagos	99,63%
Región Insular	99,63%
Total, Nacional	97,33%

Tabla 1. Cobertura del servicio eléctrico por región y provincia [2]

Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas es precisamente lograr la seguridad energética para las comunidades pobres y vulnerables porque esto les ayudaría a satisfacer algunas de sus necesidades más básicas, como las relacionadas con la salud, la nutrición y la educación [14]. A partir de lo antes mencionado se puede deducir que el suministro de energía eléctrica es capaz de mejorar la calidad de vida y satisfacer las necesidades energéticas de la gran mayoría de los ecuatorianos, para lo cual se ha puesto mayor interés para este proyecto el trabajar con zonas rurales donde el acceso a la electricidad es de menos del 90% para de esa manera mejorar el crecimiento económico y el bienestar de la población rural.

5 Tipos de Consumo

5.1 Consumo Tipo Vivienda

Este consumo por lo general es bajo dependiendo del país o región sobre todo en un hogar en zonas rurales, donde se consume anualmente una media de 500 kWh aproximadamente teniendo en cuenta que el consumo aumenta según las necesidades que tenga una familia en estas zonas. El principal gasto es el bombeo de agua, seguido de los electrodomésticos, el agua caliente, la cocina y la iluminación.

Para este proyecto exclusivamente se tendrá en cuenta los consumos eléctricos de los electrodomésticos y la iluminación, ya que para el agua caliente y la cocina se opta generalmente por utilizar gas butano. Además, tratándose de una vivienda aislada, no se valorará la posibilidad de tener aire acondicionado ni bombeo de agua con el fin de consumir lo menos posible; por lo tanto, el consumo anual de la casa doméstica a estudiar será de 406,8 kWh/año aproximadamente.

5.2 Consumo Tipo Granja

El consumo eléctrico de este sistema aislado es más alto que el de una vivienda rural ya que en esta se necesita de maquinaria y equipos tecnológicos para el tipo de producción que tenga dicha granja.

Es importante tener en cuenta que en una granja existe una variación de la demanda energética debido a los meses de producción y no producción. Por ejemplo, en una granja de ganado vacuno típica, se puede observar en las horas de mayor consumo en los meses de no producción corresponden a aquellas donde se realizan las labores de alimentación del ganado con una potencia pico de 5.200 W. Sin embargo, en los meses de producción la hora correspondiente al pico de consumo eléctrico tiene lugar entre las 19:00h-20:00 h (9.100 W), en la que se desempeñan las siguientes actividades: iluminación de granja y quesería, tanque frigorífico para almacenaje de leche, cámara de refrigeración, cinta de alimentación, máquina de ordeño y motor de salmuera [15].

5.3 Consumo Tipo Casa turística de bajo consumo

Este tipo de consumo tiene como modelo una casa histórica con fines turísticos de bajo consumo, formada por 6 habitaciones, comedor, cocina, 3 baños, un recibidor, un pasillo y una escalera. Se tiene en cuenta que consta este tipo de vivienda de muchos más equipos que una vivienda doméstica rural, por ende, el consumo es considerable.

Para el cálculo de los consumos de la instalación en este tipo de consumo se tomó en cuenta las cargas en AC de iluminación y de los siguientes equipos: cadena musical, televisión, microondas, lavavajillas, tostadora, secador y lámparas (cocina y nevera, al igual que ocurría con el caso de vivienda doméstica, serán de gas butano).

Al tratarse de una casa destinada al turismo rural, tiene demandas distintas en función de los festivos. Por este motivo, se estima la demanda mensual y diaria en función de los posibles días ocupados, así como su factor de ocupación (0,6 para todos los meses del año) [15].

6 Ilustración del Proyecto

A lo largo de este capítulo se plantearán distintas configuraciones posibles dentro del sistema óptimo elegido para determinadas localizaciones. Además, dichas configuraciones posibles estarán en constante estudio y comparación. El sistema a desarrollar está constituido fundamentalmente por módulos fotovoltaicos, elementos pertinentes de control, baterías, aerogeneradores y un generador AC. Cabe recalcar que se ha elegido añadir a la optimización del sistema un generador AC con el objetivo de aumentar la fiabilidad, ya que en el caso en el que la radiación solar sea insuficiente y la carga de las baterías se haya agotado el generador actuará como fuente de apoyo. Además, se utilizará una estrategia de seguimiento de la demanda, cuando las baterías no puedan cubrir la demanda, se pondrá en funcionamiento el generador AC.

Para este proyecto se experimentará la región de Ecuador, específicamente zonas rurales donde el acceso a la red se estima que es nulo. Debido a que este proyecto se centraliza en hogares pobres y que carecen de cobertura eléctrica, se ha optado por utilizar un consumo tipo de vivienda para todas las simulaciones.

6.1 Datos de partida

El objetivo de este proyecto, es determinar la solución óptima mediante una comparativa de diferentes tecnologías renovables para generar energía en una vivienda familiar.

La herramienta utilizada para realizar dicha comparativa es el software de simulación iHOGA con la cual se cargarán los elementos necesarios que compondrán el sistema y se obtendrán los informes finales donde constará la minimización de los costes totales del sistema a lo largo de su vida útil. El programa ofrece la posibilidad de optimizar una instalación combinando distintas tecnologías de generación y control.

6.2 Descripción de regiones rurales seleccionadas

Muchas áreas rurales en las provincias Ecuador tienen un bajo nivel de acceso a la red. Por lo tanto, la aplicación de diversas fuentes energéticas, tanto de energía renovable, (como paneles fotovoltaicos, baterías, aerogeneradores) como no renovable (generadores diésel o gasolina), puede ser una opción prometedora para satisfacer la demanda eléctrica de estas áreas.

En este proyecto las localidades que se han tenido en cuenta para su respectivo estudio de optimización son las aquellas que están por debajo del 92% de cobertura eléctrica según indica la Tabla 1.

Según la publicación [2], sobre la disponibilidad de electricidad para la población rural, estas áreas están separadas geográficamente y son climáticamente diferentes, pero comparten inconvenientes de accesibilidad a la red eléctrica similares.

6.3 Estimación de la carga

El consumo tipo vivienda será el mismo para todas las localidades que se han expuesto anteriormente. Para efectos de este proyecto se consideró tomar los datos de consumo para una vivienda en una zona rural de la Tesis Doctoral realizada por Juan Carlos Rojas [16]. El consumo eléctrico considerado, (1,15 kWh/día) es lo más parecido a la realidad de acuerdo a las características elementales de electricidad que requiere un hogar rural, en el Gráfico 7, se ilustra su consumo durante las 24 horas. Cabe recalcar que dicho consumo es del país de Venezuela, pero al ser este un país de la zona y tener relación con países cercanos según estudios predecesores se optó por considerarlo para este proyecto.

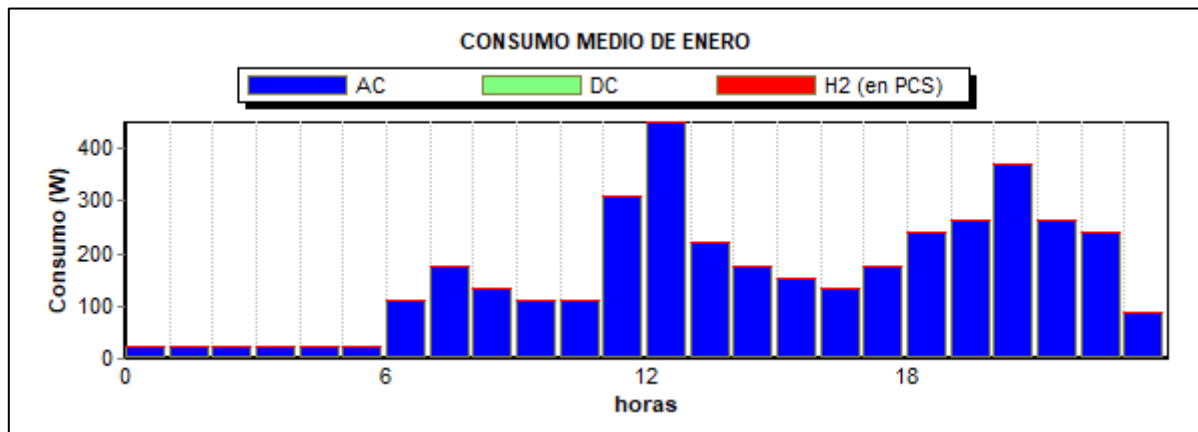


Gráfico 7. Perfil de consumo a lo largo del día. Fuente: iHOGA

7 Disponibilidad de recursos energéticos renovables en Ecuador

7.1 Irradiación

La obtención de los recursos renovables es simple y sencillo por medio del software iHOGA. En cuanto a irradiación, el programa pide que se introduzcan los datos de latitud y de longitud de la localización donde se efectuará la optimización del sistema, descargando de la NASA los datos de irradiación (así como de temperatura y viento). El software tiene la opción de calcular la inclinación óptima para la captación más eficiente de irradiación solar en la localización encontrada. Además, una vez descargados los datos de la NASA al mismo tiempo vienen acompañados con temperaturas medias de la localidad.

