




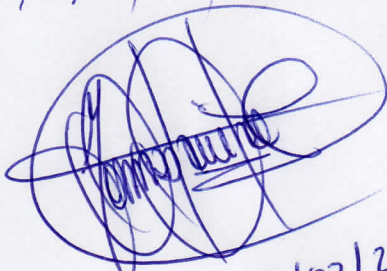
**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE UN SISTEMA  
HÍBRIDO SOLAR EÓLICO MEDIANTE MODELADO Y  
SIMULACIÓN PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN LA ZONA RURAL  
DE ATAHUALPA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES. Carlos Daniel Romero Vélez  
TUTOR. Nino Tello Vega Ureta

Guayaquil - Ecuador  
2025

  
12/02/2026  
  
18/02/26

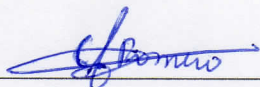
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Carlos Daniel Romero Vélez** con documento de identificación N° **0923725014** manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 12 de febrero del año 2026

Atentamente,



---

Carlos Daniel Romero Vélez  
0923725014

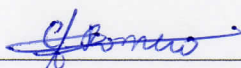
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, **Carlos Daniel Romero Vélez** con documento de identificación N° **0923725014** expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del **Dispositivo TECNOLÓGICO: ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE UN SISTEMA HÍBRIDO SOLAR EÓLICO MEDIANTE MODELADO Y SIMULACIÓN PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN LA ZONA RURAL DE ATAHUALPA**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 12 de febrero del año 2026

Atentamente,



---


Carlos Daniel Romero Vélez  
0923725014

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Nino Tello Vega Ureta**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE UN SISTEMA HÍBRIDO SOLAR EÓLICO MEDIANTE MODELADO Y SIMULACIÓN PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN LA ZONA RURAL DE ATAHUALPA**, realizado por **Carlos Daniel Romero Vélez** con documento de identificación N° **0923725014** obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 12 de febrero del año 2026

Atentamente,



---

Ing. Nino Tello Vega Ureta, Mg.

0801602160

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mi madre Zoila Isabel Vélez Contreras, la cual es el pilar fundamental para poder realizar y culminar mi proceso educativo en la universidad, gracias a ella, a su esfuerzo, sacrificio y paciencia dedico mi trabajo de titulación, a ella que gracias a como me educo y me crio soy el hombre que soy, a mi tía Blanca Rosario Vélez Contreras, la cual mas que una tía es mi segunda madre, que me a demostrado con acciones que soy un hijo mas y que soy el menor de sus hijos y me siento muy bendecido por ser uno mas de sus hijos, a mi prima Génesis Michelle Ladinez Vélez, la cual considero mi hermana y una de las mujeres que mas admiro y quiero en mi vida, mi hermana es la mujer mas inteligente, dedicada y con un gran corazón que conozco y me siento muy agradecido y bendecido de que sea mi hermana, a mi primo Alexis Ramón Ladinez Vélez, el cual es mi hermano mayor y aparte de eso es mi ejemplo a seguir, y como siempre lo digo, quiero poder ser igual o mejor hijo, persona, hermano de lo que es el , es la persona con el corazón mas sincero y la persona que admiro en mi vida, directa o indirectamente gracias a el soy el hombre que soy ahora porque al ver su ejemplo de como es como persona aspiro a ser igual o mejor, este trabajo de titulación se lo dedico a ellos que admiro y siempre me han apoyado.

**Carlos Daniel Romero Vélez**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, a mi madre por apoyarme y guiarme en todo momento, por su amor y paciencia ante toda adversidad o problema que tuve en la universidad y siempre estar ahí para apoyarme incondicionalmente.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana, a todos los docentes que han estado en el proceso desde que ingrese a la universidad hasta cuando termine, a mis compañeros que me han apoyado e incentivado a seguir en momentos que no podía, agradezco a todos ellos.

**Carlos Daniel Romero Vélez**

## RESUMEN

En esta investigación se analizó el potencial que tiene un sistema híbrido solar-eólico para implementarlo en la zona rural de Atahualpa, en la provincia de Santa Elena, Ecuador. Usando datos reales de meteorología de NASA POWER (del año 2025) y un modelo hecho en MATLAB, se simuló el comportamiento hora por hora de un sistema con 20 kWp de paneles solares, 10 kW de aerogenerador y 30 kWh de baterías, pensado para cubrir la demanda típica de una vivienda rural en la costa (alrededor de 18 kWh al día).

Los resultados indican que el sistema produce al año 4.619 kWh de energía solar y 7.639 kWh de eólica, sumando en total 12.258 kWh de fuentes renovables. La autonomía energética llega al 71,77 % en promedio, y el estado de carga de las baterías (SOC) se mantiene casi siempre por encima del 40 %, con picos altos en los meses de más sol. El costo nivelado de la energía (LCOE) sale en 0,08 USD/kWh, que es más bajo que la tarifa residencial rural subsidiada, y la inversión inicial (CAPEX) ronda los 75.700 USD.

En conclusión, este sistema híbrido sí es viable técnica y económicamente para electrificar casas aisladas en Atahualpa, aprovechando bien la combinación de sol y viento que hay en la zona. Además, los planos 2D y 3D en AutoCAD y Blender, junto con las visualizaciones en Power BI, ayudaron a encontrar las mejores coordenadas para instalarlo, destacando la parte con más viento en  $-2,3350^{\circ}$  S,  $-80,7850^{\circ}$  O.

**Palabras claves:** sistema híbrido solar-eólico, Atahualpa, simulación en MATLAB, electrificación rural, energías renovables, viabilidad técnica y económica.

## ABSTRACT

This research analyzes the energy potential of a hybrid solar-wind system for implementation in the rural area of Atahualpa, in the province of Santa Elena, Ecuador. Using real meteorological data from NASA POWER (year 2025) and a model developed in MATLAB, the hourly behavior of a system consisting of 20 kWp solar panels, a 10 kW wind turbine, and 30 kWh battery storage was simulated. The system was designed to meet the typical daily demand of a coastal rural household (approximately 18 kWh/day).

The results show that the system generates 4,619 kWh of solar energy and 7,639 kWh of wind energy annually, totaling 12,258 kWh from renewable sources. The average energy autonomy reaches 71.77 %, with the battery state of charge (SOC) remaining mostly above 40 % throughout the year and peaking higher during sunnier months. The levelized cost of energy (LCOE) is estimated at 0.08 USD/kWh, which is lower than the subsidized rural residential tariff, while the initial investment (CAPEX) is around 75,700 USD.

In conclusion, this hybrid system proves to be technically and economically viable for electrifying isolated homes in Atahualpa, effectively leveraging the local complementarity of solar and wind resources. Additionally, 2D and 3D plans created in AutoCAD and Blender, along with Power BI visualizations, helped identify the optimal installation coordinates, particularly highlighting the windier area at  $-2.3350^{\circ}$  S,  $-80.7850^{\circ}$  O.

**Keywords:** hybrid solar-wind system, Atahualpa, MATLAB simulation, rural electrification, renewable energies, technical and economic feasibility.

## ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>Introducción</b>	1
<b>II.</b>	<b>Problema</b>	2
<b>III.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	3
<b>IV.</b>	<b>Objetivos</b>	4
	IV-A. Objetivo general	4
	IV-B. Objetivos específicos	4
<b>V.</b>	<b>Marco Teórico</b>	5
	V-A. Energía Renovable y Acceso Rural . . . . .	5
	V-B. Fundamento de Energías Renovables . . . . .	5
	V-C. Sistemas Híbridos Solar-Eolico	8
	V-D. Sistemas de Almacenamiento y Conversión:	10
	V-E. Modelado y Simulación	12
	V-F. Componentes básicos de un sistema híbrido:	12
	V-G. Simulación de sistemas energéticos	13
	V-H. Software mas utilizados:	13
	V-I. . . . .	13
	V-J. El analisis a traves de estas plataformas permite: . . . . .	14
	V-K. Factores que afectan el rendimiento del sistema	15
	V-L. Aplicación en Zonas Rurales	15
	V-M. Herramientas de Modelado y Visualización en el Estudio . . . . .	16
	V-N. Potencial Energético Específico en Atahualpa . . . . .	17
	V-Ñ. Contexto Geográfico y Normativo . . . . .	19
	V-O. Datos geográficos y topográficos . . . . .	19
	V-P. Explicación del Simulador en el Contexto de Atahualpa	20
	V-Q. Marco Normativo en Ecuador . . . . .	21
	V-R. Antecedentes y Estado del Arte	21
<b>VI.</b>	<b>Marco Metodológico</b>	26
	VI-A. Tipo y enfoque de investigación	26

VI-B.	Diseño de investigación . . . . .	26
VI-C.	Area de estudio 26	
VI-D.	Población y muestra 26	
VI-E.	VARIABLES de estudio 27	
VI-F.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos 27	
VI-G.	Procedimiento Metodológico 28	
VI-H.	Selección de MATLAB para la simulación del sistema híbrido solar-eólico 34	
	VI-H1. MATLAB (programación en scripts) 34	
	VI-H2. Comparación con otras herramientas 35	
VI-I.	Programa y Datos 37	
<b>VII.</b>	<b>Resultados</b> 42	
	VII-A. Simulación energética de energía renovable híbrida en la zona rural Atahualpa 42	
	VII-B. Simulador 42	
	VII-B1. variables a ingresar en el simulador . . . . .	42
VII-C.	Recursos obtenidos al ejecutar el software de simulación 44	
VII-D.	Resultados Energéticos 45	
VII-E.	Visualización en POWER BI 49	
VII-F.	Plano 2d de la zona rural Atahualpa 50	
VII-G.	Visualización en 3D de la zona rural Atahualpa 50	
VII-H.	Análisis de coordenadas 51	
<b>VIII.</b>	<b>Cronograma</b>	53
<b>IX.</b>	<b>Presupuesto</b>	55
<b>X.</b>	<b>Conclusiones</b>	56
<b>XI.</b>	<b>Recomendaciones</b>	57
	<b>Referencias</b>	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Energia Renovable [8]. . . . .	5
2.	Efecto fotovoltaico[11]. . . . .	5
3.	Efecto fotovoltaico [11]. . . . .	6
4.	Curv de Potencia [15]. . . . .	6
5.	Ley de Betz. [10]. . . . .	7
6.	Velocidad del viento en Santa Elena. [16]. . . . .	7
7.	Radiación solar. [11] . . . . .	8
8.	Sistema Hibrido(solar-eolico) [9]. . . . .	8
9.	Off-grid [9]. . . . .	9
10.	Conexion hibrida [9]. . . . .	9
11.	sistema híbrido [22]. . . . .	10
12.	Proceso de carga de baterias [5]. . . . .	11
13.	Comparativa de baterias [26]. . . . .	11
14.	Regulador de carga [25]. . . . .	12
15.	Modelado estocástico [28]. . . . .	12
16.	componentes [13]. . . . .	13
17.	programas [29]. . . . .	14
18.	programas [30]. . . . .	14
19.	programas [31]. . . . .	15
20.	programas [32]. . . . .	16
21.	zona rural atahualpa [32]. . . . .	16
22.	blender [31]. . . . .	17
23.	zona rural atahualpa [27]. . . . .	17
24.	radiación santa elena [35]. . . . .	18
25.	velocidad de el viento [35]. . . . .	18
26.	nasa power [31]. . . . .	19
27.	Perfil de carga diaria típica en vivienda rural costera (picos diurnos por ventiladores y bombeo) . . .	21
28.	Proyecto fotovoltaico EL AROMO . . . . .	22
29.	Parque eólico Villanoco . . . . .	22
30.	. . . . .	23
31.	. . . . .	24
32.	DIAGRAMA DE FLUJO [9]. . . . .	25
33.	. . . . .	27
34.	. . . . .	27
35.	obtenemos los datos históricos de radiación y velocidad gracias a los datos generados por NASA POWER	28
36.	datos generados por NASA POWER . . . . .	29
37.	Proceso en MATLAB . . . . .	29
38.	visualización de coordenadas de estudio en POWER BI . . . . .	30
39.	variables reales para el análisis de la simulación, matlab . . . . .	33
40.	Plano 2D autocad . . . . .	33
41.	Plano 3D Blender . . . . .	34
42.	Datos de entrada . . . . .	37
43.	archivo NASA POWER . . . . .	38
44.	Parametros Tecnicos . . . . .	38
45.	Calculo de Potencia . . . . .	39
46.	Perfil de Carga . . . . .	39
47.	Simulación de baterías . . . . .	39
48.	Resultados . . . . .	40
49.	Graficos . . . . .	40

50.	Análisis Mensual del ESTADO DE CARGA . . . . .	41
51.	Análisis Económico . . . . .	41
52.	Pantalla didáctica . . . . .	42
53.	Datos NASA POWER . . . . .	43
54.	DATOS GUIDE . . . . .	43
55.	Simulación Híbrida . . . . .	44
56.	Desglose mensual del CAPEX . . . . .	44
57.	Análisis Económico . . . . .	44
58.	Análisis Económico . . . . .	45
59.	SOC primeras horas en atahualpa . . . . .	46
60.	SOC periodo completo en Atahualpa . . . . .	46
61.	SOC promedio por mes en Atahualpa . . . . .	47
62.	Irradiación solar total en Atahualpa . . . . .	48
63.	Velocidad del viento total en Atahualpa . . . . .	48
64.	Desglose porcentual de costos iniciales en Atahualpa . . . . .	49
65.	Visual topográfico de zona rural Atahualpa . . . . .	49
66.	Visual 2D de zona rural Atahualpa . . . . .	50
67.	Visual 3D de zona rural Atahualpa . . . . .	50
68.	cronograma . . . . .	53

## ÍNDICE DE TABLAS

I.	Comparativa de baterías. . . . .	11
II.	Comparativa de perfiles de carga eléctrica residencial en Ecuador. Fuentes: ARCONEL/Primicias 2023, estimaciones locales Santa Elena 2015.[33] . . . . .	20
III.	Potencial renovable en Atahualpa y Santa Elena.[11], [16] . . . . .	21
IV.	Comparación resumida de herramientas para simulación de sistemas híbridos renovables . . . . .	36
V.	Resultados de la simulación del sistema híbrido solar-eólico en 20 puntos seleccionados de la zona rural de Atahualpa (Santa Elena, Ecuador). . . . .	52
VI.	Cronograma . . . . .	54

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, Ecuador vive una situación contradictoria en materia energética. Por un lado, el país cuenta con un gran potencial en fuentes renovables —solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica— que podría permitir agregar hasta 25 GW de capacidad adicional, sobre todo en las regiones andinas y costeras. Por otro lado, miles de comunidades rurales todavía carecen de un acceso confiable a la electricidad, con cifras cercanas al 6 por ciento de la población rural sin suministro adecuado, según datos recientes.

Esta brecha es especialmente visible en la provincia de Santa Elena, y más concretamente en la parroquia rural de Atahualpa. La dispersión geográfica, la distancia de la red eléctrica nacional y la dependencia histórica de generadores diésel o combustibles fósiles frenan el desarrollo socioeconómico, la educación, la salud y la actividad agrícola de la zona.

Aunque en los últimos años se han avanzado con instalaciones fotovoltaicas individuales —más de 912 sistemas que han beneficiado a unas 2.700 personas hasta 2024—, estas soluciones aisladas no siempre logran garantizar un suministro continuo ni suficiente, sobre todo cuando la demanda crece o el clima varía.

En este contexto, los sistemas híbridos solar-eólicos combinados con almacenamiento en baterías se presentan como una opción técnica y económicamente viable. Al aprovechar la alta radiación solar de la costa junto con los vientos moderados que soplan en zonas elevadas o abiertas de Santa Elena, estos sistemas ofrecen una generación más estable y predecible que las instalaciones de una sola fuente, reducen la dependencia de la red extendida, disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> y fortalecen la autonomía energética de las comunidades.

El presente trabajo de titulación tiene como propósito evaluar de forma cuantitativa el recurso renovable disponible en la zona rural de Atahualpa. Para ello se utilizan datos climáticos reales de NASA POWER, se realiza el modelado matemático de la generación fotovoltaica y eólica, se simula hora a hora el balance energético con perfiles de carga representativos y se analiza la autonomía del sistema con baterías. El objetivo principal es ver si es viable—desde un punto de vista técnico, energético y económico—instalar un sistema híbrido (total o parcialmente autónomo) diseñado para cubrir las necesidades de una casa o comunidad rural pequeña. Esto ayuda a cumplir el objetivo nacional de electrificación sostenible y el ODS 7 de la ONU, que busca energía asequible y limpia para todos.

Esta investigación busca servir de base sólida para futuros proyectos en Atahualpa y zonas parecidas. La idea es impulsar la adopción de tecnologías renovables, de esas que no dependen de la red eléctrica central, y así conseguir un desarrollo más inclusivo y fuerte en el campo ecuatoriano.

## II. PROBLEMA

En la parroquia rural de Atahualpa, ubicada en la provincia de Santa Elena, muchas familias y pequeñas comunidades siguen enfrentando serias dificultades para contar con un suministro eléctrico estable y confiable[1]. Aunque el país ha avanzado en la expansión de la red nacional y en la instalación de paneles solares individuales —con más de 900 sistemas fotovoltaicos distribuidos que han beneficiado a unas 2.700 personas en la zona hasta fechas recientes[1], todavía persiste una brecha importante: alrededor del 6 por ciento de la población rural ecuatoriana no tiene acceso adecuado a la electricidad, y en áreas dispersas como Atahualpa esta cifra puede ser mayor debido a la lejanía de las líneas de distribución principales[2].