iHOGA calcula la inclinación óptima teniendo en cuenta no solo la radiación si no también el consumo de cada mes, obteniendo la relación consumo/irradiación para cada ángulo de inclinación entre 0° y 90° . El valor de inclinación óptimo será el ángulo tal que el mínimo anual de la relación consumo/irradiación se maximice. Este caso es válido en este proyecto debido a que la colocación de los paneles fotovoltaicos es fija [17]

7.2 Viento

De igual manera que en el caso de la irradiación, por medio de iHOGA se pueden importar los datos medios mensuales de la web de la NASA junto con el parámetro de forma Weibul, indicando anticipadamente las coordenadas geográficas de la localidad a estudiar. Pero para este proyecto se ha considerado utilizar la herramienta Renewable Ninja [18], debido a que los datos de la NASA no son adecuados ya que este considera como datos la media de medio grado de latitud por medio grado de longitud, de la herramienta Renewable Ninja se puede descargar datos de viento horarios por lo que son datos más fiables que la NASA.

7.3 Agua

El recurso energético renovable como el agua no es elegido para las simulaciones de optimización ya que en las localidades donde se estudiarán las diferentes configuraciones optimas no hay ríos aledaños.

8 Simulación de los sistemas óptimos

Para lograr el objetivo del proyecto, a lo largo de este capítulo se van a estudiar las distintas soluciones propuestas para el suministro permanente en un sistema aislado. Para encontrar la mejor combinación se van a realizar las simulaciones de cada uno de los sistemas aislados con el software iHOGA, para lo cual una vez introducidos los parámetros y elementos previos que requiere el programa, se realiza la simulación para obtener el óptimo en cada uno de los casos a estudiar. De esta forma se consigue la comparativa buscada por el proyecto. Como se ha indicado anteriormente se busca la configuración optima entre todas las tecnologías renovables disponibles para las localidades a estudiar y estas son:

- Sistema fotovoltaico con baterías (acumuladores de energía).
- Sistema con aerogenerador y baterías
- Sistema con generador AC y baterías
- Sistemas fotovoltaico con baterías y aerogenerador
- Sistemas fotovoltaico con baterías y generador diésel
- Sistema fotovoltaico con baterías, generador diésel y aerogenerador.

De manera que iHOGA se encargara de comparar y buscar la combinación óptima para cada tipo de sistema, y a partir de ese resultado se puede realizar un análisis de sensibilidad.

Previamente han quedado definidos los parámetros de demanda energética, estos datos serán comunes entre las configuraciones o sistemas antes planteadas y serán el punto de partida para realizar las simulaciones. Para todos las configuraciones o sistemas a estudiar se utilizará una estrategia de control de seguimiento de la demanda para priorizar el uso de energía renovable tanto para consumo como para carga de baterías y un tipo de optimización mono objetivo que tenga únicamente en cuenta la combinación de la que resulte el mínimo coste. Aquellas posibles alternativas podrán estar compuestas de paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, baterías, reguladores de carga, inversores y generadores diésel o gasolina. Aunque sea posible la combinación de todos ellos, en algunos casos es posible que el sistema optimo sólo incluya alguno de ellos.

8.1 Localidad de referencia

La primera localidad para la cual se realiza el estudio es una casa unifamiliar situada en el recinto de Julio Moreno, cantón Simón Bolívar en la provincia de Santa Elena,

El terreno donde se encuentra la vivienda (2°10'12.0"S 80°21'00.0"W) o (-2.17, -80.35):



Gráfico 8. Google Maps

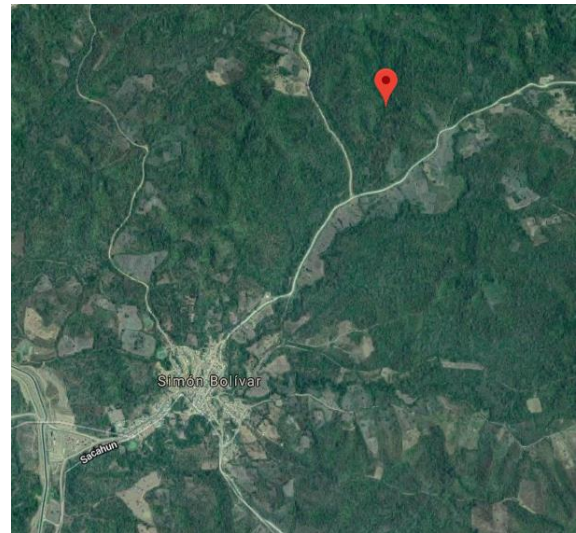


Gráfico 9. Google Maps

Como se observa en el Gráfico 9 la vivienda donde se van a estudiar los distintos sistemas aislados se encuentra muy lejos de la población, por lo que ha sido un factor determinante para que no se pueda construir una instalación de tendido eléctrico exclusiva para esta vivienda.

Para empezar, los datos de irradiación solar media diaria y de viento son indispensables para un correcto cálculo de la energía que producirán los paneles fotovoltaicos y los aerogeneradores. Para este análisis en iHOGA, es el propio programa quien descarga los datos de irradiación que proporciona la NASA a partir de las coordenadas geográficas de la localidad a estudiar, el azimut y la inclinación de los paneles fotovoltaicos (Anexo 1), así como la densidad del aire referente a la altura deseada y la rugosidad del terreno en el caso de los aerogeneradores. Como se indica en el apartado 7.2 Viento los datos de viento se descargarán de la página Renewable Ninja para posteriormente exportarlos a iHOGA.

A continuación, es necesario seleccionar uno o varios modelos de panel fotovoltaico, batería, inversor, regulador, generador AC y aerogenerador para ser considerados en las optimizaciones. El software de simulación iHOGA facilita una base de datos donde encontramos una serie de componentes entre los que se encuentran componentes de diferentes marcas más habituales y confiables del mercado, además permite añadir elementos nuevos.