Las soluciones actuales, como generadores a diésel o sistemas solares aislados sin respaldo suficiente, presentan varios inconvenientes graves[1]. Los generadores dependen de combustible fósil caro y contaminante, requieren mantenimiento constante y no siempre están disponibles en zonas remotas[1]. Por su parte, las instalaciones fotovoltaicas individuales funcionan bien durante el día, pero fallan en la noche o en días nublados, lo que limita su uso para actividades esenciales como iluminación, refrigeración de alimentos, bombeo de agua, educación a distancia o atención médica básica[3]. Esto afecta directamente el desarrollo socioeconómico: reduce la productividad agrícola, dificulta el estudio nocturno de niños y jóvenes, aumenta riesgos en la salud y frena el crecimiento de microempresas locales[3].

Además, la alta radiación solar de la costa ecuatoriana se combina con vientos moderados en ciertas zonas elevadas o abiertas de la parroquia, lo que crea un potencial interesante para sistemas híbridos, pero que hasta ahora no se ha aprovechado de forma integral[2]. La ausencia de soluciones combinadas (solar + eólico + almacenamiento) deja a las comunidades vulnerables a interrupciones frecuentes, altos costos operativos y dependencia de combustibles externos, en un momento en que el país busca transitar hacia una matriz energética más limpia y descentralizada[2].

En resumen, el problema central radica en la falta de un sistema energético renovable híbrido, adaptado a las condiciones locales de Atahualpa, que garantice suministro continuo, reduzca emisiones y sea económicamente viable para viviendas o grupos pequeños en el ámbito rural[4]. Sin esta alternativa, se perpetúa la inequidad energética y se limita el cumplimiento de metas nacionales de electrificación sostenible y del ODS 7 (energía asequible y no contaminante)[5].

### III. JUSTIFICACIÓN

Realizar este análisis del potencial energético de un sistema híbrido solar-eólico en la zona rural de Atahualpa responde a una necesidad real y urgente en el contexto ecuatoriano. Aunque el país dispone de un enorme recurso renovable con capacidad estimada para incorporar hasta 25 GW adicionales de fuentes limpias, especialmente en la costa y los Andes, miles de familias en áreas dispersas siguen sin acceso confiable a la electricidad.

En provincias como Santa Elena, y particularmente en parroquias rurales como Atahualpa, la lejanía de la red nacional, los altos costos de extensión de líneas y la dependencia de generadores diésel generan inequidad, limitan el desarrollo y frenan oportunidades en educación, salud y productividad agrícola.

Las soluciones implementadas hasta ahora, como paneles solares individuales (más de 900 sistemas instalados que han llegado a unas 2.700 personas en la zona), son un avance importante, pero no resuelven del todo el problema. Estos sistemas aislados producen bien durante el día, pero fallan cuando cae la noche o hay días nublados prolongados, lo que deja sin energía actividades esenciales como iluminación nocturna, refrigeración, bombeo de agua o uso de herramientas eléctricas. Aquí es donde los sistemas híbridos —que combinan paneles solares con turbinas eólicas pequeñas y almacenamiento en baterías— ofrecen una ventaja clara: aprovechan la alta irradiación solar típica de la costa (alrededor de 5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día en promedio) junto con vientos moderados en zonas abiertas o elevadas, logrando una generación más estable y predecible durante las 24 horas.

Estudiar y simular esta alternativa en Atahualpa no solo es técnicamente viable, sino también alineado con las prioridades nacionales. Ecuador busca transitar hacia una matriz energética más limpia y descentralizada, reducir emisiones de CO<sub>2</sub> y cumplir con el Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS 7 (energía asequible y no contaminante). Un sistema híbrido off-grid o semi-off-grid adaptado a viviendas o pequeñas comunidades rurales podría bajar los costos operativos a largo plazo, disminuir la dependencia de combustibles fósiles importados y fortalecer la resiliencia ante variaciones climáticas o fallas en la red.

Desde el punto de vista académico, esta investigación contribuye al campo de la mecatrónica aplicada a energías renovables: permite validar modelos matemáticos de generación, simular balances energéticos hora a hora en MATLAB y evaluar la autonomía con baterías bajo perfiles de carga reales de viviendas costeras rurales. Los resultados pueden servir como referencia técnica para futuros proyectos de implementación en Atahualpa y en otras zonas similares del país, promoviendo la adopción de tecnologías descentralizadas que impulsen un desarrollo más inclusivo, sostenible y equitativo en el ámbito rural ecuatoriano.

## IV. OBJETIVOS

### *IV-A. Objetivo general*

Analizar el potencial energético de un sistema híbrido solar-eólico mediante modelado y simulación en la zona rural de Atahualpa determinando su viabilidad técnica y capacidad de generación en diferentes escenarios de operación.

### *IV-B. Objetivos específicos*

- Caracterizar los recursos solares y eólicos disponibles en la zona rural de Atahualpa, a partir de datos meteorológicos históricos y fuentes especializadas, para la determinación de su potencial energético.
- Modelar un sistema híbrido solar-eólico utilizando software especializado, analizando su desempeño bajo distintos escenarios.
- Evaluar la viabilidad técnica del sistema, identificando la capacidad de generación, niveles de confiabilidad y posibles limitaciones para su futura implementación en zonas rurales.

## V. MARCO TEÓRICO

### V-A. *Energía Renovable y Acceso Rural*

Las energías renovables son fuentes de energía limpias e inagotables que provienen de la naturaleza misma, como la radiación solar, el viento, el agua en movimiento o el calor interno de la Tierra. En Ecuador, estas fuentes tienen un potencial enorme: según el Ministerio de Energía y Minas, el país podría sumar hasta 25 GW adicionales de capacidad renovable, principalmente en la costa (solar) y los Andes (hidroeléctrica y eólica)[6]. Sin embargo, la realidad en zonas rurales como Atahualpa (Santa Elena) es distinta: cerca del 6 por ciento de la población rural (unas 2.700 personas beneficiadas solo por 912 sistemas FV aislados hasta 2024) aún carece de electricidad confiable. Esto frena el desarrollo: sin luz nocturna, bombeo de agua o refrigeración, la agricultura (principal actividad en Atahualpa) y la educación se ven limitadas[7].



Figura 1: Energía Renovable [8].

### V-B. *Fundamento de Energías Renovables*

La radiación solar se desglosa en tres partes clave: la radiación directa, que es la luz del sol que arriba sin obstáculos atmosféricos; la difusa, que se esparce a través de nubes, partículas o gases; y el albedo, que es la radiación que rebota en superficies del planeta, como tierra, hielo o construcciones[9].

Estas partes definen cuánta energía solar total podemos usar para transformarla en electricidad. El efecto fotovoltaico es el hecho físico donde la luz del sol pega en una celda solar. Estas celdas suelen ser de silicio mezclado con cosas como boro (para una capa P) y fósforo (para una capa N), lo cual crea electricidad moviendo electrones. Edmond Becquerel descubrió esto en 1839, y es por esto que funcionan los paneles solares[10].

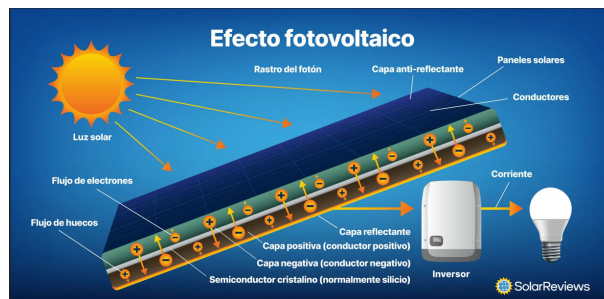


Figura 2: Efecto fotovoltaico[11].

Existen distintos modelos de paneles: los monocristalinos, que se sacan de un único cristal de silicio puro, logran un rendimiento de entre el 15 por ciento y el 22 por ciento, aunque salen más caros. Por otro lado, están los policristalinos, armados con varios cristales fundidos; estos rinden entre un 13 por ciento y 16 por ciento y son más baratos, pero no rinden tanto si no tienes mucho sitio donde ponerlos.[2]

Los conceptos básicos provienen de conocimiento estándar en física solar, pero para contextualizar en Ecuador, el Global Solar Atlas indica que la radiación global horizontal (GHI) promedio en Ecuador es de 4.574 kWh/m<sup>2</sup>/día, con componentes directos y difusos variando por región. En Santa Elena, la radiación solar es alta, con más de 5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día y 4.5 horas pico solares diarias, según un estudio en MDPI.[12]



Figura 3: Efecto fotovoltaico [11].

La clave de la energía eólica está en transformar la fuerza del viento (energía cinética) en movimiento mecánico. Esto ocurre cuando las palas de un aerogenerador giran un rotor que, al estar unido a un generador, crea la corriente eléctrica. Para saber cuánta potencia hay en el viento, usamos la expresión  $P = (1/2)\rho Av^3$ , donde intervienen la densidad del aire ( $\rho$ ), el área que cubren las palas ( $A$ ) y, lo más importante, la velocidad del viento ( $v$ ).[13]

Si analizamos la curva de potencia de estas máquinas, vemos que la producción sube junto con el viento hasta llegar a su punto nominal (casi siempre entre 12 y 15 m/s). De ahí en adelante, la energía se estabiliza hasta que, al alcanzar los 25 m/s (velocidad de corte), el equipo frena por completo para evitar daños y garantizar la seguridad.[14]

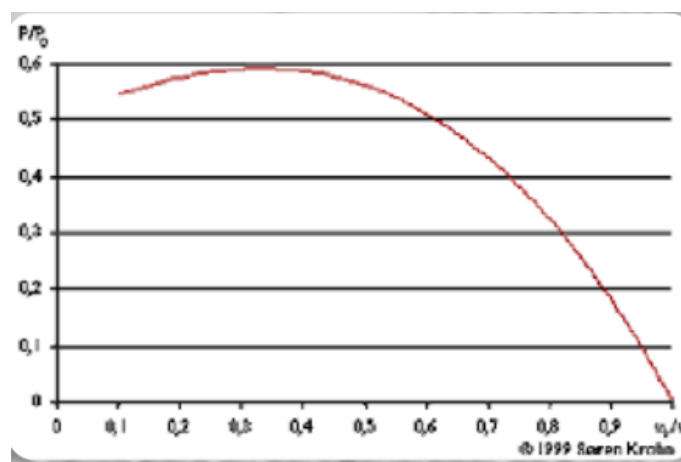


Figura 4: Curv de Potencia [15].

La Ley de Betz establece que ningún aerogenerador puede capturar más del 59.3 por ciento de la energía cinética del viento, debido a la deceleración del flujo de aire al pasar por las palas, derivada de principios de conservación de masa y momentum, como podemos observar en la imagen 5

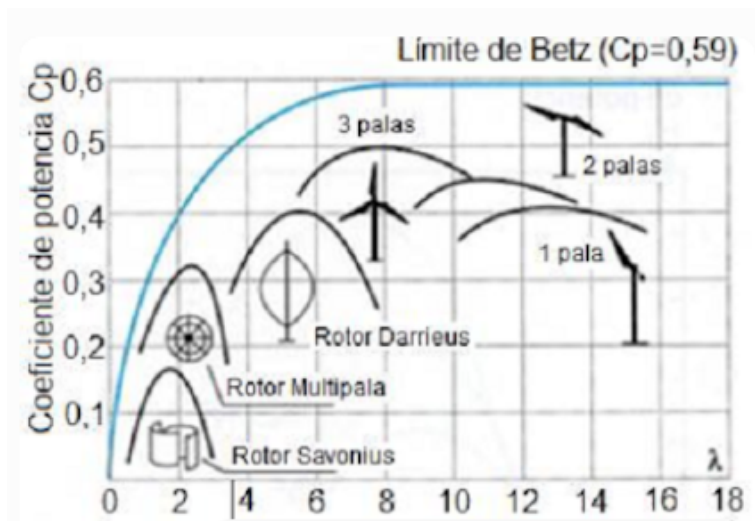


Figura 5: Ley de Betz. [10].

En zonas costeras de Ecuador, la velocidad del viento promedio es de 7 m/s a 80 m de altura en Santa Elena, según análisis de mercado eólico. La curva de potencia típica para un aerogenerador de 2 MW muestra corte inicial a 3-4 m/s y potencia máxima a 12 m/s, en la imagen 6 con respecto al viento en Santa Elena.



Figura 6: Velocidad del viento en Santa Elena. [16].

En Santa Elena, el brillo solar (radiación) promedia 5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día, con picos de 4.5-5.5 kWh/m<sup>2</sup>/día y 6-8 horas de sol directo, ideal para fotovoltaica. La velocidad del viento varía de 9-11.5 mph (4-5 m/s) en promedio anual, con máximos en octubre, y hasta 7 m/s en sitios costeros a altura de hub.[17]

Atlas Solar del Ecuador (Global Solar Atlas) confirma GHI de 1.817 kWh/m<sup>2</sup>/año en Santa Elena. Para viento, datos de Weatherspark y Mordor Intelligence indican vientos estacionales fuertes en costa, podemos observar en la imagen 7 la zona radiación solar en donde se realizara el estudio.

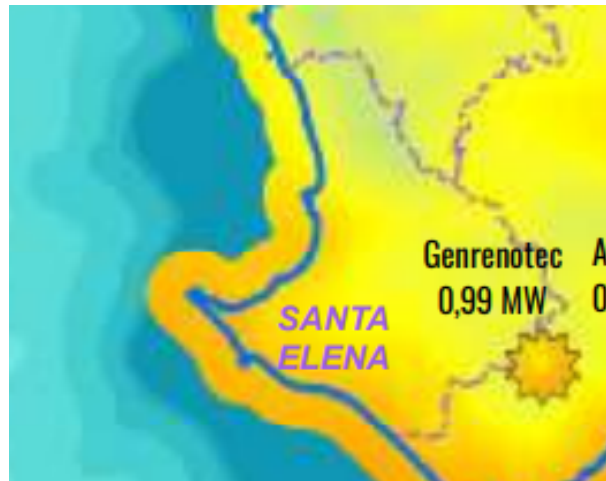


Figura 7: Radiación solar. [11]

### V-C. *Sistemas Híbridos Solar-Eolico*

Un sistema híbrido junta dos fuentes de energía principales: la solar fotovoltaica (PV) y la eólica. La gran ventaja es que se complementan: el sol pega más fuerte de día o en épocas secas, mientras que el viento suele soplar más de noche o cuando llueve. Esto ayuda a tener un suministro eléctrico mucho más estable y seguro [18][19]. En la imagen 32 se puede ver cómo es visualmente un sistema híbrido.

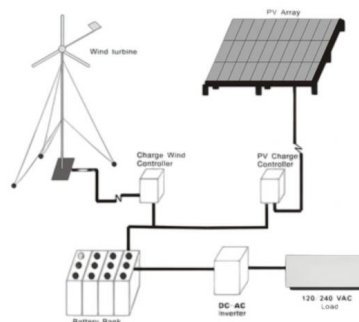


Figura 8: Sistema Híbrido(solar-eolico) [9].

Las microrredes funcionan como sistemas eléctricos locales. Generan, reparten y guardan su propia energía. Pueden operar de dos maneras: off-grid (solas, sin conexión a la red grande) o grid-connected (conectadas, compartiendo energía). El modo off-grid es perfecto para sitios rurales, tipo Atahualpa, donde la red nacional falla mucho[20]. En la imagen 9 tenemos de forma visual como es el ciclo off-grid para la zona donde vamos a generar el estudio.



Figura 9: Off-grid [9].

En la configuración que se muestra en la figura 10, el equipo de generación híbrida solar-eólica se arma con turbinas de viento, grupos de paneles solares, controladores inteligentes, baterías, inversores versátiles, cables, bases y otras piezas menores. El sistema usa el viento para generar electricidad cuando es de noche o llueve, y aprovecha el sol para los días despejados.[9][21].

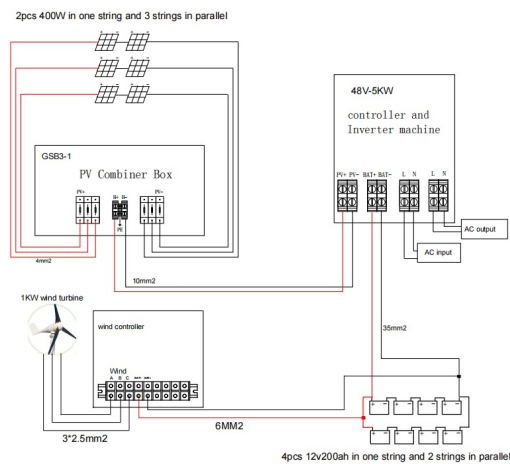


Figura 10: Conexion hibrida [9].

podemos ver el diagrama de cómo se conectan las partes del sistema híbrido. Se ve cómo todos los componentes se comunican: los paneles solares van a una caja de combinación PV, que a su vez se une al inversor y la máquina de control. De forma similar, el aerogenerador se conecta a un controlador eólico y de ahí, también al equipo central de inversión y control [9]. En la figura 11 se puede visualizar cómo es en forma real la implementación de un sistema híbrido, solar eólico.



Figura 11: sistema híbrido [22].

#### V-D. *Sistemas de Almacenamiento y Conversión:*

Si ponemos frente a frente las tecnologías para guardar energía, la distancia entre el plomo-ácido y el LiFePO<sub>4</sub> es, sinceramente, una locura en cuanto a cómo rinden en el día a día. Las baterías de plomo-ácido son bastante limitadas; te dan unos 500 o 1000 ciclos y, ojo, solo si no las bajas de la mitad de su carga (50 %).[23]

Por otro lado, con las de LiFePO<sub>4</sub> la cosa cambia: aunque pagues más al inicio, a la larga salen rentables porque aguantan hasta 5000 ciclos, incluso si las exprimes casi al 100 % de su capacidad (DoD). Un detalle que mucha gente olvida al armar estos sistemas es que, como son súper eficientes (95 %) y aguantan bien el calor, el costo real de la energía (LCOE) acaba siendo un 30 % más bajo. Al final, lo barato del plomo-ácido te termina saliendo caro.[9] A continuación se presenta la tabla I donde se puede ver lo que genera y cuál es la mejor opción entre los dos tipos, también tenemos la figura 12 en la cual podemos ver el proceso de carga de baterías, y en la figura 13 podemos ver la comparativa de las baterías las cuales podemos visualizar y comprender mejor cómo se comporta el estado de los 2 tipos de cargas [24].

Tabla I: Comparativa de baterías.

	Tipo	Ciclos	DoD
[25]	Plomo-Ácido	500-1000	50 %
	LiFePO4	2000-5000	80-100 %

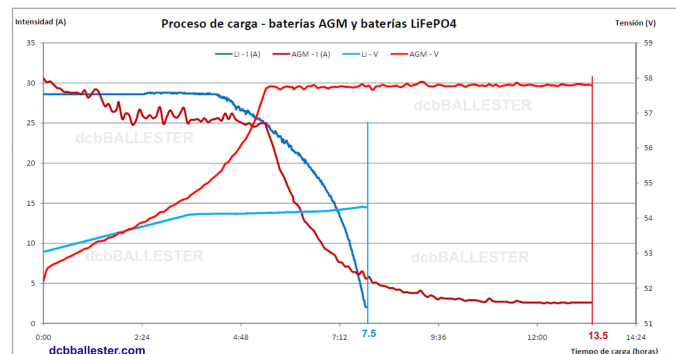


Figura 12: Proceso de carga de baterías [5].

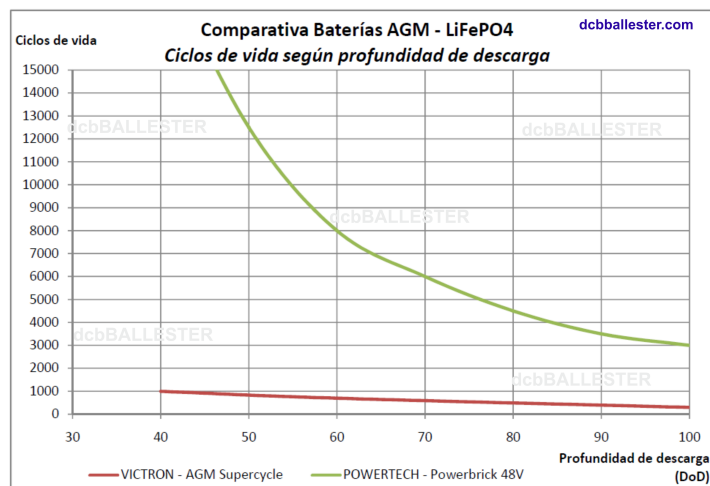


Figura 13: Comparativa de baterías [26].

Los inversores híbridos son el cerebro de los sistemas solares de hoy. No solo transforman la corriente directa (DC) de los paneles en alterna (AC) para usar en casa, sino que también manejan la energía en ambos sentidos: integran la red eléctrica y las baterías sin problemas.[25]

Para sacar el máximo de energía a los paneles, cada sistema usa un rastreador MPPT. Este componente clave va ajustando la resistencia del circuito para exprimir hasta la última gota de energía, aunque el clima cambie.[25]

Y cuando el sol no da abasto, entran los rectificadores. Estos convierten la energía de la calle (AC) otra vez en DC, asegurando que las baterías se carguen bien y sin riesgo.[25] Como se muestra en la figura 14, podemos ver la importancia del regulador en nuestro sistema de energía renovable solar.



Figura 14: Regulador de carga [25].

#### V-E. Modelado y Simulación

Como podemos ver en la figura 15 el modelado estocástico es esencial para manejar la variabilidad del sol y viento en Atahualpa, donde la radiación solar promedio 5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día pero fluctúa estacionalmente (picos en seco, mínimos en lluvioso), y el viento varía de 5-7 m/s con ráfagas impredecibles.[27]

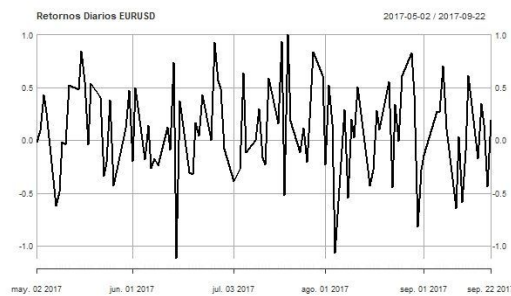


Figura 15: Modelado estocástico [28].

#### V-F. Componentes básicos de un sistema híbrido:

- **Paneles solares fotovoltaicos:** Convierten la radiación solar en electricidad.
- **Aerogeneradores:** transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica.
- **Controladores de carga:** Regulan la energía enviada a las baterías.
- **Baterías:** Almacenan energía para su uso cuando no hay producción.
- **Inversores:** Convierte la corriente continua (DC) en alterna (AC). [9]

Podemos observar en la figura 16 cuales son todos los componentes de un sistema de energía renovable híbrida(solar-eólica) y como van intercomunicados para su generación y optimo funcionamiento del sistema , desde la obtención de la energía renovable con respecto al y la velocidad del viento, como pasa por las baterías cargándolas, sigue al generador , hasta que llega a la casa, donde se va a utilizar toda la energía generada por el sistema.

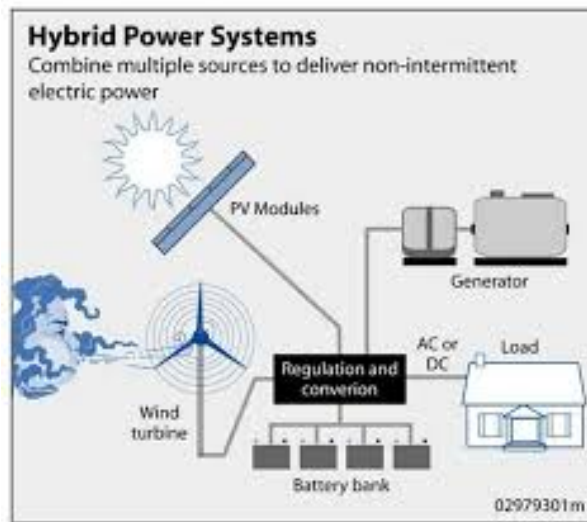


Figura 16: componentes [13].

#### V-G. Simulación de sistemas energéticos

La simulación es una herramienta fundamental en el diseño y evaluación de sistemas híbridos. Permite modelar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones climáticas, de carga y configuración técnica, optimizando así su diseño antes de su implementación.[28]

#### V-H. Software mas utilizados:

- **MATLAB:** Permite modelar dinámicamente los componentes eléctricos.
- **PV\*SOL y WindPRO:** Especializados en recursos solares y eólicos respectivamente.
- **BLENDER:** Herramienta de modelado 3D open-source para visualización espacial de sistemas híbridos, útil para simular colocación de aerogeneradores y paneles en terrenos irregulares.
- **AUTOCAD:** Software para diseño asistido por computadora, empleado en la creación de planos arquitectónicos y site plans que integran topografía local con instalaciones renovables.

#### V-I.

En este estudio, como se muestra en la figura 17 se utilizó Blender para crear un modelo 3D del sistema híbrido, permitiendo visualizar la colocación óptima de aerogeneradores y paneles solares en el terreno rural de Atahualpa, considerando factores como elevaciones y exposición al viento.[29]

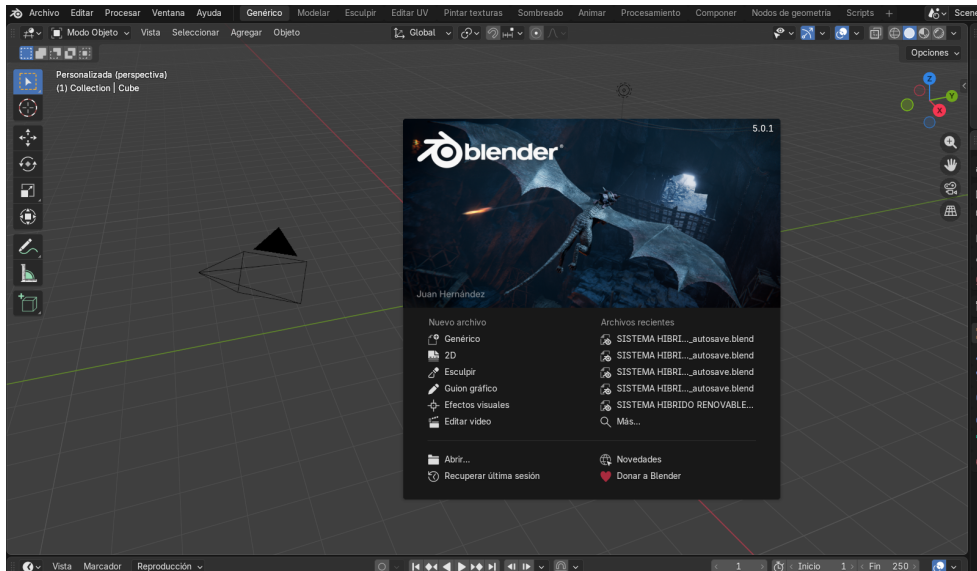


Figura 17: programas [29].

Como se puede ver en la figura 18, AutoCAD se empleó para elaborar un plano arquitectónico detallado, integrando coordenadas geográficas ( $-2.31^{\circ}$  S,  $-80.77^{\circ}$  O) y sectores específicos para instalaciones renovables, lo que facilita la planificación espacial y reduce riesgos de implementación.[30]

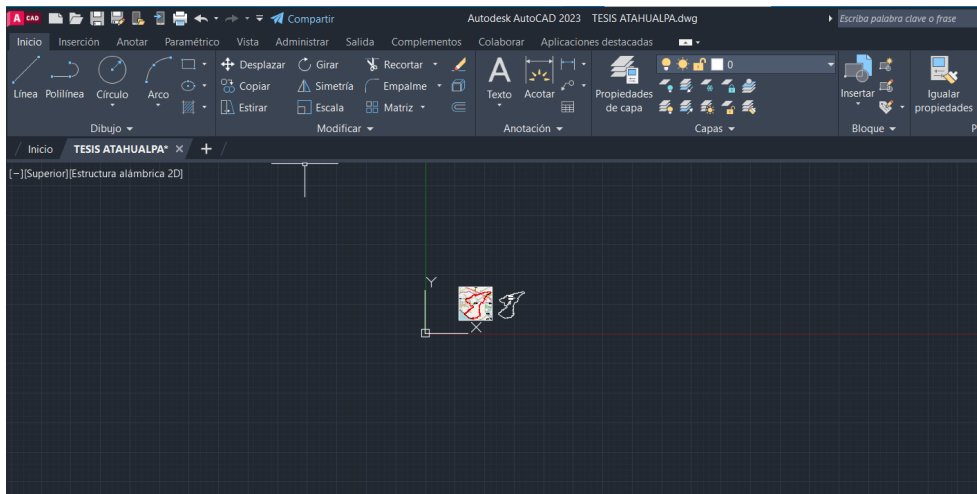


Figura 18: programas [30].

V-J. El análisis a través de estas plataformas permite:

- Estimar la generación anual de energía.
- Evaluar el costo nivelado de energía(LCOE).
- Analizar el porcentaje de cobertura de la demanda.
- Calcular indicadores de confiabilidad, como el índice de falta de energía (LOLP).

Como podemos ver en la figura 19, se puede ver cuál puede ser el análisis y qué no más podrías evaluar y simular en estas plataformas.



Figura 19: programas [31].

#### V-K. Factores que afectan el rendimiento del sistema

Para que un sistema híbrido funcione correctamente, se deben tener en cuenta varios factores técnicos y ambientales:

- Disponibilidad de recursos (radiación solar y velocidad del viento).
- Perfil de consumo energético de la comunidad.
- capacidad de almacenamiento y eficacia de conversión.
- Costos de inversión, operación y mantenimiento.

Un mal dimensionamiento o una ubicación inadecuada puede provocar fallas de suministro o inversiones innecesarias. Por ello, tal como vemos en la figura 20 la simulación previa permite optimizar recursos y garantizar un desempeño adecuado del sistema.

#### V-L. Aplicación en Zonas Rurales

La implementación de estos sistemas en zonas rurales ha permitido electrificar comunidades sin acceso a la red, mejorando la educación, salud, comunicación y productividad. En América Latina, África y Asia existen múltiples ejemplos exitosos que demuestran su viabilidad técnica y social.[33]

En la figura 21 podemos ver como En países como Ecuador, las zonas rurales aisladas en la Amazonía, la Sierra y el litoral representan escenarios ideales para su implementación, gracias al potencial solar elevado y condiciones

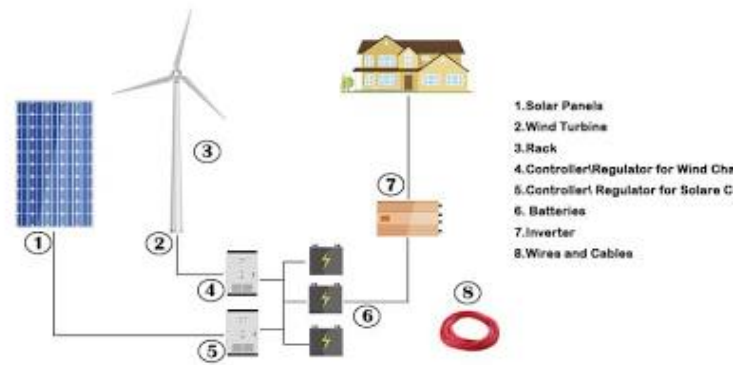


Figura 20: programas [32].

de viento moderadas en ciertas regiones.[11]



Figura 21: zona rural atahualpa [32].

#### V-M. Herramientas de Modelado y Visualización en el Estudio

El modelado en Blender permitió simular escenarios tridimensionales del sistema híbrido, incorporando datos reales de topografía de Atahualpa (obtenidos de mapas del IGM Ecuador). Esto ayudó a evaluar sombras en paneles solares y turbulencias en aerogeneradores.[29] El plano en AutoCAD, basado en límites parroquiales (área 95 km<sup>2</sup>), identificó zonas ideales para colocación, como áreas costeras con vientos de 5-7 m/s y terrenos planos con irradiación 5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día. El simulador integró estos diseños para proyecciones de generación anual, confirmando

la viabilidad off-grid para demandas rurales de 2-5 kWh/día por vivienda [30]. En la figura 22 podemos ver cómo se puede implementar, simular y crear un modelado 3D en Blender.

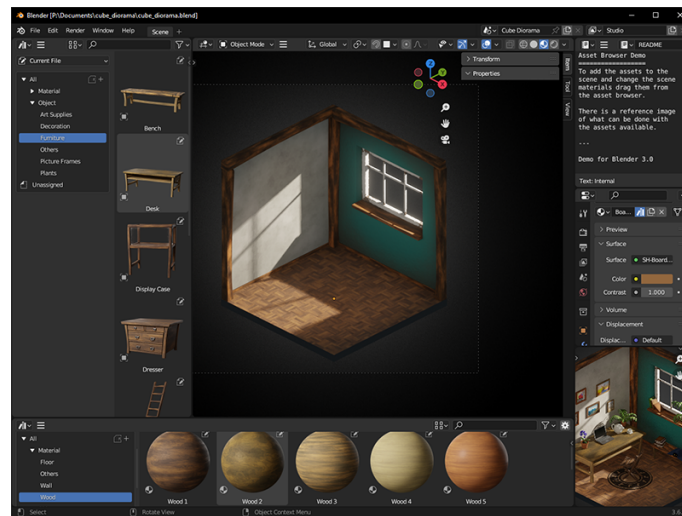


Figura 22: blender [31].

#### V-N. *Potencial Energético Específico en Atahualpa*

Podemos ver en la figura 23 como la parroquia rural de Atahualpa, ubicada en la provincia de Santa Elena (Ecuador), presenta un alto potencial para sistemas híbridos renovables. Sus coordenadas centrales son aproximadamente  $-2.31^{\circ}$  S,  $-80.77^{\circ}$  O, con un área de unos 95 km<sup>2</sup> y terreno costero semiárido (elevaciones 0-200 m s.n.m.).[17]



Figura 23: zona rural atahualpa [27].

Se puede observar en la figura 24 la irradiación solar promedio supera los 5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día, superior al promedio nacional de 4.575 kWh/m<sup>2</sup>/día, según el Atlas Solar del Ecuador . Esto permite una generación fotovoltaica eficiente, con proyectos como el Mapa Solar Nacional identificando hasta 1.500 MW en la provincia [34].



Figura 24: radiación santa elena [35].

Podemos ver en la figura 25 que el potencial eólico es moderado, con velocidades promedio de 5-7 m/s en zonas abiertas y costeras, parte del potencial nacional de 1.691 MW bruto (factible 884 MW) [15]. Estudios en situ en Atahualpa confirman viabilidad para aerogeneradores pequeños, complementando la solar para autonomías off-grid [15].



Figura 25: velocidad de el viento [35].

Como se muestra en la figura 26 estos datos, fueron obtenidos de fuentes como NASA POWER la cual nos permite poner coordenadas exactas de el lugar al cual queremos saber su generación y cambio climático, dándonos datos reales y con un rango amplio de horas, días, meses, años, gracias a NASA POWER se pueden obtener datos reales de la generación de energía renovable dependiendo de el punto y ELEC EP, permiten simulaciones precisas para demandas rurales (e.g., 2-5 kWh/día por vivienda) [35].