Añadir Panel individual

Zero

Añadir Familia Paneles

SiM12-Atersa

⏪

⏩

⏴

⏵

+

-

⬆

⬇

⬇

⬅

↺

Nombre	Tensión nominal	Intens. cortoc.	Potencia nominal	Coste de adquisición	Coste O&M unitario	Vida esperada	TONC	Coef. Tª	Emisiones CO2 fabricación y recic.	Peso
Nombre	[V]	[A]	[Wp]	[€]	[€/año]	[años]	[°C]	[%/°C]	[kgCO2 equiv./kWp]	[kg]
SiM12-Atersa: A10W	12	0,68	10	45	0,45	25	50	-0,45	800	1,6
SiM12-Atersa: A20W	12	1,32	20	76	0,76	25	50	-0,45	800	3
SiP12-Atersa: A66P	12	4,06	66	150	1,5	25	47	-0,43	600	6,2
SiP12-Atersa: A95P	12	5,51	95	173	1,73	25	47	-0,43	800	7,5
SiP12-Atersa: A135P	12	8,23	135	192	1,92	25	47	-0,43	800	12,8
SiM12-Isofoton: Is10	12	0,82	10	32	0,32	25	46	-0,45	800	1,8
▶ SiM12-Isofoton: Is22	12	1,64	22	56	0,56	25	46	-0,45	800	3,4
▶ SiM12-Isofoton: Is60	12	3,73	60	140	1,4	25	46	-0,45	800	6,5
▶ SiP12-Suntech: STP-50	12	3,13	50	110	1,1	25	45	-0,47	800	5,8
▶ Gi Power GP-100P-36	12	6,79	100	150,2	0	25	49	-0,2	800	20,8

Coste Fijo de Operación y Manten.:

0

€/año




Gráfico 10. Fuente iHOGA

Como se muestra en el Gráfico 10, se han seleccionado aquellos módulos que cuentan con buenas prestaciones en relación calidad-precio, así como aquellos cuya relación potencia-tensión cumple las expectativas necesarias, del mismo modo será para los otros componentes. Recaltar que el coste de Operación y Mantenimiento para este proyecto es 0, ya que al ser una vivienda con un consumo bajo el propietario fácilmente podría efectuar dicho mantenimiento (Gráfico 10). El número de paneles, baterías en serie y paralelo es un dato que iHOGA calculara para la solución óptima del sistema. Es necesario saber los precios de los componentes en Ecuador para que la investigación sea lo más realista posible, por lo que se realizó una investigación de precios que se detallan en la Tabla 2.

LISTA DE PRECIOS				
Componente		Coste de adquisicion (\$)	Coste de adquisicion (€)	Vida esperada (años)
Panel FV	Gi Power GP-100P-36	166,89	150,20	25
Panel FV	KM270PP-60	298,54	268,69	25
Panel FV	ECS-345M72	368,49	331,64	25
Bateria	Ritar Power DC12-100	248,75	223,88	12
Bateria	Ritar Power DC12150	392,77	353,49	12
Inversor	V.E.P.I 48/800-120V NEMA 5-15R	554,01	498,61	10
Regulador	Phocos CX 24/48V:40/40A	220,5	198,45	10
Aerogenerador	Y.Z.W ZH1.5kw	2000,00	1800,00	15
Generador AC	Generador 0,5 kW Gasolina	222,22	200,00	
Generador AC	Generador 1,9 kW Diésel	1000,00	900,00	

Tabla 2. Precios y vidas útiles (en baterías vida flotante) de los componentes considerados. Fuente [19]

En Ecuador el precio de la gasolina en la actualidad es de 0,489 \$/kWh (0,441 €/kWh) y del diésel es 0,274 \$/kWh (0,247 €/kWh) [20], estos valores servirán para ingresar en el apartado del generador.


Una vez realizado el ingreso de parámetros necesarios al software se procede a configurar la simulación, en términos de optimización, estrategia de control, datos económicos y restricciones. En el caso a estudiar se ha elegido una optimización mono objetivo, es decir, el programa busca minimizar los costes totales a lo largo de la vida útil del sistema trasladados al momento inicial de la inversión.

El tiempo de estudio será de 25 años pidiendo un préstamo del 80 % del coste inicial de la inversión a un interés del 7 % en 10 años. Se ha seleccionado un 2 % tanto de interés de mercado (precio del dinero) como de inflación general esperada(O&M.).

PARÁMETROS ECONÓMICOS:	
Intereses del mercado:(precio del dinero)	4 %
Inflación esperada general (O&M...):	2 %
Periodo de estudio	25 años
<input checked="" type="checkbox"/> Al finalizar el periodo de estudio considerar el coste residual de los componentes	
Moneda:	Euro (€) ▾
Cableado, instalación y costes variables iniciales:	300 € Fijo + 2 % sobre C. inicial

Préstamo (cuota constante, sistema francés):	
Cantidad prestada:	80 % del coste inicial de la inversión
Interés del préstamo:	7 %
Duración del préstamo:	10 años

Gráfico 11. Parámetros económicos. Fuente: iHOGA


Restricciones
—
□
×

Si una combinación de componentes y estrategia no cumple cualquiera de las siguientes restricciones, iHOGA la descarta (se asigna a esa combinación coste infinito):

Energía No Servida máxima permitida: 0,3 % de la demanda anual
(Máxima energía no suministrada por el sistema autónomo. Esta energía puede comprarse de la red AC si dicha red existe y además se permite la compra en la pantalla de Consumo)

Autonomía mínima (baterías+hidrógeno): 4 días
(☐ si hay Generador AC o Pila Comb. combustible externo o Compra E no servida a red AC se considerará que la autonomía del sistema es infinita)

Cap. nominal banco baterías (Ah) < 20 x (I_{cc} (A) del generador fotovoltaico + Intensidad (A bus dc) grupo aerogen a 14 m/s)
(☐ si hay Generador AC o Pila Comb. combustible externo o Compra E no servida a red AC, no tener en cuenta esta condición)

Fracción renovable mínima: 50 %

Coste actualizado de la energía máximo: 100 €/kWh

ACEPTAR

Gráfico 12. Restricciones. Fuente: iHOGA

Antes de empezar la simulación se introducen restricciones que condicionarán el sistema ver Gráfico 12, la restricción más importante es la energía no servida máxima permitida. En este caso al ser un sistema de autoconsumo se considerará que la energía máxima no servida sea 0,3%, lo que significa que las combinaciones que no puedan cubrir el 99,7% del consumo anual serán descartadas.

Predimensionamos el sistema a que tenga una autonomía mínima de días, este valor dependerá de las condiciones climáticas mas precisamente de la nubosidad donde se encuentra la localidad, durante el año entre más despejado menos serán los días de autonomía, ver Anexos 10 al 16. Se impone una restricción en la capacidad del sistema de baterías que no excederá el 20% de su capacidad con la intención de impedir que las corrientes de carga sean demasiado bajas para el tipo de baterías seleccionadas. Debido a que el sistema a estudiar no es totalmente renovable (en algunos casos puede incluir generador diésel o gasolina), la fracción renovable mínima sería un 0% o 50% según sea conveniente.

Para finalizar la restricción del coste actualizado de la energía máximo se indica un valor muy alto (100 €/kWh), por lo que todos los posibles sistemas lo cumplirán, Posteriormente se procederá a la optimización. El programa proyecta un gráfico de la evolución del coste total (en rojo) y de las

emisiones de CO₂ equivalentes anuales del ciclo de vida (verde) de las 10 mejores soluciones, ordenadas de mejor a peor (Gráfico 13).

8.1.1 Características de la solución óptima

Localidad Simón Bolívar	
Componentes	Modelo
Paneles	Gi Power GP-100P-36: 4s. x 2p.
Baterías	Ritar Power DC12150:150Ah: 4 s. x 1 p
Inversor	V.E.P.I 48/800-120V NEMA 5-15R
Regulador	Phocos CX 24/48V:40/40A

Tabla 3. Especificaciones de la solución óptima, caso fotovoltaico-baterías. Fuente: elaboración propia

Evaluando las posibles alternativas de suministro eléctrico a la vivienda aislada de la red eléctrica, se concluye que la solución óptima (menor coste) es aquella que incorpora un sistema fotovoltaico – baterías (Tabla 4).