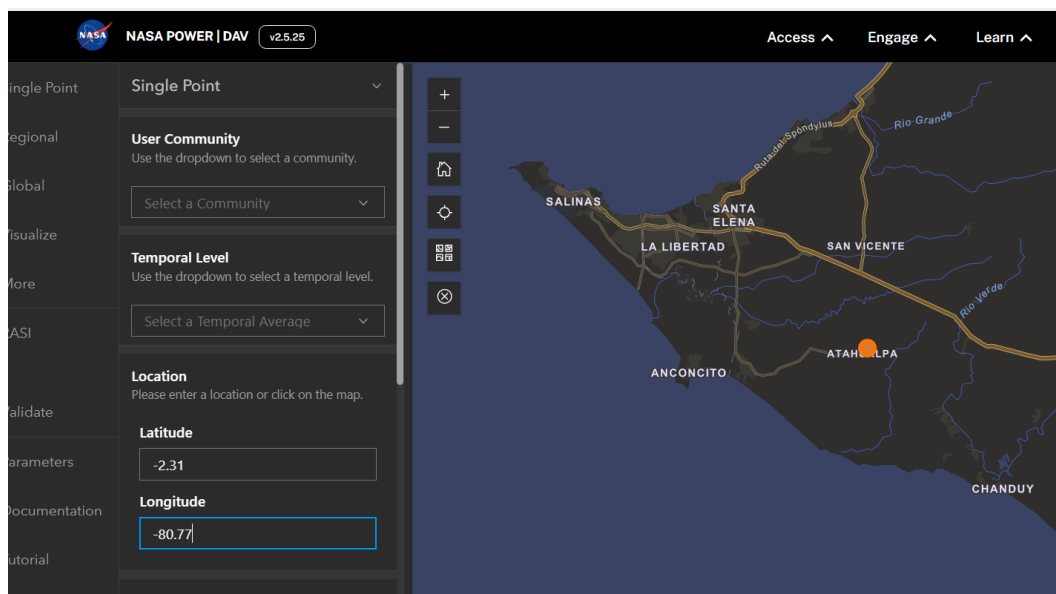


Figura 26: nasa power [31].

### V-Ñ. Contexto Geográfico y Normativo

La parroquia rural de Atahualpa, ubicada en el cantón Santa Elena de la provincia homónima (Ecuador), representa un contexto típico de zona costera semiárida con potencial para sistemas híbridos de energía renovable off-grid o microredes. Sus coordenadas centrales aproximadas son  $-2.31^{\circ}$  S,  $-80.77^{\circ}$  O, y se encuentra a unos 17 km de la ciudad de Santa Elena y 5 km de la vía Salinas-Guayaquil.[11]

### V-O. Datos geográficos y topográficos

- **Área territorial:** Fuentes oficiales varían ligeramente; el GAD Parroquial indica 77 km<sup>2</sup>, mientras Wikipedia y estudios locales reportan 94.14 km<sup>2</sup> (incluyendo extensiones comunales). La densidad poblacional es baja, alrededor de 91-108 hab/km<sup>2</sup>, reflejando asentamientos dispersos típicos de zonas rurales costeras.[7]
- **Topografía:** Terreno predominantemente plano a ondulado, con elevaciones entre 0 y 200-400 m s.n.m. (influencia de colinas costeras como las de Baños de San Vicente). Incluye zonas fértiles paralelas al río El Tambo (o Entrerío), con suelos aptos para agricultura limitada y ganadería, pero con alto riesgo de sequía. La parroquia es considerada zona segura, libre de amenazas naturales extremas como tsunamis o sismos mayores frecuentes.[7]
- **Clima:** Tropical árido cálido (clasificación Köppen BWh), con dos estaciones marcadas: seca (mayor parte del año, influida por la corriente fría de Humboldt) y lluviosa (diciembre-abril, precipitaciones moderadas). Temperatura promedio anual 23-28 °C, con alta radiación solar ( $\approx 5.3$  kWh/m<sup>2</sup>/día) y vientos moderados (5-7 m/s en zonas abiertas), ideales para solar y eólica pequeña. La influencia costera reduce la nubosidad en sectores sur y costeros, favoreciendo paneles solares.[7]

V-P. *Explicación del Simulador en el Contexto de Atahualpa*

La parroquia rural de Atahualpa presenta un escenario ideal para la implementación de un simulador de sistemas híbridos solar-eólicos, dada su caracterización geográfica, demográfica y energética. Los datos geográficos destacan un terreno plano-ondulado con elevaciones de 0-400 m s.n.m., clima tropical árido (BWh) con alta irradiación solar (5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día) y vientos moderados (5-7 m/s), lo que favorece la complementariedad de fuentes renovables.[11] Demográficamente, con 4.004 habitantes (INEC 2022) distribuidos en 1.000-1.200 hogares dispersos sobre 77-94 km<sup>2</sup>, la expansión de la red convencional es costosa, justificando soluciones off-grid.[14]

El perfil de carga eléctrica, estimado en 100-200 kWh/mes por vivienda (con picos diarios por ventiladores y bombeo de agua), se alinea con demandas rurales costeras en Ecuador. El simulador, basado en modelado estocástico y visualización 3D (Blender/QGIS), permite optimizar la colocación de componentes: paneles solares en zonas sur costeras con menor nubosidad (inclinación de 15° para máxima exposición) y aerogeneradores en elevaciones moderadas para capturar turbulencias eólicas.[12]

Como se detalla en la sección de simulación, algoritmos como GA y PSO minimizan el LCOE, logrando una RF 90 por ciento y cubriendo 90 por ciento de la demanda comunitaria (100-250 MWh/año). Esto reduce emisiones de CO2 (7-32 toneladas evitadas por hogar en 10 años, según MDPI 2025) y promueve autonomía energética, alineándose con el ODS 7 (energía asequible y limpia). [12] Podemos ver en la tabla II cuánto es la estimación de lo que se plantea en la zona rural Atahualpa.

Tabla II: Comparativa de perfiles de carga eléctrica residencial en Ecuador. Fuentes: ARCONEL/Primicias 2023, estimaciones locales Santa Elena 2015.[33]

<b>Categoría</b>	<b>Nacional (kWh/mes)</b>	<b>Rural Costa (kWh/mes)</b>	<b>Atahualpa Estimado (kWh/mes)</b>
Consumo promedio residencial	143.36	128-251	100-200
Consumo base diario	-	2-5	2-5 (iluminación, TV)
Picos (diurnos/nocturnos)	Mediodía-tarde	Alto diurno (ventiladores)	Diurno (bombeo agua)

La optimización se basa en el cálculo del Costo Nivelado de Energía (LCOE), definido como:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t + O_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

donde  $I_t$  es la inversión inicial,  $O_t$  y  $M_t$  son costos de operación y mantenimiento,  $E_t$  es la energía generada anual, y  $r$  es la tasa de descuento (e.g., 5-7 % en Ecuador). Para Atahualpa, con un sistema híbrido de 10 kW PV + 5 kW eólico + 20 kWh baterías, el LCOE simulado es 0.08/kWh, inferior al tarifario nacional subsidiado, en la tabla III podemos ver el potencial renovable en la zona rural Atahualpa.

Tabla III: Potencial renovable en Atahualpa y Santa Elena.[11], [16]

Recurso	Valor Promedio en Atahualpa	Potencial Provincial (Santa Elena)
Irradiación solar (kWh/m <sup>2</sup> /día)	4.5-5.5	1.500 MW (Mapa Solar Nacional)
Velocidad viento (m/s)	5-7 (a 10-80 m altura)	884 MW factible (Atlas Eólico)

#### V-Q. Marco Normativo en Ecuador

La implementación de sistemas híbridos en Atahualpa se enmarca en la Ley Orgánica de Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE, 2015), que promueve renovables y eficiencia energética con participación privada.[23] La Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) regula la microgeneración y autoabastecimiento a través de la Regulación 005/24, incentivando Sistemas de Generación Distribuida por Autoconsumo (SGDA) hasta 100 MW en 2026, con énfasis en zonas rurales costeras como Santa Elena. Esto incluye subsidios para instalaciones off-grid y net metering para excedentes, facilitando la viabilidad económica del simulador.[36] Podemos ver en la figura 27 cual es el perfil de la carga diaria típica con respecto a la demanda.

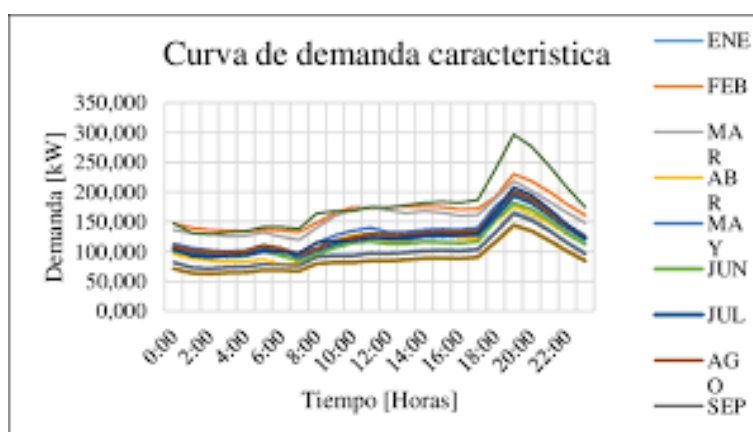


Figura 27: Perfil de carga diaria típica en vivienda rural costera (picos diurnos por ventiladores y bombeo) [37]

#### V-R. Antecedentes y Estado del Arte

Proyectos similares en Santa Elena, como El Aromo (200 MW solar, 2023) y Villonaco III (110 MW eólico, 2024), demuestran viabilidad técnica con LCOE bajo.[34] En Latinoamérica, híbridos rurales en Perú (e.g., microredes off-grid en Amazonas) y Colombia (Guajira) logran RF 85 % y ROI en 5-10 años. Estos justifican el simulador para Atahualpa, reduciendo costos de implementación 15-20 % mediante optimización previa.[17] Tenemos en la figura 28 la implementación del sistema híbrido (solar-eólico) en la zona de EL AROMO, y en la figura 29 la implementación del mismo sistema en la zona VILLANOCO.



Figura 28: Proyecto fotovoltaico EL AROMO  
[17]



Figura 29: Parque eólico Villanoco  
[37]

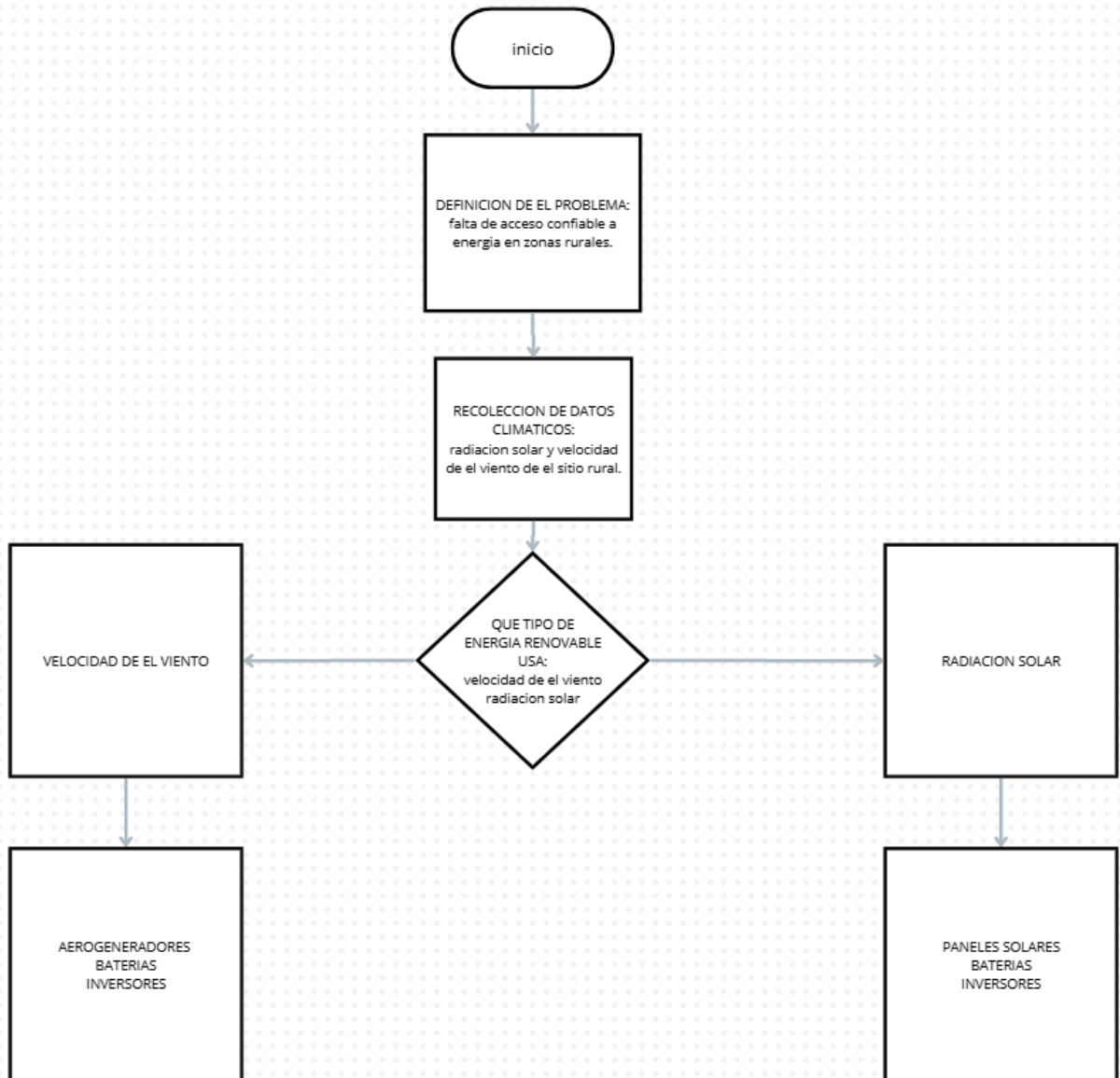


Figura 30

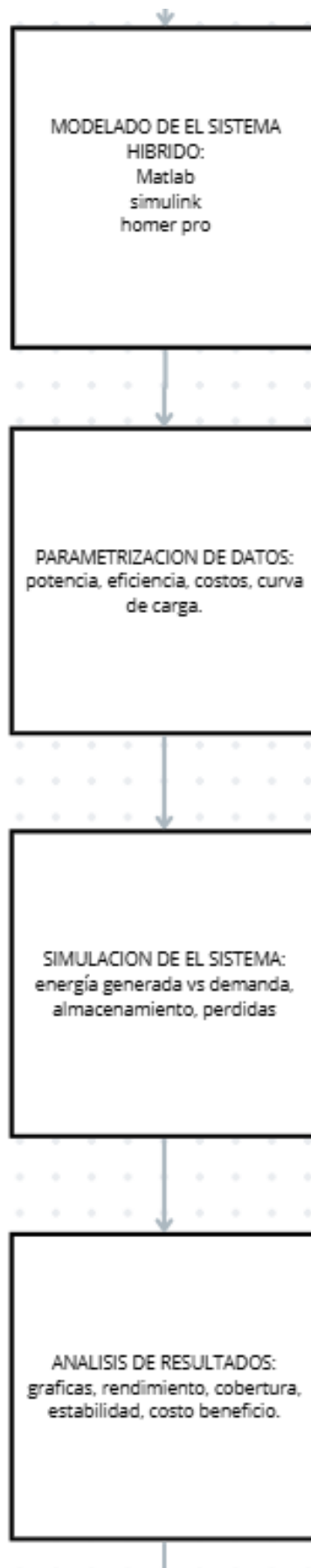


Figura 31

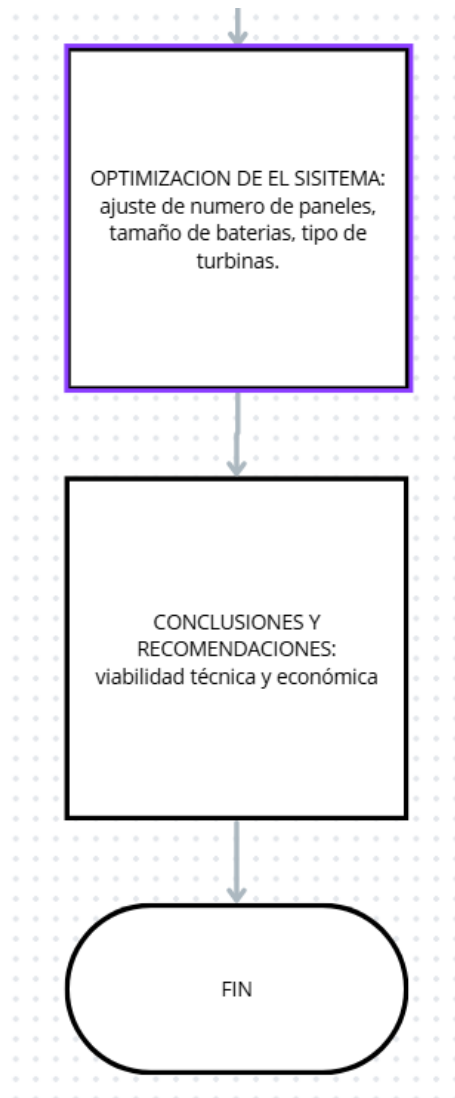


Figura 32: DIAGRAMA DE FLUJO [9].

## VI. MARCO METODOLÓGICO

### VI-A. Tipo y enfoque de investigación

La presente investigación es de naturaleza cuantitativa, descriptiva y aplicada.