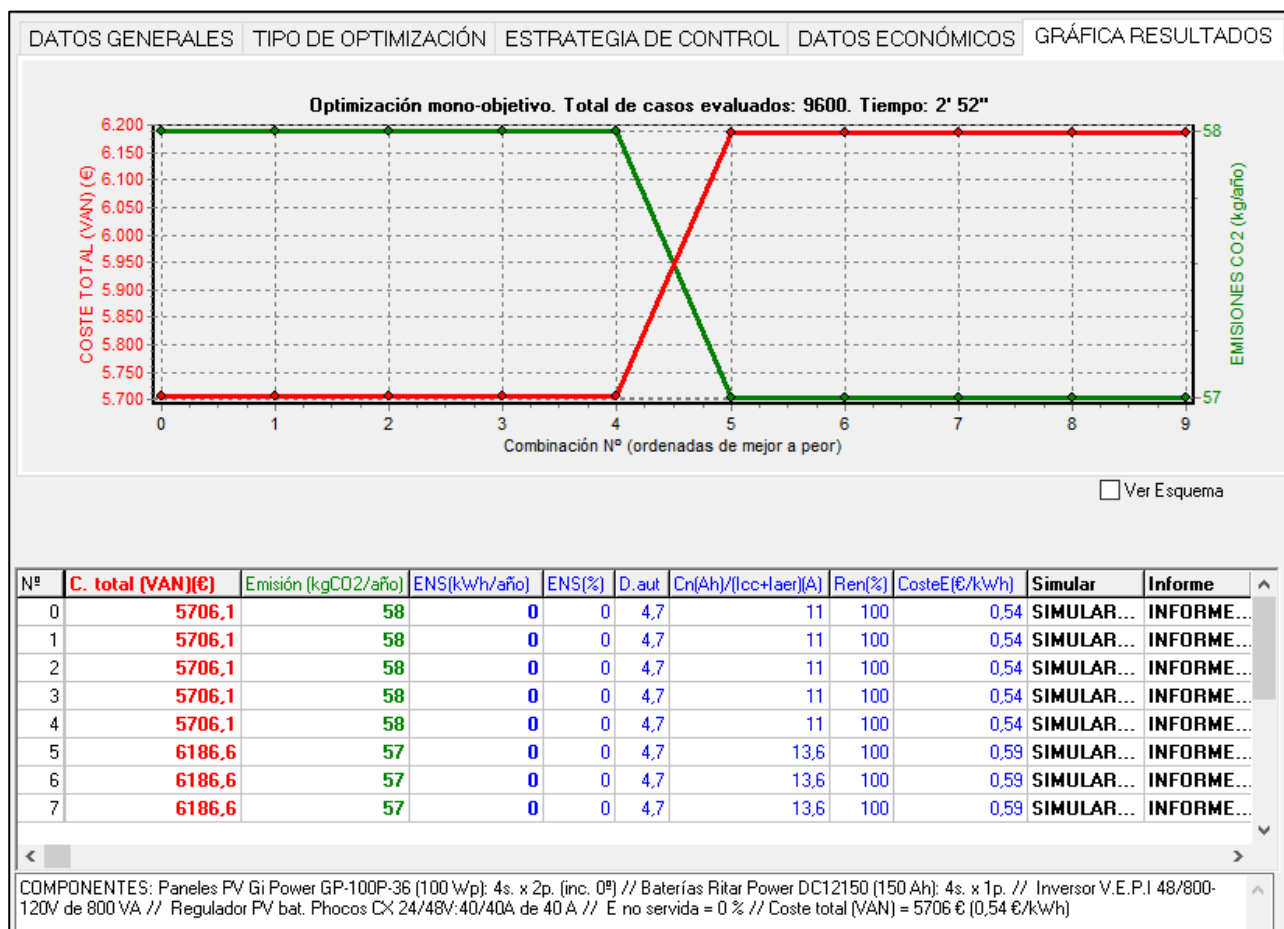


Gráfico 13. Optimización mono.objetivo, caso fotovoltaico-baterías. Fuente: iHOGA

SISTEMA	Coste Total del Sistema (€)	Coste de la energía (€/kWh)	Emisiones Totales (kgCO ₂ /año)	Energía en exceso (kWh/año)	Energía generada (kWh/año)
FV_BAT	5706,1	0,54	58	484	1085
EOLICA_BAT	8770,5	0,83	93	1073	1626
GENERADOR_BAT	13247,8	1,24	1302	0	670
FV_BAT_EOLICA	5706,1	0,54	58	484	1085
FV_BAT_GENERADOR	5706,1	0,54	58	484	1085
FV_BAT_GENERADOR_EOLICA	5992,6	0,57	58	484	1085

Tabla 4. Características de la solución óptima de cada configuración. Fuente: iHOGA

El exceso energético presente se debe a la condición de 0,3% de Energía no servida, es decir, a la obligatoriedad de suministro ininterrumpido de energía. El exceso energético tiene que ver con la potencia que en muchas ocasiones está por encima de la potencia demandada por el sistema, hecho que provoca el exceso energético.

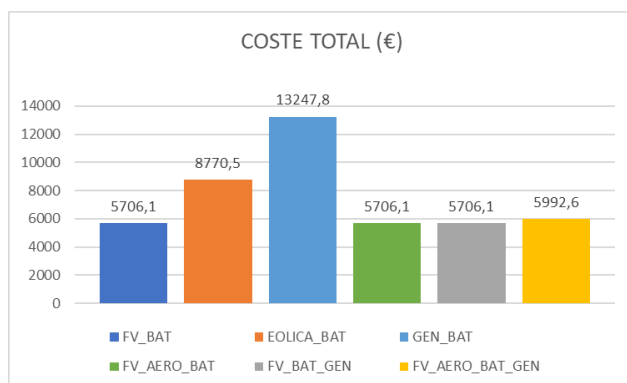


Gráfico 14. Coste Total. Fuente iHOGA

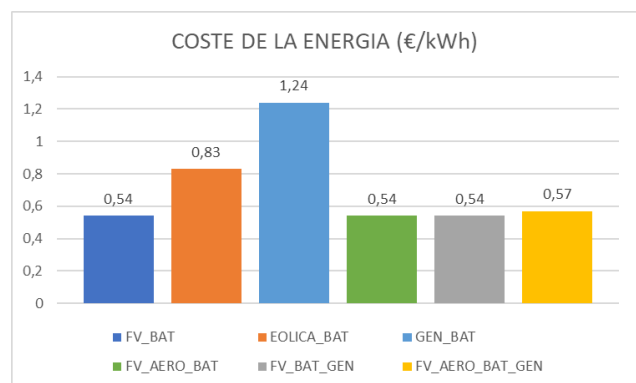


Gráfico 15. Coste de la Energía. Fuente iHOGA

A excepción del sistema de aerogenerador con baterías, para descartar que existiera cualquier otra posible configuración óptima para el caso estudiado, se realizaron simulaciones con cada uno de los sistemas renovables propuestos al principio del capítulo 8, de tal manera que se comparó todas aquellas posibles soluciones como se muestra en el Gráfico 14. El sistema fotovoltaico con baterías pese a que se le añadió un generador AC y un aerogenerador, no significó cambios en los resultados de simulación debido a que alcanza con la producción de energía de los paneles para cubrir la demanda de la vivienda y para las horas donde no producen los paneles fotovoltaicos están las baterías seleccionadas por iHOGA, el agregar un generador AC y un aerogenerador significa más gastos y eso el software lo descarta.

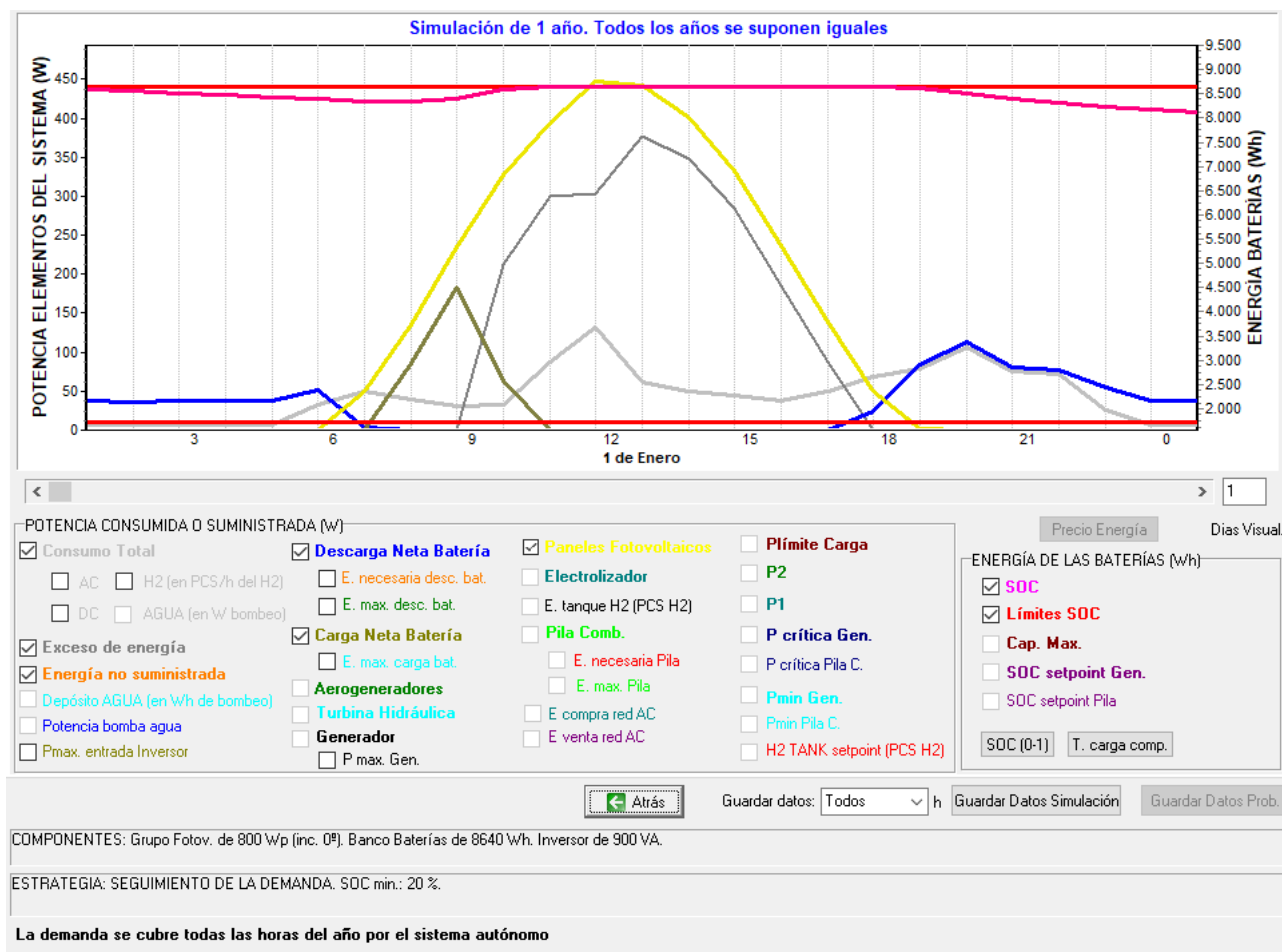


Gráfico 16. Simulación de 1 año: Fuente iHOGA

Se aprecia en el Gráfico 16, que la irradiación solar es lo suficientemente alta como para suministrar la totalidad del sistema a través de los paneles fotovoltaicos.

A partir del amanecer (06h00) comienza la producción de energía, los paneles generan energía para el abastecimiento energético de la vivienda, con lo cual el sistema es suficientemente autónomo durante las horas de radiación y no requiere de la energía almacenada en las baterías. La energía consumida durante el día se cubre únicamente con los paneles fotovoltaicos.

A las 09h00 las baterías se han cargado completamente llegando a su estado de carga máximo. A partir de esa hora hay un exceso de energía no aprovechada. Sobre las 18h30 deja de haber radiación solar y son las baterías las que cubren dicho consumo. Las mismas comenzarán a cargarse cuando a las 06h00 de la mañana del día siguiente los paneles comiencen de nuevo a generar energía.

Se aprecia que se continúa produciendo un exceso de energía aun cuando las baterías se han recargado totalmente (Gráfico 16). Este exceso de energía podría ser vendida a la red, pero en el caso que se está estudiando no sería posible debido al aislamiento de la vivienda.

8.1.2 Estudio Económico

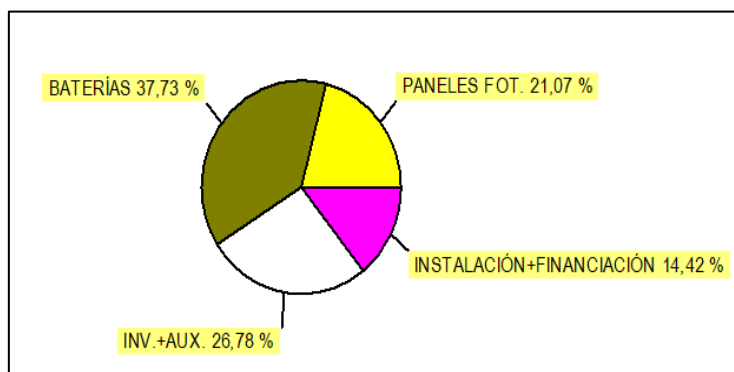


Gráfico 17. Coste del Proyecto según los componentes. Fuente: iHOGA

El porcentaje económico que corresponde a cada componente del sistema optimo se resume en el Gráfico 17. Las baterías son el componente que más gasto suponen, recalcar que los gastos de mantenimiento se ha considerado que son cero, ya que el propietario puede encargarse del mantenimiento respectivo. Después de las baterías el componente con más tanto por ciento económico son el inversor, el regulador y los costes auxiliares con su mantenimiento incluido. Los costes referentes al término auxiliares abarcan los trabajos de acondicionamiento, estructura, cableado, cuadros eléctricos, etc. En cuanto a los paneles fotovoltaicos la inversión inicial es la compra de los paneles, los gastos de mantenimiento se ha considerado que son cero.

El coste total abarca gastos de sustitución de componentes y los ingresos de venta, debido al tiempo de vida previsto de los componentes del sistema el cual es de 18 años para las baterías y 10 años para el regulador y el inversor, en alguno de los casos habría hasta más de 2 sustituciones de cada componente durante los 25 años de estudio planteado. Las posibles sustituciones durante el tiempo de estudio ya están asumidas en el Coste Total.

8.2 Optimización de todas las localidades

Nº	LOCALIDADES	COORDENADAS	
		LATITUD	LONGITUD
1	Simon Bolivar (Santa Elena)	2°10'12.0"S (-2.17)	80°21'00.0"W (-80.35)
2	San Isidro (Morona Santiago)	2°13'44.9"S (-2.229)	78°10'42.4"W (-78.178)
3	Tálag (Napo)	1°04'22.5"S (-1.073)	78°09'22.4"W (-78.156)
4	Arajuno (Pastaza)	1°14'22.4"S (-1.239)	77°40'53.0"W (-77.681)
5	Timbiré (Esmeraldas)	0°56'05.5"N (0.935)	78°53'06.3"W (-78.885)
6	San Miguel (Bolivar)	1°43'21.8"S (-1.723)	79°02'00.9"W (-79.034)
7	Taisha (Morona Santiago)	2°20'19.9"S (-2.338)	77°27'32.8"W (-77.459)

Tabla 5. Localidades para estudio. Fuente: Google Maps

Como se mencionó anteriormente las localidades de la Tabla 5 fueron seleccionadas por no sobrepasar el 92% de cobertura eléctrica en el país, para estas localidades utilizamos los mismos procedimientos que en la localidad de referencia antes explicada, a excepcion de los datos de coordenadas geograficas

los parametros de irradiación solar media, datos de viento, elección de paneles, baterías, aerogeneradores, inversores, reguladores y generador diésel, todos aquellos se mantienen. También serán las mismas restricciones y parámetros económicos para la simulación del sistema óptimo. Los datos de inflación del combustible no suponen una significativa solución o ayuda para este proyecto porque en Ecuador el combustible es subsidiado por el estado por lo que el aumento o reducción del mismo no se ha visto afectado significativamente desde hace más de una década, ver Anexo 4.