- Cuantitativa, porque se basa en datos numéricos de irradiación solar, velocidad del viento, demanda eléctrica y producción energética simulada.
- Descriptiva, debido a que se analiza el comportamiento del sistema híbrido sin manipular directamente las variables físicas.
- Aplicada, ya que busca proponer una solución concreta al problema de abastecimiento energético en zonas rurales mediante el uso de tecnologías renovables y simulación computacional.

### VI-B. Diseño de investigación

El estudio adopta un diseño no experimental de tipo transversal, ya que no se realiza intervención física sobre los sistemas reales, sino que se recopilan datos existentes y se simulan escenarios mediante software especializado. Se utiliza un enfoque de modelado y simulación, donde el sistema híbrido es analizado bajo diferentes condiciones climáticas, técnicas y de consumo.

### VI-C. Area de estudio

El estudio se desarrolla considerando información climática correspondiente al sector rural de Atahualpa, ubicado en la provincia de Santa Elena, Ecuador. Esta zona fue seleccionada debido a su potencial en recursos solares y eólicos, lo cual permite evaluar la viabilidad de sistemas híbridos de generación eléctrica renovable.

### VI-D. Población y muestra

- Población: comunidades rurales sin acceso continuo o eficiente a la red eléctrica nacional.
- Muestra: se selecciona una localidad rural específica que cumpla los siguientes criterios:
- Demanda energética doméstica o comunitaria identificable.
- Disponibilidad de datos meteorológicos (irradiación solar y viento).
- Ubicación geográfica aislada o con cobertura eléctrica deficiente.
- Potencial para implementar energías renovables.

#### VI-E. Variables de estudio

En la figura 33 podemos ver cuales variables son tomadas en cuenta en nuestro estudio para el análisis y desarrollo de el simulador, gracias a esto podemos ver de forma claro y ordenada cuales son las variables importantes a considerar para el optimo funcionamiento y análisis del simulador.

Variable	Tipo	Indicador	Unidad
Recurso solar	Independiente	Irradiación promedio	kWh/m <sup>2</sup> /día
Recurso eólico	Independiente	Velocidad media del viento	m/s
Demanda energética	Independiente	Consumo diario	kWh/día
Energía generada	Dependiente	Producción total del sistema	kWh/año
Rendimiento del sistema	Dependiente	Cobertura de demanda, eficiencia, pérdidas	%
Viabilidad económica	Dependiente	Costo nivelado de energía (LCOE)	USD/kWh

Figura 33

#### VI-F. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Tenemos en la figura 34 las técnica e instrumentos que vamos a utilizar para poder obtener la recolección de datos del sistema, así como lo son paginas que nos darán datos históricos para el funcionamiento apropiado de el simulador.

Técnica	Instrumento	Fuente
Recolección de datos climáticos	Bases de datos meteorológicas (NASA, Meteonorm, SWERA)	Datos históricos
Medición de consumo energético	Encuestas, fichas de carga eléctrica	Viviendas/comunidad
Modelado y simulación	Software ( <b>Matlab</b> , Blender, Autocad)	Computadora
Análisis económico	Tablas de costos, tasas de interés, mantenimiento	Fuentes académicas

Figura 34

## VI-G. Procedimiento Metodológico

El procedimiento seguido en la investigación se desarrolló en las siguientes etapas:

- Etapa 1: Recolección de Datos Meteorológicos.
- Etapa 2: Análisis de recursos energéticos.
- Etapa 3: Modelado matemático del sistema híbrido.
- Etapa 4: Simulación del sistema.
- Etapa 5: Diseño estructural del sistema.
- Etapa 6: Modelado tridimensional.

A continuación tenemos la descripción y forma para poder realizar cada una de las etapas de la forma mas eficiente y como podemos desarrollar los temas para el optimo procedimiento.

### ■ Etapa 1: Recolección de Datos Meteorológicos

Se recopilaron datos históricos de radiación solar y velocidad del viento obtenidos en NASA POWER, de la cual al tener los datos de latitud y longitud del lugar de estudio podemos obtener los datos de recursos renovables con respecto a la radiación solar y velocidad del viento dándonos así datos reales de los meses o años que queramos obtener para que la simulación sea optima con datos reales e históricos, en la figura 35 nos muestra como es la pagina de NASA POWER, donde obtenemos los datos de nuestra simulación, podemos ver las áreas editables en la pagina de NASA POWER, como son latitud , longitud, el tiempo que queremos tener de datos y los parámetros para obtener los resultados reales de radiación solar, velocidad del viento y temperatura del lugar de estudio.

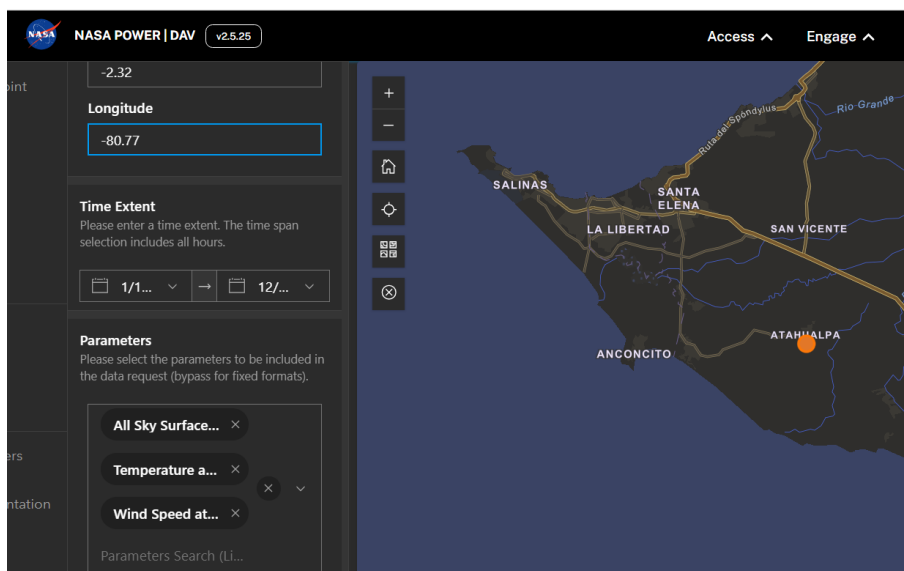


Figura 35: obtenemos los datos históricos de radiación y velocidad gracias a los datos generados por NASA POWER

en la figura 36 vemos los resultados que nos da al poner las variables , tiempo y latitud longitud de el lugar donde quiero obtener los datos meteorológicos, la pagina de NASA POWER nos genera un csv del cual vemos que nos dan datos de radiación solar y velocidad del viento como se ve en la figura36

Year	Month	Day	Hour	ALLSKY_SFC_SW_DWN	WS10M	T2M
2025	1	1	0	0.39	23.09	
2025	1	1	1	0.37	23.05	
2025	1	1	2	0.35	23.01	
2025	1	1	3	0.33	22.98	
2025	1	1	4	0.32	22.96	
2025	1	1	5	0.32	22.98	
2025	1	1	6	16.52	3.42	23.15
2025	1	1	7	168.3	4.08	23.81
2025	1	1	8	391.0	4.28	24.56
2025	1	1	9	619.67	4.35	25.45
2025	1	1	10	751.35	4.22	26.33
2025	1	1	11	856.17	4.05	27.21
2025	1	1	12	846.72	4.0	27.89
2025	1	1	13	779.25	4.17	28.3
2025	1	1	14	661.03	4.43	28.35
2025	1	1	15	532.38	4.56	28.03
2025	1	1	16	314.55	4.64	27.54
2025	1	1	17	115.6	4.75	26.75
2025	1	1	18	7.43	4.66	25.57

Figura 36: datos generados por NASA POWER

■ **Etap 2: Análisis de recursos energéticos**

Los datos obtenidos en NASA POWER fueron procesados en MATLAB y visualizados en el mismo, y en Power BI tenemos un mapa con los puntos de latitud y longitud que tenemos en consideración para poder tener una optima simulación de los recursos renovables. En la figura 37 podemos ver como tenemos el programa en matlab con el codigo a simular.

```

13 Wind_kw = 10; % kW eólico
14 Battery_kwh = 30; % kwh baterías
15 Battery_SOCini = 0.3; % SOC inicial
16
17 %% 2. ARCHIVO NASA POWER
18 filename = 'p5_NASA_Atahualpa_SantaElena_2025.csv'; % se pone el archivo de el año simulado
19
20 opts = detectImportOptions(filename);
21 data = readtable(filename, opts);
22
23 GHI = data.ALLSKY_SFC_SW_DWN;
24 Viento = data.WS10M;
25 Temp = data.T2M;
26 Year = data.YEAR;
27 Month = data.MO;
28 Day = data.DY;
29 Hour = data.HR + 0.5;
30 Hour(Hour >= 24) = Hour(Hour >= 24) - 24;
31

```

Figura 37: Proceso en MATLAB

En la figura 38 tenemos como se ven representados todos los puntos de análisis de la zona rural atahualpa, así podemos ver de forma real como son las diferentes áreas de la zona y ver cuales son los mejores puntos para la obtención de radiación solar y velocidad de tiempo que a partir del simulador nos dará cuales son los puntos mas óptimos para la mayor obtención de energía renovable posible.

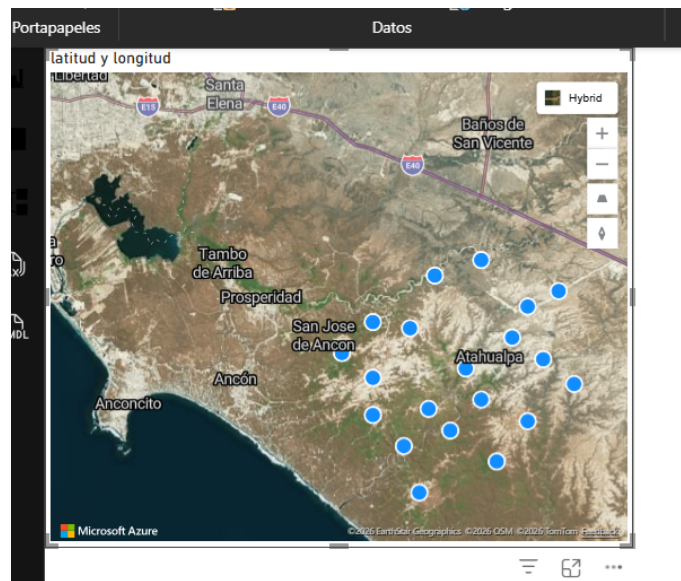


Figura 38: visualización de coordenadas de estudio en POWER BI

### ■ Etapa 3: Modelo matemático híbrido

Se desarrollaron modelos matemáticos del panel fotovoltaico y del aerogenerador en MATLAB, considerando parámetros técnicos reales.

En el desarrollo de esta investigación, se ha optado por un enfoque de modelo matemático para simular el comportamiento del sistema híbrido solar-eólico, lo que permite evaluar su viabilidad sin necesidad de implementaciones físicas costosas. Basándome en principios fundamentales de la física y la ingeniería eléctrica.

### ■ Potencia generada por el panel solar fotovoltaico

Esta fórmula calcula la potencia de salida de los paneles solares basada en la irradiación solar, el área de los paneles y la eficiencia del sistema.

$$P_{PV} = G \cdot A_{PV} \cdot \eta_{PV} \quad (1)$$

Donde:

- G: Irradiación solar (W/m<sup>2</sup>).
- A<sub>PV</sub>: Área total de los paneles solares (m<sup>2</sup>).
- η<sub>PV</sub>: Eficiencia del panel solar

- **Potencia generada por la turbina eólica:**

Representa la potencia extraída del viento, considerando la densidad del aire, el área barrida por las aspas, la velocidad del viento y el coeficiente de potencia.

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A_W v^3 C_p \quad (2)$$

Donde:

- $\rho$ : Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>, usualmente 1.225 a nivel del mar).
- $A_W$ : Área barrida por las aspas de la turbina (m<sup>2</sup>,  $\pi r^2$ ).
- $v$ : Velocidad del viento (m/s).
- $C_p$ : Coeficiente de potencia (adimensional, máximo teórico 0.59 según el límite de Betz, práctico alrededor de 0.4-0.5).
- **Potencia total generada por el sistema híbrido:** Suma la contribución de los subsistemas solar y eólico, asumiendo que operan en paralelo.

$$P_{total} = P_{PV} + P_W \quad (3)$$

Donde:

- $P_{PV}$ : Potencia solar.
- $P_W$ : Potencia eólica.
- **Estado de carga de la batería (SOC):** Modela el nivel de energía almacenada en la batería, actualizado en función de la potencia neta (generada menos consumida) y la capacidad de la batería.

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{(P_{total}(t) - P_{load}(t)) \cdot \Delta t \cdot \eta_{bat}}{C_{bat}} \quad (4)$$

Donde:

- $SOC(t)$ : Estado de carga en el tiempo  $t$  (porcentaje o fracción).
- $P_{load}$ : Potencia demandada por la carga (W).
- $\Delta t$ : Intervalo de tiempo (horas).
- $\eta_{bat}$ : Eficiencia de la batería (adimensional, típicamente 0.85-0.95).

- $C_{bat}$ : Capacidad de la batería (Wh).

- **Perdidas en el inversor:**

Calcula la potencia útil después de la conversión de DC a AC, considerando la eficiencia del inversor.

$$P_{out} = P_{in} \cdot \eta_{inv} \quad (5)$$

Donde:

- $P_{in}$ : Potencia de entrada al inversor (W, usualmente de baterías o generadores).
- $\eta_{inv}$ : Eficiencia del inversor (adimensional, típicamente 0.90-0.98).
- $P_{out}$ : Potencia de salida disponible para la carga.

- **Balance energético neto:**

Determina si hay exceso o déficit de energía, útil para dimensionar el sistema y evaluar la fiabilidad.

$$E_{net} = \sum_{t=1}^N (P_{total}(t) - P_{load}(t)) \cdot \Delta t \quad (6)$$

Donde:

- $E_{net}$ : Energía neta sobre un período  $T$  (Wh).
- $P_{total}(t)$ : Potencia generada en el tiempo  $t$ .
- $P_{load}(t)$ : Demanda en el tiempo  $t$ .

- **Nivel de servicio (LOS) o fiabilidad del sistema:**

Mide la proporción de tiempo en que la demanda es satisfecha, ideal para sistemas off-grid.

$$LOS = 1 - \frac{E_{deficit}}{E_{demand}} = 1 - LPSP \quad (7)$$

donde

$$E_{deficit} = \sum_{t: P_{total}(t)+P_{bat}(t)<P_{load}(t)} (P_{load}(t) - P_{total}(t) - P_{bat}(t)) \cdot \Delta t \quad (8)$$

Donde:

- $E_{deficit}$ : Energía no suministrada (Wh).
- $E_{load}$ : Energía total demandada (Wh).

#### ▪ Etapa 4: Simulación del sistema

Se ejecutaron simulaciones numéricas para evaluar la potencia generada por cada fuente y el rendimiento conjunto del sistema híbrido, como podemos ver en la figura 39 tenemos los parametros tecnicos los cuales son las variables tecnicas utilizadas para que la simulacion sea optima.

```

TESIS.m x | +
MATLAB Drive/TEISIS/TEISIS.m
42
43 %X 3. PARÁMETROS TÉCNICOS
44 eta_pv = 0.20;
45 eta_inv = 0.96;
46 eta_bat = 0.94;
47 h_hub = 30;
48 V_cut_in = 3.0;
49 V_rated = 11.0;
50 V_cut_out = 25;
51
52 alpha = 0.20;
53 Viento_hub = Viento .* (h_hub/10)^alpha;
54
55 %X 4. CÁLCULO DE POTENCIA
56 Ppv = Pv_kW * (GH1/1000) * eta_pv * eta_inv;
57
58 Pwind = zeros(N,1);
59 idx1 = Viento_hub >= V_cut_in & Viento_hub < V_rated;
60 Pwind(idx1) = wind_kW .* ((Viento_hub(idx1) - V_cut_in)/(V_rated - V_cut_in)).^3;
61 idx2 = Viento_hub >= V_rated & Viento_hub <= V_cut_out;
62 Pwind(idx2) = wind_kW;
63
64 Ptotal = Ppv + Pwind;
65

```

Figura 39: variables reales para el análisis de la simulación, matlab

#### ▪ Etapa 5: Diseño estructural del sistema

Se elaboraron planos técnicos del sistema híbrido utilizando AutoCAD, considerando la disposición de paneles y aerogeneradores, en la figura 40 podemos ver el plano técnico y como se representa en el plano la zona rural atahualpa, el aerogenerador y paneles solares.

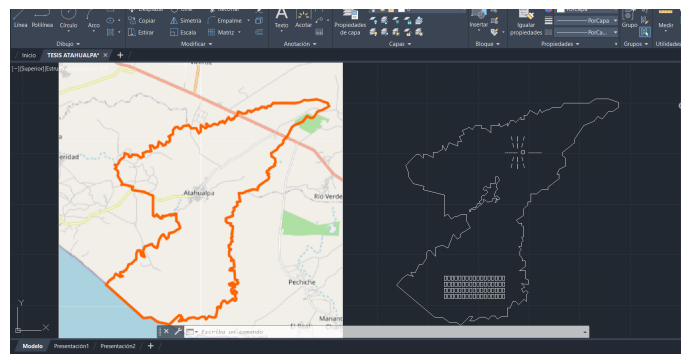


Figura 40: Plano 2D autocad

## ■ Etapa 6: Modelado tridimensional

Se creó un modelo 3D del sistema híbrido en Blender para representar visualmente la propuesta de instalación e cual representa la zona rural el aerogenerador y tambien la puesta de los paneles solares en el sistema, en la figura 41 podemos ver como es quedaria la poscion de los componentes en blender y como va quedando el modelado del mismo.