8.2.1 Resultados y Características de la simulación.

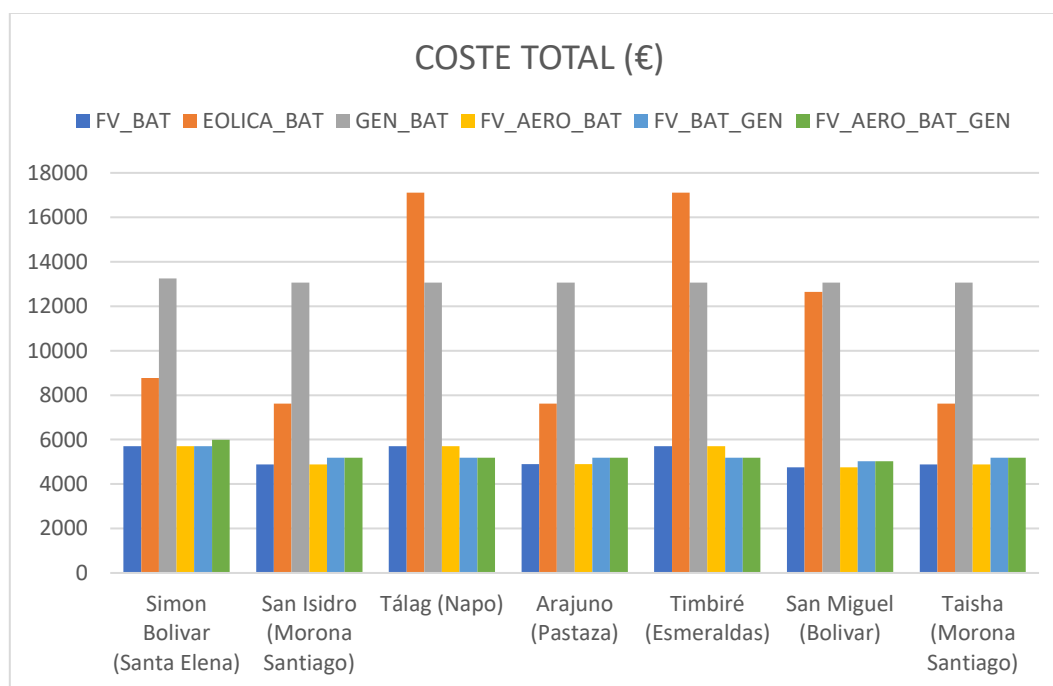


Gráfico 18. Coste Total. Fuente: iHOGA

El sistema aerogenerador con baterías tiene un coste tan elevado en algunas localidades debido a que son zonas con poco potencial eólico por lo que iHOGA en la optimización optó por 2 aerogeneradores. Se descarta el sistema generador AC con baterías ya que tiene un coste tan elevado debido a la gran cantidad de combustible que necesita, ya que el consumo del generador es directamente proporcional a la demanda. Otra razón para descartar el sistema formado por generador AC con baterías es porque aparece en juego la restricción de un 0,3% de Energía no Servida la cual obliga al generador diésel a estar conectado continuamente encareciendo los costes debido al uso continuo de combustible, a los costes de combustible hay que sumarle los costes de reemplazamiento y mantenimiento del generador debido a su continuo funcionamiento. El Anexo 5, contiene los datos del Gráfico 18.

Por lo que el generador AC se debe contemplar como un sistema de apoyo sobre el suministro y no como único sistema de generación. Se observa que en la mayoría de las localidades que el sistema óptimo es el fotovoltaico con baterías, su capacidad de producción abastece sin problemas la demanda, por otro lado, el contemplar un aerogenerador o un generador AC para el sistema óptimo implicaría más gastos.

En Tálag y Timbiré (Anexo 5) el coste total del sistema fotovoltaico con baterías es un poco mayor que el sistema fotovoltaico con baterías y generador AC, debido a que éste dispone de un generador AC para apoyar al sistema a pesar de que este no entra en funcionamiento (Anexo 29), ya que en estas zonas hay mucha concentración de nubes y los días de autonomía aumentan por lo que ya no se necesita de gran disponibilidad de baterías (capacidad y número) y por ende la autonomía se supone infinita. El tamaño de baterías depende del número de días de autonomía a considerar, esto dependerá de la ubicación de cada localidad ya que existe diferentes días nublados en cada localidad. Estos resultados son extraídos de los Anexos 10 al 16.

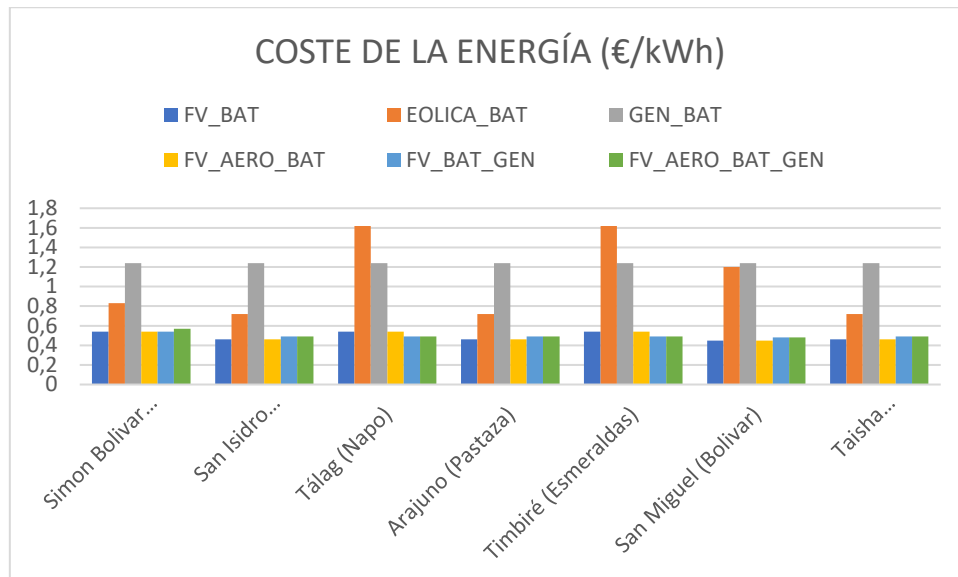


Gráfico 19. Coste de la Energía. Fuente: iHOGA

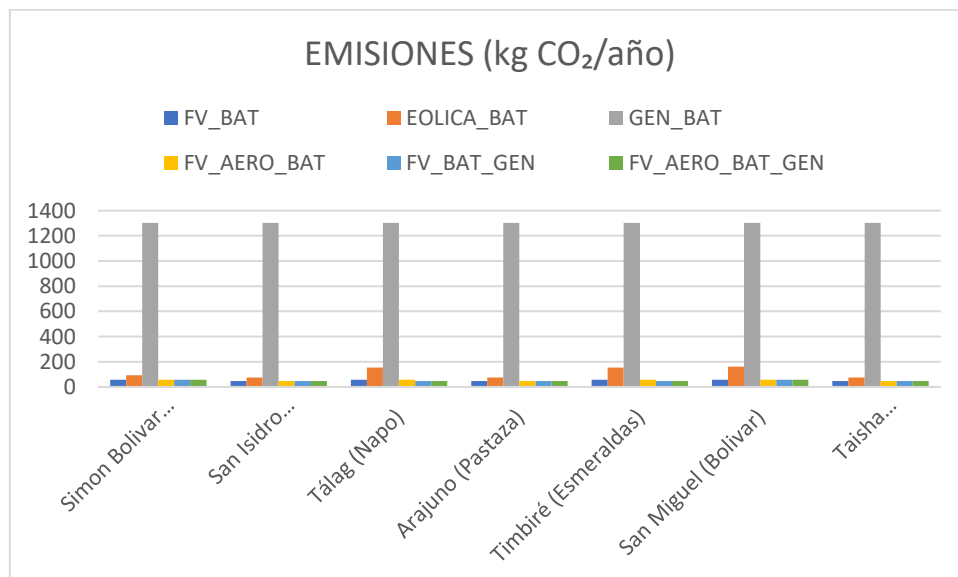


Gráfico 20. Emisiones. Fuente: iHOGA

En cuanto a costes de energía y emisiones se observa en los Gráficos 19 y 20, que no es una opción elegir los sistemas eólica con batería y generador AC con batería, ver Anexos 6 y 7.