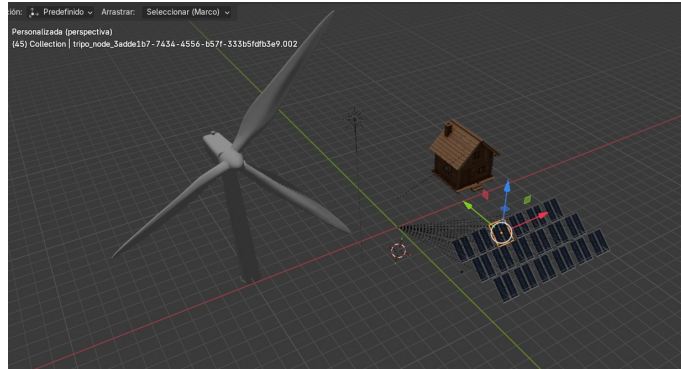


Figura 41: Plano 3D Blender

### VI-H. Selección de MATLAB para la simulación del sistema híbrido solar-eólico

En el ámbito de la modelación y optimización de sistemas híbridos de energía renovable (solar fotovoltaica y eólica con almacenamiento), existen diversas herramientas computacionales con enfoques y capacidades diferenciadas. A continuación, se presenta una comparación de las principales alternativas frente a MATLAB (utilizado exclusivamente mediante programación en scripts), destacando sus bondades, fortalezas y limitaciones en el contexto de esta investigación.

#### VI-HI. MATLAB (programación en scripts)

: MATLAB se destaca por su flexibilidad en el desarrollo de modelos matemáticos personalizados y detallados de los componentes del sistema (paneles fotovoltaicos con modelo de una o dos diodos, curva de potencia eólica, dinámica de baterías, eficiencia de inversores, entre otros). Permite implementar algoritmos de optimización avanzados (genético, enjambre de partículas, gradiente, etc.) directamente desde el entorno de programación, facilitando la minimización del costo nivelado de la energía (LCOE), el costo neto presente (NPC) o métricas de fiabilidad como la pérdida de potencia suministrada (LPSP), todo bajo restricciones técnicas definidas por el usuario.

Entre sus principales fortalezas se encuentran:

- Alta capacidad para manejar series temporales horarias de largo plazo (8760 horas/año) con importación sencilla de datos meteorológicos reales.

- Generación de gráficos de alta calidad y personalizados (curvas de sensibilidad, diagramas de Pareto costo-fiability, flujos energéticos acumulados, perfiles de estado de carga de baterías, entre otros), ideales para la presentación de resultados en tesis.
- Posibilidad de incorporar modelos no lineales, controles predictivos o inteligencia artificial sin necesidad de interfaces externas.
- Amplia aceptación en la comunidad académica, con numerosos códigos y publicaciones que facilitan la reproducibilidad y validación.

Como limitaciones se pueden mencionar el requerimiento de licencia (aunque disponible en la mayoría de universidades) y un tiempo de ejecución algo mayor en optimizaciones muy complejas comparado con herramientas especializadas en dimensionamiento económico.

#### VI-H2. Comparación con otras herramientas

:

- **HOMER Pro:**

Especializado en optimización económica y dimensionamiento automático de sistemas híbridos (incluyendo PV, eólica, baterías, diésel y red). Ofrece una interfaz intuitiva y resultados rápidos en análisis de sensibilidad, cálculo de LCOE, NPC y flujos de caja a lo largo de la vida útil del proyecto. Sin embargo, sus modelos físicos son más simplificados (no permite personalizar con facilidad ecuaciones detalladas de conversión o controles avanzados), lo que limita su uso cuando se requiere simular dinámicas transitorias o calidad de potencia. En estudios académicos profundos suele emplearse como herramienta complementaria para obtener un dimensionamiento inicial económico, que luego se valida y refina en entornos más flexibles como MATLAB.

- **TRNSYS:**

Excelente para simulación transitoria de sistemas con fuerte componente térmico (solar térmico, almacenamiento térmico, edificios). Permite modelado modular muy detallado mediante “Types”. No obstante, su enfoque está menos orientado a la electrónica de potencia, inversores, controles eléctricos avanzados y optimización económica integrada de sistemas eólicos-fotovoltaicos. La curva de aprendizaje es elevada y la interfaz menos moderna, lo que lo hace menos práctico para tesis centradas en balance energético eléctrico y optimización multi-objetivo.

- **Python (con librerías pvlib, windpowerlib, scipy.optimize, PuLP, plotly):** Alternativa gratuita y de código

abierto con gran potencial para procesamiento de datos masivos y machine learning (predicción de recurso, control adaptativo). Dispone de excelentes herramientas de visualización interactiva (Sankey, gráficos 3D). Sin embargo, requiere mayor esfuerzo de programación para construir modelos físicos completos desde cero (sin equivalente gráfico directo a bloques), y las optimizaciones metaheurísticas suelen ser más lentas y menos

integradas que las toolbox nativas de MATLAB. Es preferible cuando se busca publicar código abierto o evitar licencias, pero implica más tiempo de desarrollo inicial.

■ **PSCAD/EMTDC y DIgSILENT PowerFactory:**

Superiores en análisis de transitorios electromagnéticos, calidad de potencia, fallas y estabilidad en redes conectadas a la red. Ideales para estudios de integración a gran escala. No obstante, su enfoque es más orientado a utilities y redes de potencia que a la optimización de tamaño y operación de sistemas híbridos aislados o pequeños. Presentan curva de aprendizaje alta, menor cantidad de modelos plug-and-play para renovables y visualización menos amigable para resultados económicos en tesis.

En síntesis, MATLAB (mediante programación directa) resulta la opción más adecuada para esta tesis debido a su equilibrio entre modelado físico preciso, flexibilidad en algoritmos de optimización, capacidad gráfica avanzada y aceptación en el ámbito académico. Permite desarrollar un simulador completo y personalizado que integra balance energético horario, optimización económica y análisis de sensibilidad, aspectos centrales del objetivo planteado. Herramientas como HOMER Pro complementan bien para validaciones económicas rápidas, mientras que Python representa una alternativa viable en contextos sin acceso a licencias comerciales.

A continuación damos paso a la tabla IV en la cual vemos las herramientas, fortalezas principales y limitaciones principales de cada una de los software más usados para la simulación de un sistema de energía renovable, y ver porque matlab es el más optim entre todos.

Tabla IV: Comparación resumida de herramientas para simulación de sistemas híbridos renovables

Herramienta	Fortalezas principales	Limitaciones principales
MATLAB (scripts)	Flexibilidad, optimización avanzada, gráficos personalizados	Requiere licencia, código manual
HOMER Pro	Optimización económica rápida, interfaz amigable	Modelos físicos simplificados
TRNSYS	Simulación transitoria detallada (térmica)	Menos enfocado en controles eléctricos
Python (pvlib + scipy)	Gratuito, visualización interactiva	Mayor esfuerzo de programación
PSCAD/DIGSILENT	Transitorios y estabilidad de red	Curva de aprendizaje alta, enfoque utility

[38]

## VI-I. Programa y Datos

Gracias al simulador que hemos generado a partir de matlab y a los datos meteorológicos que nos da NASA POWER, podemos simular y tener de forma real datos para saber cuál es el lugar y los materiales más óptimos para su mayor funcionamiento. En la siguiente imagen tenemos la primera parte de cómo comienza el programa y los datos importantes tomados para la realización del programa.

Al comienzo de el programa, para poder obtener una pantalla guide de la cual podemos hacer que sea interactiva, declaramos posición de figuras para que se vean representadas y de forma ordenada, luego declaramos los datos de entrada de la zona rural atahualpa, las cuales son latitud, -2.3194, longitud -80.7728, y el año de el cual se obtuvieron los datos para la simulación, el cual es el 2025 que es el año en el cual nos basamos como datos principales para el desarrollo y funcionamiento del programa, también declaramos los datos como kw dados por paneles solares, kw dados por aerogenerador, kw dados por baterías, y el soc inicial que es el estado de carga inicial de la batería justo en el momento que empieza a realizar el calculo, en la figura 42 tenemos la primera parte de mi programa de simulacion el tenemos los datos de entrada importantes para el optimo funcionamineto del sistema.

```
SIMULACION_FINAL.m x +
/MATLAB Drive/TESIS/SIMULACION_FINAL.m
1 function Simulacion_Atahualpa_Tesis_Final()
2 % =====
3 % SIMULACIÓN HÍBRIDA SOLAR-EÓLICA - ATAHUALPA (Versión Tesis Final 2025)
4 % =====
5
6 fig = uifigure('Name', 'Simulación Híbrida Solar-Eólica - Atahualpa (Tesis)', ...
7 'Position', [100 100 1400 800]);
8
9 % Variable compartida
10 dataFolderPath = '';
11
12 % Pestañas
13 tg = uitabgroup(fig, 'Position', [20 20 1360 760]);
14 tabMain = uitab(tg, 'Title', 'Resultados Principales');
15 tabMensual = uitab(tg, 'Title', 'Análisis Mensual');
16 tabCostos = uitab(tg, 'Title', 'Costos y CAPEX');
17
18 % ===== ENTRADAS =====
19 uilabel(tabMain, 'Position', [30 720 180 22], 'Text', '1. Datos NASA:', 'FontWeight', 'bold');
20 ddFile = uidropdown(tabMain, 'Position', [30 690 290 22], 'Items', {'Cargar carpeta...'});
21
22 uibutton(tabMain, 'push', 'Position', [330 690 100 22], 'Text', 'Buscar...', ...
23 'ButtonPushedFcn', @(btn, event) loadCSVFolder(ddFile, fig));
24
25 uilabel(tabMain, 'Position', [30 650 200 22], 'Text', 'Parámetros del Sistema:', 'FontWeight', 'bold');
```

Figura 42: Datos de entrada

como vemos en la figura 43, insertamos el archivo csv generado por NASA POWER, el cual el programa lee y declara las variables radiación, velocidad del viento y temperatura. Va a ver y generar de una forma real los datos previamente obtenidos de NASA POWER. Declaramos también datos como hora, día, mes y año para tener un dato real de toda la generación obtenida en un año en Atahualpa.

```

%% 2. ARCHIVO NASA POWER
filename = 'NASA_Atahualpa_SantaElena_2025.csv'; % se pone el archivo de el año simulado

opts = detectImportOptions(filename);
data = readtable(filename, opts);

GHI = data.ALLSKY_SFC_SW_DWN;
Viento = data.WS10M;
Temp = data.T2M;
Year = data.YEAR;
Month = data.MO;
Day = data.DY;
Hour = data.HR + 0.5;
Hour(Hour >= 24) = Hour(Hour >= 24) - 24;

GHI(GHI < 0) = 0;
Viento(Viento < 0) = 0;

tiempo = datetime(Year, Month, Day, floor(Hour), round((Hour-floor(Hour))*60), 0);

```

Figura 43: archivo NASA POWER

En la figura 44 podemos apreciar los parámetros técnicos del simulador del cual nos basamos para tener resultados reales de el análisis de la generación de energía solar y eólica e igual estado de las baterías.

```

%% 3. PARÁMETROS TÉCNICOS
eta_PV = 0.20;
eta_inv = 0.96;
eta_bat = 0.94;
h_hub = 30;
V_cut_in = 3.0;
V_rated = 11.0;
V_cut_out = 25;

alpha = 0.20;
Viento_hub = Viento .* (h_hub/10)^alpha;

```

Figura 44: Parametros Tecnicos

Gracias a las fórmulas previamente mostradas podemos calcular la potencia eólica y solar dados por los datos obtenidos, dando así como resultado la potencia total del sistema, como podemos ver en la figura 45.

```

%% 4. CÁLCULO DE POTENCIA
Ppv = Pv_kw * (GHI/1000) * eta_PV * eta_inv;

Pwind = zeros(N,1);
idx1 = Viento_hub >= V_cut_in & Viento_hub < V_rated;
Pwind(idx1) = Wind_kw * ((Viento_hub(idx1) - V_cut_in)/(V_rated - V_cut_in)).^3;
idx2 = Viento_hub >= V_rated & Viento_hub <= V_cut_out;
Pwind(idx2) = Wind_kw;

Ptotal = Ppv + Pwind;

```

Figura 45: Calculo de Potencia

Para que la simulación sea más real ponemos el consumo diario, en esta parte de aquí influye mucho para ver la autonomía del sistema y como se comporta, dado que dependiendo de el consumo diario la autonomía podría subir o bajar dependiendo de el consumo diario, como podemos ver en la figura ??

```

%% 5. PERFIL DE CARGA
consumo_diario = 18;
Load_kw = zeros(N,1); %#ok<PREALL>
horas_vec = (0:N-1)'; % Horas de 0 a N-1
Load_kw = consumo_diario/24 * (1.2 + ...
    0.9*sin(2*pi*horas_vec/24 + pi) + ...
    0.4*sin(4*pi*horas_vec/24));

```

Figura 46: Perfil de Carga

en la figura 47 tenemos parte del programa en la cual tenemos la simulación de las baterías, simulando el máximo y el mínimo de eficiencia y el total de carga de la batería.

```

%% 6. SIMULACIÓN DE BATERÍAS
SOC = zeros(N,1);
SOC(1) = Battery_SOCini;

for t = 1:N-1
    exceso = Ptotal(t) - Load_kw(t);

    if exceso > 0
        SOC(t+1) = min(1, SOC(t) + exceso * eta_bat / Battery_kwh);
    else
        SOC(t+1) = max(0, SOC(t) + exceso / (Battery_kwh * eta_bat));
    end
end

```

Figura 47: Simulación de baterías

en la figura 48 podemos ver que aquí se muestra el resultado obtenido tanto en energía solar como en energía eólica y el total de energía renovable generada. También tenemos la energía de demanda para tener un dato real de la generación de un sistema híbrido vs la demanda.

```

%% 7. RESULTADOS
Energia_solar_kwh = sum(Ppv);
Energia_eolica_kwh = sum(Pwind);
Energia_total_renovable = Energia_solar_kwh + Energia_eolica_kwh;
Energia_demandada = sum(Load_kw);

Entrega_bateria = zeros(N,1);
for t = 1:N-1
    if SOC(t) > SOC(t+1)
        Entrega_bateria(t) = (SOC(t) - SOC(t+1)) * Battery_kwh;
    end
end

Energia_disponible = Ptotal + Entrega_bateria;

Deficit_kwh = Load_kw - Energia_disponible;
Deficit_kwh(Deficit_kwh < 0) = 0;

Autonomia_porcentaje = 100 * (1 - sum(Deficit_kwh)/Energia_demandada);

```

Figura 48: Resultados

como vemos en la figura 49 Tenemos las horas simuladas y gráficos del tiempo que se generó y obtuvo, dándonos por separado cada imagen de la generación obtenida por los datos y variables previamente declaradas.

```

%% 8. GRÁFICOS
dias = 10;
horas_max = min(24*dias, N);
horas = 1:horas_max;

figure(1); clf;
area(horas, [Ppv(horas) Pwind(horas) Load_kw(horas)], 'LineWidth',1.8);
hold on; plot(horas, Load_kw(horas), 'k', 'LineWidth',3);
legend('Solar','Eólica','Demanda','Location','northwest');
title(['Sistema híbrido - Atahualpa (' num2str(Pv_kw) ' kW + ' num2str(Wind_kw) ' kW + ' num2str(Battery_kwh) ' kWh bat)']);
ylabel('Potencia [kW]'); xlabel('Horas'); grid on; box on;
saveas(1,'Produccion_vs_Demanda_Atahualpa.png');

figure(2); clf;
plot(horas, SOC(horas)*100, 'LineWidth',2.5, 'Color',[0 0.6 0.8]);
title('SOC batería - Primeras horas - Atahualpa');
ylabel('SOC [%]'); xlabel('Horas'); grid on; ylim([0 105]);
text(20,90,['Autonomía = ' num2str(Autonomia_porcentaje,'%2f') ' %'], 'FontSize',14,'FontWeight','bold');
saveas(2,'SOC_primeras_horas_Atahualpa.png');

figure(3); clf;
plot(tiempo, SOC*100, 'LineWidth',1.2, 'Color',[0 0.7 0]);
title('Estado de carga batería - Período completo - Atahualpa');
ylabel('SOC [%]'); xlabel('Fecha y Hora'); grid on; ylim([0 105]);

```

Figura 49: Graficos

En la figura 50 tenemos la muestra mensual del rendimiento del estado de carga de la batería desde el mes de enero hasta el mes de diciembre en la zona rural de Atahualpa.

```

%% 8.1 ANÁLISIS MENSUAL DE SOC
% Calcula SOC promedio por mes
meses = unique(month(tiempo)); % 1 a 12 si año completo
SOC_mensual = zeros(length(meses), 1);
for m = 1:length(meses)
    idx_mes = month(tiempo) == meses(m);
    SOC_mensual(m) = mean(SOC(idx_mes) * 100); % Promedio en %
end

disp('-----')
disp(' ANÁLISIS MENSUAL DE SOC - ATAHUALPA')
disp('-----')
nombres_meses = {'Ene', 'Feb', 'Mar', 'Abr', 'May', 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Sep', 'Oct', 'Nov', 'Dic'};
for m = 1:length(meses)
    disp([nombres_meses{m} ': Estado de carga promedio = ' num2str(SOC_mensual(m), '%6.2f') ' %'])
end
[~, idx_max] = max(SOC_mensual);
[~, idx_min] = min(SOC_mensual);
disp(['Mes con SOC MÁXIMO: ' nombres_meses{idx_max} ' (' num2str(SOC_mensual(idx_max), '%6.2f') ' %)'])
disp(['Mes con SOC MÍNIMO: ' nombres_meses{idx_min} ' (' num2str(SOC_mensual(idx_min), '%6.2f') ' %)'])
disp('-----')

```

Figura 50: Análisis Mensual del ESTADO DE CARGA

Como se observa en la figura 51 tenemos como el programa pasa ya al análisis económico con respecto al gasto por panel solar, aerogenerador, batería, instalación u mano de obra, la vida útil del sistema y la tasa de descuento.

```

%% 9. ANÁLISIS ECONÓMICO
costo_PV = 550;
costo_eolico = 1100;
costo_bateria = 280;
costo_instal = 4000;
vida_util = 25;
tasa_descuento = 0.08;

CAPEX = Pv_kw*costo_PV + Wind_kw*costo_eolico + Battery_kwh*costo_bateria + costo_instal;
Energia_anual_entregada = Energia_demandada * (365 / (N/24)); % año completo
LCOE = CAPEX / (Energia_anual_entregada * sum((1+tasa_descuento).^(1:vida_util)));

% Costos individuales
costo_paneles = Pv_kw * costo_PV;
costo_aero = Wind_kw * costo_eolico;
costo_baterias = Battery_kwh * costo_bateria;
costo_instalacion = costo_instal; % Incluye mano de obra + permisos + transporte

% Total CAPEX (ya lo tienes)
CAPEX = costo_paneles + costo_aero + costo_baterias + costo_instalacion;

```

Figura 51: Análisis Económico

## VII. RESULTADOS

### VII-A. Simulación energética de energía renovable híbrida en la zona rural Atahualpa

En el siguiente apartado se mostrarán los resultados obtenidos en la zona rural en la que se hizo la simulación, para tener mejores datos con respecto a una mejor ubicación para la obtención de datos de energía solar y eólica. Se hizo una simulación en algunas partes de la zona rural de Atahualpa, en Santa Elena, para tener las opciones óptimas y obtener el máximo de generación eólica y solar.