Es importante mencionar que todo el proyecto se utilizó baterías de Plomo Ácido para las simulaciones, el contemplar baterías más eficientes como las de Litio conllevaría a obtener el doble del coste total por el alto precio que ahora estas se encuentran en el mercado, para utilizar baterías de Litio en este proyecto estas deberían reducir su precio 4 veces para competir con las baterías de Plomo Ácido en cuanto a precio, actualmente en el mercado las baterías de Litio con similares especificaciones de las que se utilizó en el proyecto están por un valor 940€ y 1400€. Técnicamente sería más eficiente utilizar las baterías de Litio ya que estas tienen mejores prestaciones.

9 Análisis de Sensibilidad

Debido a que uno de los objetivos es buscar la solución más viable se busca también obtener posibles soluciones a futuro por lo tanto se ha optado por realizar un análisis de sensibilidad a los casos estudiados específicamente sobre la solución óptima previamente realizada. Se modificará las variables que pueden influir en un cambio del resultado final. Las variables que se tomarán en cuenta para el análisis de sensibilidad son, el precio de componentes (paneles fotovoltaicos, baterías, generadores AC y aerogeneradores), básicamente solo esta variable precios se analizara para reducir costes para las viviendas rurales pobres y de cobertura cero electricidad.

9.1 Análisis de sensibilidad Consumo

ANALISIS DE SENSIBILIDAD CONSUMO (€)							
	Simon Bolivar (Santa Elena)	San Isidro (Morona Santiago)	Tálag (Napo)	Arajuno (Pastaza)	Timbiré (Esmeraldas)	San Miguel (Bolívar)	Taisha (Morona Santiago)
Consumo 0%(1,15kWh)	5706,1	4889,1	5179,6	4893,6	5179,6	4747,1	4889,1
Consumo 20%(1,38kWh)	5706	4894	5180	4894	5180	5561	4894
Consumo 50%(1,73kWh)	5706	4918	5200	7104	5200	6239	4918
Consumo 100%(2,31kWh)	5766	0	7288	0	7288	0	0

Tabla 6. VAN del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad consumo. Fuente: iHOGA

Se realizó el análisis de consumo con el objetivo de saber hasta cuanto el sistema óptimo es competente si se aumenta el consumo por cualquier circunstancia. La Tabla 6 muestra el VAN del sistema óptimo tras elevar el consumo de un determinado porcentaje, revelando que en la mayoría de localidades no se puede abastecer la demanda de consumo (valores “0”) al doblar el consumo base (1,15kWh), mientras que en todos los casos si se sobre pasa el consumo un 20% del consumo base el caso óptimo está preparado para afrontar dicho aumento sin alterar el coste total y el dimensionado de los componentes.

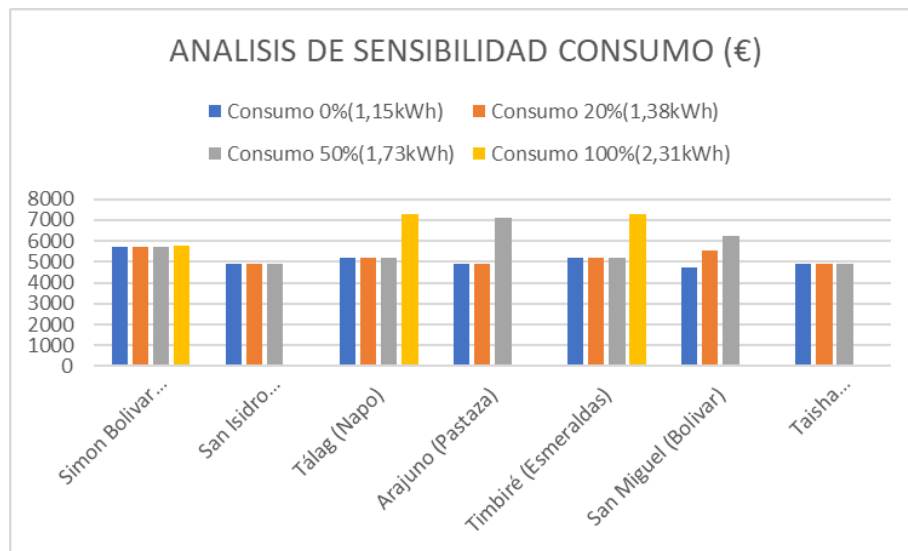


Gráfico 21. VAN del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad consumo. Fuente: iHOGA

9.2 Análisis de sensibilidad Precios Componentes

En los últimos años se ha evidenciado que los paneles fotovoltaicos se han ido abaratado de manera continua al igual que las baterías, aunque estas en menor medida. Hoy en día un panel fotovoltaico cuesta del orden del 80 % menos que hace sólo cinco años para dar la misma energía, y se prevé que los costes sigan bajando en otro 50 % hasta 2020 [21]. Como en ninguno de los casos está presente el aerogenerador como componente del sistema óptimo el análisis de precios se realizará reduciendo el precio de los componentes principales del sistema óptimo (paneles y baterías) a un 20% y 80 % de sus precios iniciales respectivamente.

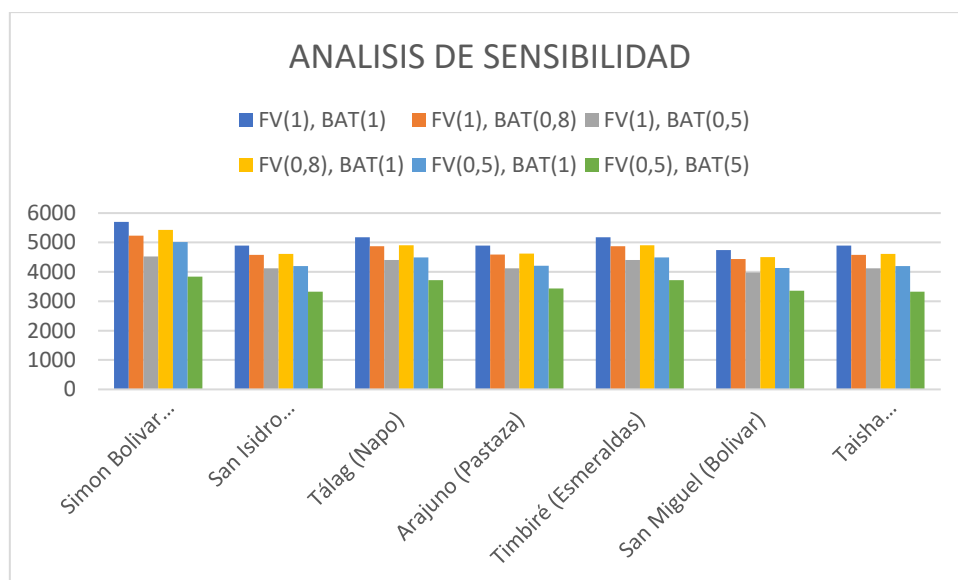


Gráfico 22. VAN del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad precios. Fuente: iHOGA