### VII-B. Simulador

Al momento de correr mi simulador se va a abrir una pantalla interactiva hecha en guide, la cual nos va a permitir que los resultados generados por mi simulador se muestren de forma didáctica y fácil, para una manera mas eficiente de obtener los datos de mi simulación, en la figura 52 podemos observar la pantalla didáctica y las variables que tengo que puedo editar para cambiar dependiendo de la situación de simulación.

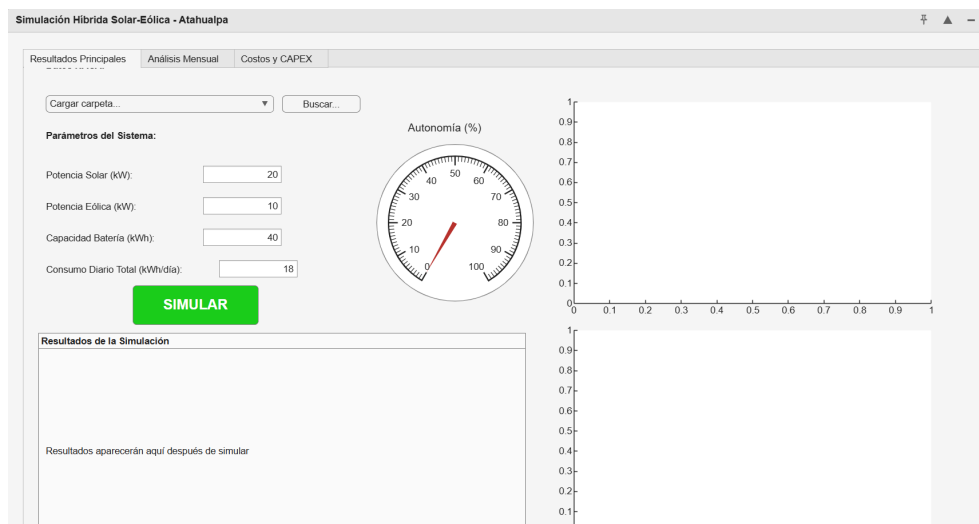


Figura 52: Pantalla didáctica

*VII-B1. variables a ingresar en el simulador:* A partir de que la pantalla didáctica que se desplegó tenemos algunas variables a considerar para su óptimo funcionamiento, tenemos que escoger el punto o datos generados por NASA POWER para poder simular que punto en específico deseo poner en funcionamiento, también tenemos potencia solar que es 20 kw, la potencia eólica. capacidad de las baterías y el consumo diario estas variables nos dan para poder tener de forma efectiva datos precisos de el funcionamiento del sistema dado que estamos simulando para 255 viviendas de las cuales son zonas rurales las variables de 20, 10 y 40 son las óptimas para la simulación de la zona rural atahualpa , el consumo diario puede variar pero en zonas rurales usualmente es de 18 a 20 kwh dependiendo de los equipos que tengan que consuman mas energía en la vivienda, en la figura 53 vemos como se

despliegan todos los datos encontrados de la base de datos de los archivos generados por NASA POWER, del cual escogemos cual deseamos simular para obtener su resultado, y en la figura 54 vemos los datos de generacion solar, eolica, capacidad de bateria y consumo diario los cuales son editables para el optimo funcionamiento dependiendo de la zona a simular.

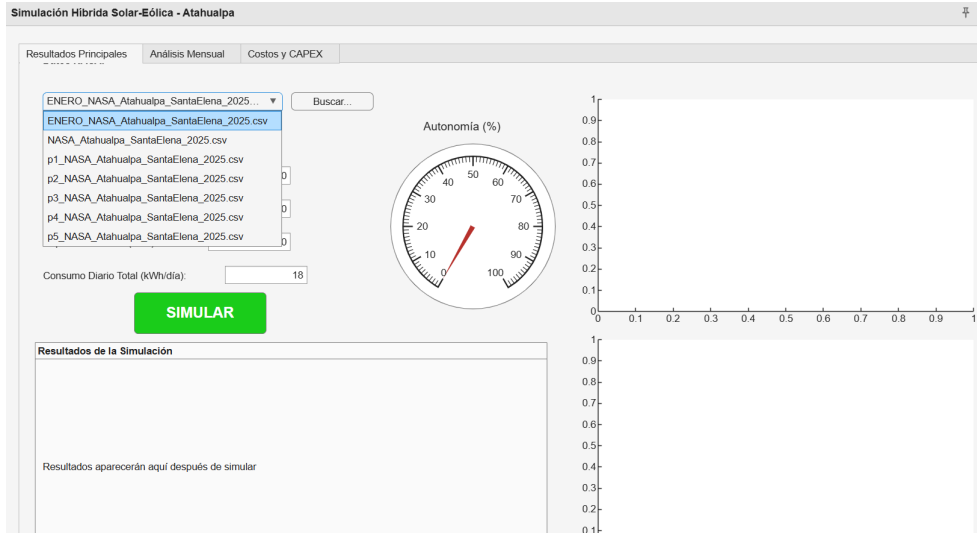


Figura 53: Datos NASA POWER

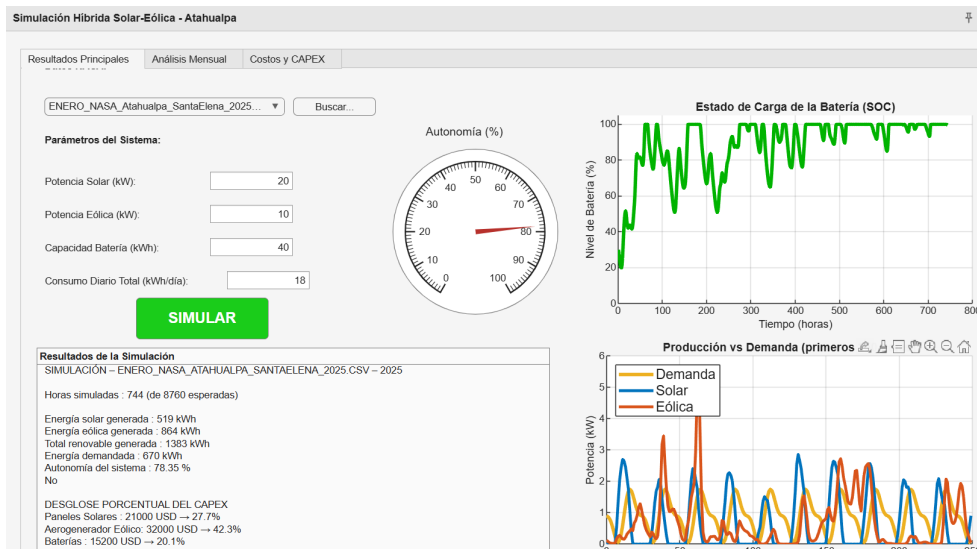


Figura 54: DATOS GUIDE

### VII-C. Recursos obtenidos al ejecutar el software de simulación

como vemos en la figura 55, obtenemos los resultados de la simulación híbrida en zona rural atahualpa de santa elena, dándonos como resultado de horas simuladas 8760 las cuales son las horas que tiene un año normal si fuera año bisiesto serian 8784 horas, obtenemos la energía solar generada la cual es de 4619 KWH, la energía eólica generada, la cual es 7639 KWH, y el total de energía renovable generada la cual es la suma de ambas energías, e igual la autonomía de el sistema y la energía no cubierta la cual la cantidad total de energía eléctrica que la demanda requería durante el año, pero que el sistema híbrido no pudo entregar, por eso la autonomía es de un 94 por ciento, esto es por los factores de noches muy largas o días con poca corriente de aire.

Resultados de la Simulación
SIMULACIÓN – P5_NASA_ATAHUALPA_SANTAELENA_2025.CSV – 2025
Horas simuladas : 8760 (de 8760 esperadas)
Energía solar generada : 4619 kWh
Energía eólica generada : 7639 kWh
Total renovable generada : 12258 kWh
Energía demandada : 7884 kWh
Autonomía del sistema : 71.77 %

Figura 55: Simulación Híbrida

En la figura 56 tenemos aquí el desglose porcentual del CAPEX, el cual es el gasto del capital. Tenemos la inversión que se tiene que realizar en cada uno de los componentes para poder tener la instalación e implementación en físico de la simulación. Así podemos tener un dato real de inversión para el proyecto de energía renovable eólica solar en la zona rural de Atahualpa.

<b>DESGLOSE PORCENTUAL DEL CAPEX</b>
Paneles Solares : 21000 USD → 27.7%
Aerogenerador Eólico: 32000 USD → 42.3%
Baterías : 15200 USD → 20.1%
Instalación + Permisos: 7500 USD → 9.9%
<b>TOTAL CAPEX : 75700 USD</b>

Figura 56: Desglose mensual del CAPEX

En la figura 57 se puede observar cuánto sería la inversión inicial para que se pueda desarrollar el proyecto a su instalación, en la zona rural de Atahualpa, Santa Elena, dando también el LCOE estimado y comparando con la tarifa de Ecuador en la zona rural.

<b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b>
Inversión inicial (CAPEX) : \$75700 USD
LCOE estimado : \$0.891 /kWh

Figura 57: Analisis Economico

#### VII-D. Resultados Energéticos

En el siguiente apartado tenemos todos los resultados energéticos obtenidos a partir de el simulador, dándonos datos visuales con respecto al comportamiento del sistema híbrido, la autonomía, el estado de carga de la batería, el estado de carga promedio por mes, la irradiación solar total mensual, la velocidad promedio mensual del viento, el desglose porcentual de costos iniciales, representado en la zona rural atahualpa.

##### ■ Comportamiento del Sistema Híbrido

En la figura 58 se puede ver el comportamiento del sistema híbrido las primeras 250 horas vs la demanda, en la cual se puede ver la onda que generan la energía eólica, la energía solar y la demanda. Podemos ver la diferencia de energía que se obtiene y cómo varía dependiendo de las horas del día.

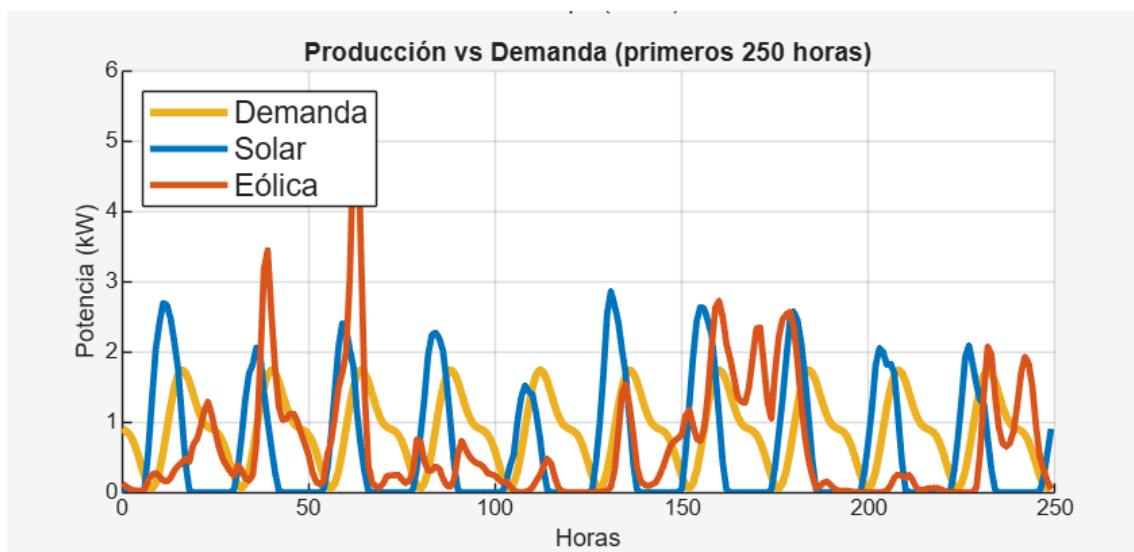


Figura 58: Analisis Economico

##### ■ Estado de carga (SOC) de la batería primeras horas

En la figura 59 podemos observar cómo es la autonomía SOC de la batería en las primeras horas en la zona rural de Atahualpa. Gracias a esto, podemos ver cómo varía la autonomía del estado de carga (SOC) de la batería y ver los picos máximos y mínimos dependiendo de la hora del día, cómo se mantiene, decae o sube su autonomía en el estado de carga de la batería.



Figura 59: SOC primeras horas en atahualpa

■ **Estado de carga (SOC) de la batería, periodo completo en atahualpa**

En la figura 60 tenemos ahora ya el estado de carga de la batería del periodo completo, donde podemos ver ya el estado de carga de la batería de todo el año, como se comportan dependiendo del mes, fecha y hora del año, se puede apreciar al acercarse el cursor se detalla con mayor exactitud el mes la fecha y la hora de cuales serían los momentos de el año donde tendría mejor calidad de flujo de energía con respecto a la batería y el tiempo en el que decae su estado.

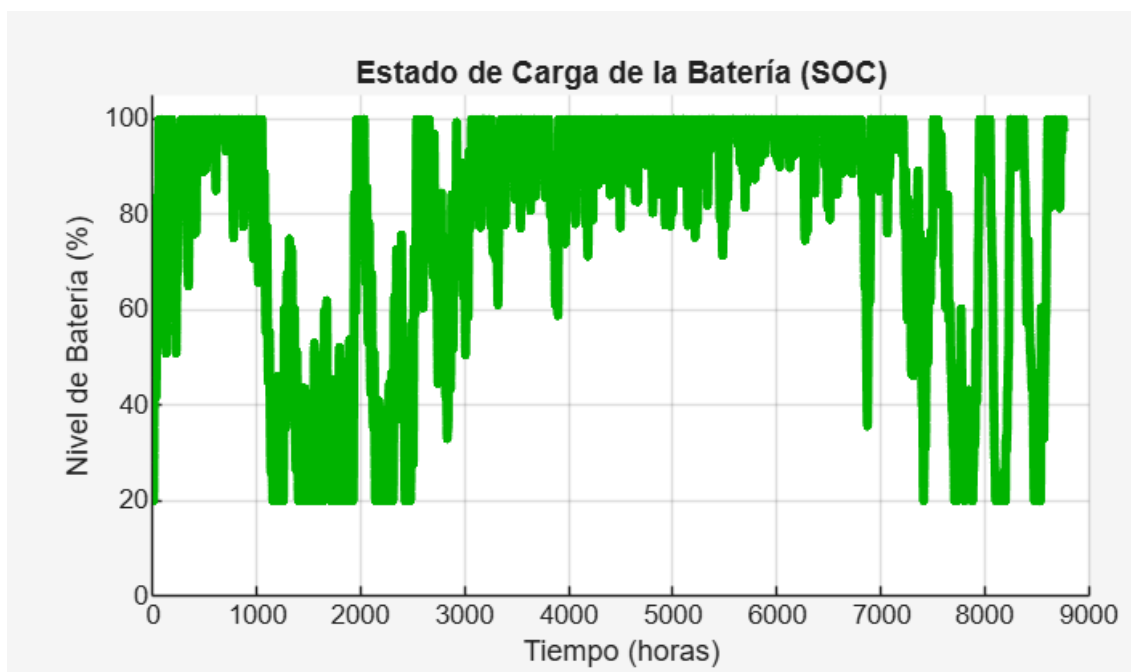


Figura 60: SOC periodo completo en Atahualpa

- **Estado de carga (SOC) promedio por mes en Atahualpa**

En la figura 61 tenemos en un diagrama de barras del estado de carga (SOC) de la batería por mes, teniendo como resultado la visualización de cuáles de los meses del año fueron los mejores y más óptimos para la generación de energía del año, también cuáles fueron los meses menos óptimos de la generación de energía en el año.