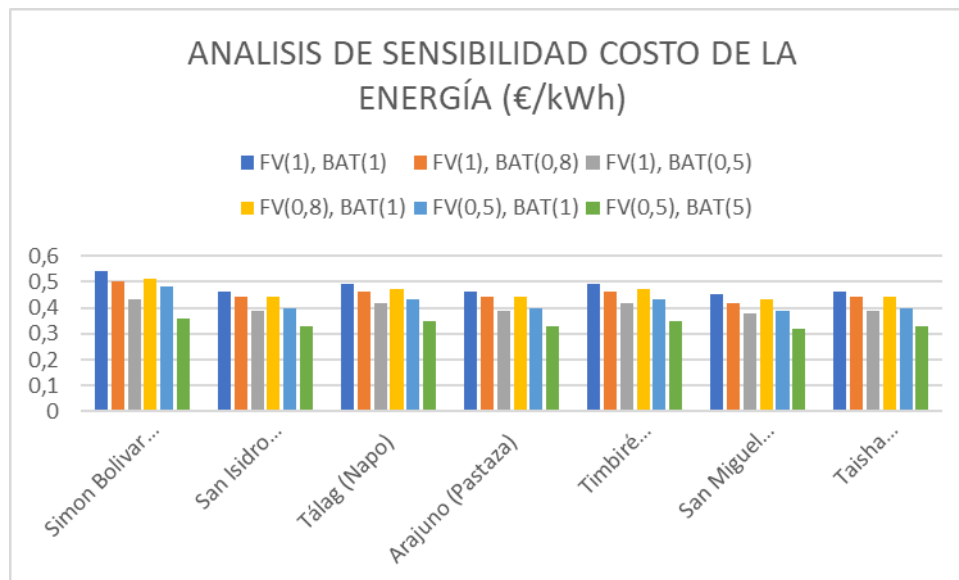


Gráfico 23. Coste de la energía del sistema óptimo. Análisis de sensibilidad coste de la energía precios. Fuente: iHOGA

Se evidencia que el coste total disminuye considerablemente cuando el precio se reduce al 50% en los paneles y baterías, otra mejoría de coste total es cuando solamente las baterías se reducen al 50% y esto es porque como se mencionó anteriormente estas aun no tienen una reducción considerable en el mercado y a su vez es el componente más costoso después del aerogenerador. De la misma manera en el Gráfico 23 nos indica que, al reducir el precio de los componentes principales a la mitad, el costo de la energía por kWh llegando en uno de los casos a 0,32€/kWh en la localidad de San Miguel, ver Anexo 9.

10 Conclusiones

- Entre los objetivos que se plantearon al inicio de este proyecto está la evaluación de distintos casos con diferentes localizaciones para encontrar un caso óptimo. Como solución óptima para las diferentes localizaciones se ha obtenido un sistema fotovoltaico-baterías y en dos de las localizaciones fotovoltaico-baterías con apoyo de un generador AC. En aquellos casos donde encontramos el generador AC supone una leve reducción significativa en el coste del sistema siempre y cuando éste funcione pocas horas al año o simplemente esté como apoyo de emergencia ya que no se necesita de baterías tan grandes como las del sistema fotovoltaico-baterías para asegurar la autonomía impuesta según sea la localización.
- La estrategia energética de seguimiento de la demanda, es importante para este proyecto ya que se producirá energía en la cantidad que lo demande el consumo y así evitar exceso de energía. Aun así, es complicado que durante los meses de mayor radiación solar no se produzca un exceso energético.
- Por otro lado, en cuanto a los sistemas aerogenerador-baterías y generador AC-baterías, queda descartado como único sistema de generación debido a su elevado coste.
- Es recomendable hacer una inversión inicial mayor e invertir en el sistema fotovoltaico con acumuladores, para así evitar pagar por un consumo excesivo de combustible y además evitar las emisiones de CO₂ que esto conlleva.
- En el análisis de sensibilidad, se concluye que la disminución del precio de los componentes principales al 50% conlleva a una reducción significativa del coste de la inversión. En concreto, supone un ahorro aproximado en VAN del 30% en todas las localidades. Es importante mencionar que si las baterías se reducen al 50% ya representa un ahorro significativo.
- La velocidad del viento en las localidades estudiadas es demasiado baja. Si la velocidad del viento fuese suficientemente alta y los aerogeneradores tuviesen un precio inferior, el aerogenerador sería parte de la solución óptima, provocando una reducción de la potencia fotovoltaica disminuyendo el coste total.
- El sistema que menor exceso energético produce es el fotovoltaico-baterías y generador AC ya que reduce la capacidad de generación energética a cambio de poner en funcionamiento el generador AC exclusivamente cuando sea necesario evitando así sobredimensionar el sistema, o solamente tenerlo en cuanta en casos de apoyo sin operarlo. Evitar en lo posible el exceso de energía es una práctica recomendable a la hora de diseñar cualquier sistema de generación energética debido a que el exceso energético no produciría ningún beneficio.
- El valor del coste total es el que definirá el caso óptimo para el proyecto independientemente de los componentes que se utilicen.
- Los resultados de coste de la energía (€/kWh) comparando con los precios actuales del coste de la energía en Ecuador son muy elevados, ya que este es subsidiado por el estado (siendo el coste de 0,04\$ el kWh). En los casos en que se tenga acceso a la red eléctrica lo óptimo es utilizar directamente la red de lo contrario al no tener acceso a la red lo más viable es trabajar con proyectos de optimización renovable.

11 Referencias

- [1] Banco Mundial, «Seguimiento del ODS7,» [En línea]. Available: bancomundial.org.
- [2] A. Agencia de Regulación y Control de Electricidad, «Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2018,» Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), Quito, 2018.
- [3] El Universo, «Energía solar se abre terreno en Ecuador,» 10 06 2017. [En línea]. Available: <https://www.eluniverso.com/tendencias/2017/06/10/nota/6222868/energia-solar-se-abre-terreno-ecuador>.
- [4] R. Dufo-Lopez, «iHOGA,» [En línea]. Available: ihoga.unizar.es/descarga/.
- [5] «Informe de Balance Nacional de Energía,» Agencia de Regulación y Control de Electricidad, Septiembre 2016.
- [6] «Ministerio Cordinador de Sectores Estratégicos,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/enernorte/images/PDF/Supleok.pdf>.
- [7] J. Cevallos Sierra y . J. Ramos Martin, «Evaluación espacial del potencial de las energías renovables: el caso de Ecuador,» Enero 2018.
- [8] CONELEC, «Estadísticas del Sector Eléctrico Ecuatoriano año 2014,» Quito - Ecuador, 2015.
- [9] CONELEC, «Plan Maestro de Electrificación CONELEC 2013 - 2022,» Quito - Ecuador, 2013.
- [10] J. Lata García, F. Jurado y L. M. Fernán, «Ubicación óptima de la turbina hidrocínética y análisis tecnoeconómico de un sistema híbrido basado en energía fotovoltaica».
- [11] H. Mamaghani y S. A. Avella Esca, «Viabilidad tecnoeconómica de los sistemas de electrificación fotovoltaica, eólica, diésel e híbrida para la electrificación rural fuera de la red en Colombia,» Noviembre 2016.
- [12] L. E. Urdiales Flores, «PROCEDIMIENTO PARA LA ELECTRIFICACIÓN EN ZONAS AISLADAS: CASO CANTÓN TAISHA, MORONA,» Cuenca - Ecuador, Enero 2015.
- [13] J. P. Viteri, F. Enao, J. Cherni y I. Dyner, «Optimizando la inserción de energía renovable en las regiones aisladas de Colombia,» *ScienceDirect*, Octubre 2019.
- [14] «Transformando nuestro mundo: la agenda 2030 para el desarrollo sostenible,» *Naciones Unidas*, pp. 1 -35, 2015.
- [15] L. Duque Torrecilla, «Análisis de sistemas aislados basados en fuentes renovables,» 2018.
- [16] J. C. Rojas, «"TESIS DOCTORAL". Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones,» Zaragoza, Noviembre 2012.
- [17] M. Gozalbes Sánchez, «"TFG"ESTUDIO COMPARATIVO DE TRES SISTEMAS AISLADOS DE DIFERENTE CONFIGURACIÓN,» Marzo 2015.
- [18] S. Pfenninger y I. Staffell, «Simulaciones de producción de energía,» [En línea]. Available: <https://www.renewables.ninja>.
- [19] Ingeniería Verde, «Innova Home,» [En línea]. Available: <https://www.ingenieriaverde.org/productos-2/>.
- [20] «Global Petrol Prices,» [En línea]. Available: <https://es.globalpetrolprices.com/>.

- [21] «monsolar,» [En línea]. Available: <https://www.monsolar.com/blog/la-energia-solar-fotovoltaica-sin-primas-ya-es-rentable/>.
- [22] Banco Mundial, «Banco Mundial,» [En línea]. Available: <https://datos.bancomundial.org/>.