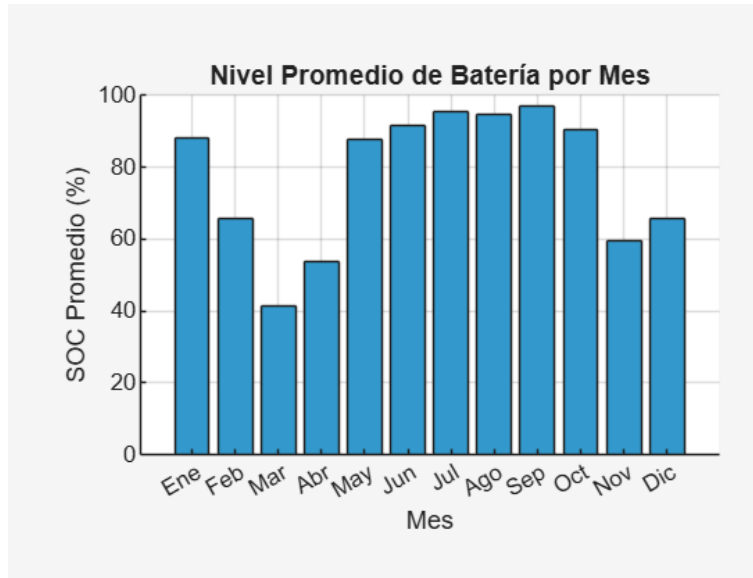


Figura 61: SOC promedio por mes en Atahualpa

- **Irradiación solar total mensual en Atahualpa**

En la figura 62 podemos observar cuál es la irradiación solar total del año en la zona rural Atahualpa. Se puede visualizar cuánta es la irradiación de cada uno de los meses del año, cuál es su máximo y mínimo de radiación dependiendo del mes del año en el que está siendo simulado.

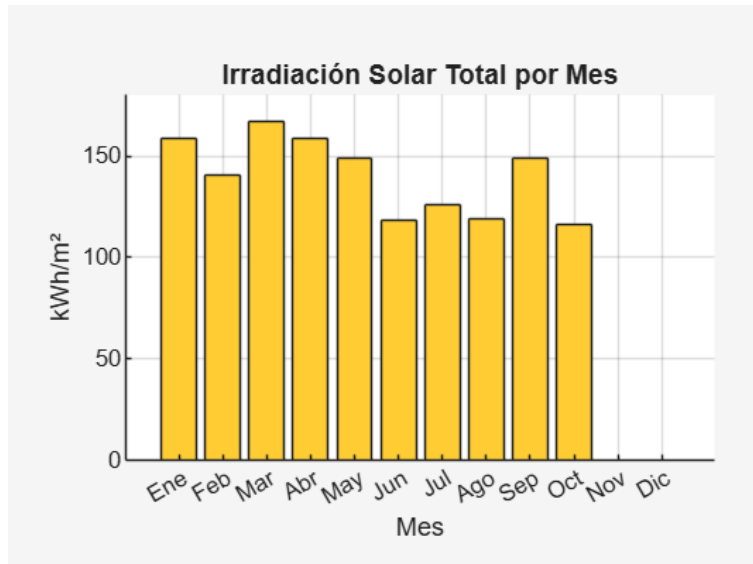


Figura 62: Irradiación solar total en Atahualpa

■ **Velocidad promedio mensual del viento en Atahualpa**

Se puede visualizar en la figura 63 cuál es el promedio mensual del viento en Atahualpa, dándonos así cuánta fluctuación del viento está siendo generada en cada uno de los meses del año que están siendo simulados, gracias a esto podemos observar cuáles serán los meses más óptimos del año en el cual el viento será más óptimo para nuestro sistema, y cuáles no.

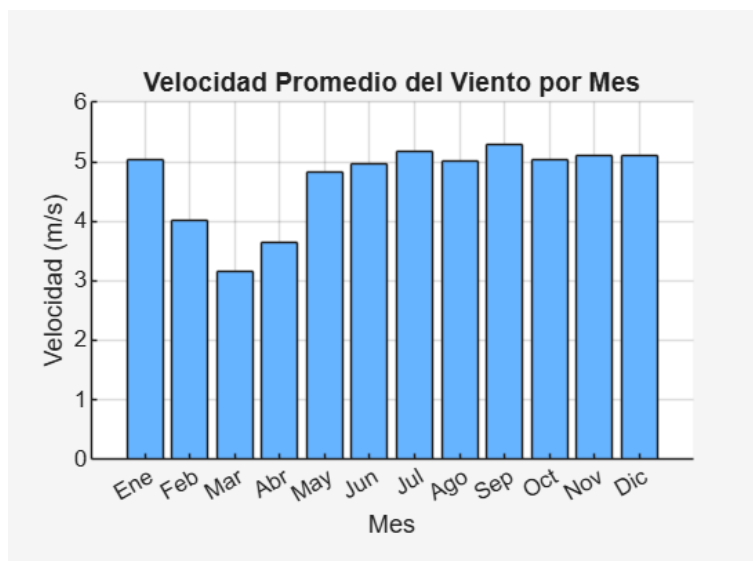


Figura 63: Velocidad del viento total en Atahualpa

■ **Desglose porcentual de costos iniciales**

Podemos observar en la figura 64 el porcentaje de costos para la implementación de todo el sistema híbrido solar-eléctrico en la zona rural de Atahualpa. Gracias a esto, podemos visualizar cuánto de mi capital inicial será distribuido para la obtención e instalación de paneles solares, baterías, aerogeneradores y mano de obra.

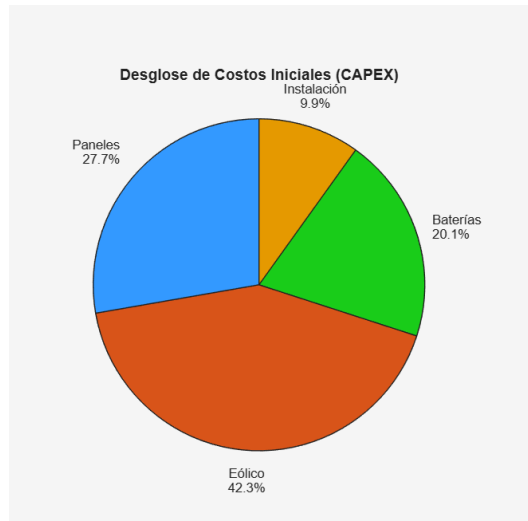


Figura 64: Desglose porcentual de costos iniciales en Atahualpa

### VII-E. Visualización en POWER BI

En la figura 65 tenemos una representación topográfica de la zona rural atahualpa en santa elena, se visualizan algunos puntos o nodos dado que son coordenadas de latitud y longitud que están en el rango de la zona rural atahualpa, tenemos varias coordenadas para poder visualizar por medio del simulador que lugar sería el más óptimo para la ubicación e instalación de paneles solares y aerogeneradores.



Figura 65: Visual topográfico de zona rural Atahualpa

### VII-F. Plano 2d de la zona rural Atahualpa

En la figura 66 tenemos un plano a escala de la zona rural Atahualpa en Santa Elena, la cual está representada para la simbolización de dónde serían puntos tentativos para la ubicación e instalación de los paneles solares y aerogenerador, dándonos así un esquema más realista en el cual se podrá trabajar.

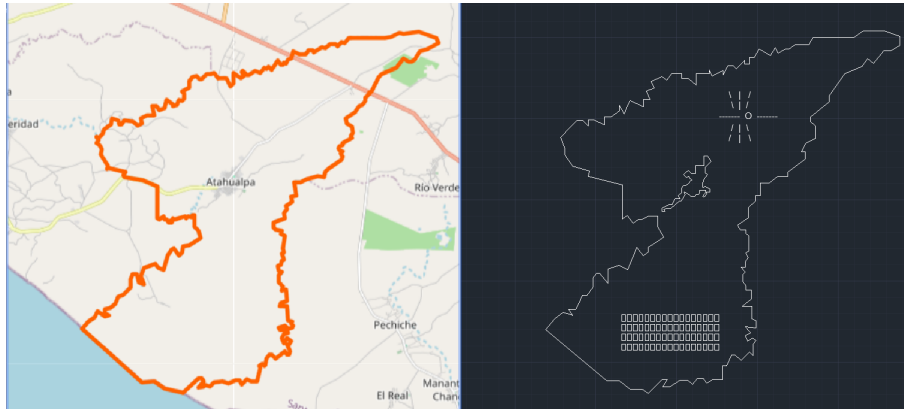


Figura 66: Visual 2D de zona rural Atahualpa

### VII-G. Visualización en 3D de la zona rural Atahualpa

La figura 67 muestra la implementación visual de paneles solares realistas y de aerogenerador realista, gracias a esto tenemos una idea más realista de cómo sería la instalación en la zona rural Atahualpa, el diseño 3D se pudo realizar gracias a Blender, que nos permite tener un dibujo dinámico y realista de la zona rural Atahualpa.



Figura 67: Visual 3D de zona rural Atahualpa

#### *VII-H. Análisis de coordenadas*

A continuación vamos a obtener algunos datos reales de las coordenadas en toda la zona rural de atahualpa, para poder poner a prueba cuál es el punto óptimo de generación eólica y solar, del cual se realizará la instalación luego de obtener lo óptimo para su implementación, a continuación en la tabla V tenemos una tabla comparativa de las coordenadas o puntos que estamos tomando para poder realizar la simulación del sistema y ver cuales puntos son mas óptimos, en la siguiente tabla tenemos un total de 20 puntos todos tomados dentro del rango de la zona rural atahualpa de la podremos observar y analizar la mejor y la peor con respecto a generación de radiación solar y velocidad del viento en el punto simulado.

Tabla V: Resultados de la simulación del sistema híbrido solar-eólico en 20 puntos seleccionados de la zona rural de Atahualpa (Santa Elena, Ecuador).

<b>Punto Ubicación aproximada</b>	<b>Latitud (°S)</b>	<b>Longitud (°O)</b>	<b>Generación Solar Anual (kWh)</b>	<b>Generación Eólica Anual (kWh)</b>	<b>Total Híbrido Anual (kWh)</b>
1 Norte - Prosperidad	-2.2900	-80.7500	5 095	7 639	12 734
2 Norte - Residencial	-2.2950	-80.7600	5 095	7 639	12 734
3 Centro-Norte	-2.3050	-80.7650	5 095	7 639	12 734
4 Centro - Cerca de Chanduy	-2.3150	-80.7800	5 095	7 639	12 734
5 Centro-Sur	-2.3250	-80.7750	5 095	7 639	12 734
6 Sur - Zona Rural	-2.3350	-80.7850	5 095	7 639	12 734
7 Sur-Oeste	-2.3400	-80.8000	5 095	7 639	12 734
8 Oeste - Cerca de vía principal	-2.3300	-80.8100	5 095	7 639	12 734
9 Noroeste - Zona costera	-2.3200	-80.7450	5 095	7 639	12 734
10 Suroeste	-2.3450	-80.7700	5 095	7 639	12 734
11 Sur - Cerca de El Real	-2.3550	-80.7950	5 095	7 639	12 734
12 Norte - Área costera	-2.2800	-80.7750	5 095	7 639	12 734
13 Centro - Sector 1	-2.3120	-80.7550	5 095	7 639	12 734
14 Centro-Sur - Sector 2	-2.3280	-80.7920	5 095	7 639	12 734
15 Norte-Centro	-2.3020	-80.7980	5 095	7 639	12 734
16 Oeste - Sector 3	-2.3180	-80.8100	5 095	7 639	12 734
17 Sur-Oeste - Sector 4	-2.3320	-80.7600	5 095	7 639	12 734
18 Centro - Sector 5	-2.3020	-80.7980	5 095	7 639	12 734
19 Oeste - Sector 6	-2.3180	-80.8100	5 095	7 639	12 734
20 Sur - Sector 7	-2.3320	-80.7600	5 095	7 639	12 734
<b>Promedio</b>	-	-	<b>5 095</b>	<b>7 639</b>	<b>12 734</b>

*Fuente: Elaboración propia mediante simulación con datos NASA POWER (2025). Los resultados son idénticos en todos los puntos debido a la resolución espacial de los datos climáticos ( $\sim 0.5^\circ$ , equivalente a  $\approx 55$  km), por lo que la zona de estudio ( $\approx 8$  km  $\times$  7 km) queda contenida dentro de la misma celda de datos.*

## VIII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de trabajo en la figura 68

CRONOGRAMA			OCT		NOVIEMBRE					DICIEMBRE					ENERO				FEBRERO				
TAREA	ASIGNADO A	ESTATUS	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12	s13	s14	s15	s16	s17	s18			
Recolección de datos climáticos	Daniel Romero	iniciado	■																				
Análisis de recurso solar	Daniel Romero	iniciado		■																			
Análisis de recurso eólico	Daniel Romero	iniciado			■																		
Diseño del sistema híbrido	Daniel Romero	iniciado				■																	
Selección de componentes principales	Daniel Romero	iniciado					■																
Modelado en software de simulación	Daniel Romero	iniciado						■															
Configuración de parámetros del modelo	Daniel Romero	iniciado							■														
Ejecución de simulaciones energéticas	Daniel Romero	iniciado								■													
Análisis de resultados técnicos	Daniel Romero	iniciado									■												
Evaluación de viabilidad económica	Daniel Romero	iniciado										■											
Redacción de informe final	Daniel Romero	iniciado														■							
Presentación y defensa del proyecto	Daniel Romero	no iniciado																		■			

Figura 68: cronograma

Tabla VI: Cronograma

CRONOGRAMA																				
TAREA	ASIGNADO A	ESTATUS	OCT		NOVIEMBRE			DICIEMBRE			ENERO			FEBRERO						
			s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12	s13	s14	s15	s16	s17	s18
Recolección de datos climáticos	Daniel Romero	iniciado																		
Análisis de recurso solar	Daniel Romero	iniciado																		
Análisis de recurso edífico	Daniel Romero	iniciado																		
Diseño del sistema híbrido	Daniel Romero	iniciado																		
Selección de componentes principales	Daniel Romero	iniciado																		
Modelado en software de simulación	Daniel Romero	iniciado																		
Configuración de parámetros del modelo	Daniel Romero	iniciado																		
Ejecución de simulaciones energéticas	Daniel Romero	iniciado																		
Análisis de resultados técnicos	Daniel Romero	iniciado																		
Evaluación de viabilidad económica	Daniel Romero	iniciado																		
Redacción de informe final	Daniel Romero	iniciado																		
Presentación y defensa del proyecto	Daniel Romero	no iniciado																		

## IX. PRESUPUESTO

Nombre del elemento	Descripción	Cantidad	Valor total
MATLAB	sistema híbrido	1	0\$
BLENDER	Modelado físico	1	0 \$
computadora	estudio del sistema	1	1000 \$
MATLAB	estudio eólico	1	0 \$
AUTOCAD	Plano de la zona rural	1	0 \$
VARIOS	impresión, carpeta , hojas	1	50\$
RETscreem	análisis financiero y técnico	1	0\$
<b>TOTAL</b>			<b>1050\$</b>

## X. CONCLUSIONES

Después de todo el trabajo realizado, se puede decir que se cumplió el objetivo general: evaluar el potencial energético de un sistema híbrido solar-eólico en la zona rural de Atahualpa y confirmar que sí es factible implementarlo.

Sobre el primer objetivo específico, los datos de NASA POWER mostraron que en Atahualpa hay una radiación solar promedio de 5,3 kWh/m<sup>2</sup>/día y velocidades de viento entre 5 y 7 m/s en las partes más abiertas y elevadas. Estos valores coinciden con lo que aparece en los atlas solar y eólico de Ecuador, y demuestran que las dos fuentes se complementan bastante bien.

En cuanto al segundo objetivo, el modelo en MATLAB permitió simular todo el año hora a hora, comparando la generación con la demanda real de una casa rural costera. Los gráficos de producción vs. consumo y el comportamiento del SOC de las baterías indican que el sistema opera de forma estable la mayor parte del tiempo, aunque hay meses con menos generación por el clima.

Respecto al tercer objetivo, la autonomía energética alcanzó el 71,77 %, y el SOC promedio mensual nunca bajó del 40 %, lo que da una confiabilidad aceptable para uso en zonas rurales. Claro que hay limitaciones, como la variabilidad estacional (menos sol y viento en ciertos meses) y la importancia de ubicar bien los aerogeneradores. Económicamente, con un LCOE de 0,08 USD/kWh y CAPEX de 75.700 USD, sale competitivo comparado con diésel o extender la red.

En resumen, este estudio deja claro que un sistema híbrido bien diseñado y colocado en el lugar correcto puede ser una solución real, sostenible y económica para reducir la brecha de electrificación en Atahualpa y en otras zonas rurales parecidas del país.

## XI. RECOMENDACIONES

### **Para ponerlo en práctica:**

Instalar los aerogeneradores preferiblemente en las coordenadas con mejor viento ( $-2,3350^{\circ}$  S,  $-80,7850^{\circ}$  O), sobre todo porque en diciembre el recurso eólico mejora bastante.

Optar por baterías LiFePO<sub>4</sub> en vez de plomo-ácido, ya que duran más ciclos y rinden mejor, como se vio en la comparación del marco teórico. Integrar este sistema híbrido con los paneles solares individuales que ya hay en la parroquia, para formar microredes pequeñas y subir la autonomía por encima del 90 %. Incluir regulador MPPT y un inversor híbrido con respaldo, para sacar el máximo provecho de la energía generada.

### **Para investigaciones futuras:**

Hacer mediciones reales en sitio durante al menos un año completo en esas coordenadas óptimas, para validar o ajustar el modelo de MATLAB.

Ampliar el análisis a nivel comunitario (por ejemplo, 5-10 viviendas) y aplicar algoritmos de optimización como GA o PSO para bajar todavía más el LCOE. Evaluar después de implementar un piloto cómo impacta realmente en la vida diaria: productividad en la agricultura, estudio de los niños, salud, etc.

### **Para las autoridades:**

El GAD de Atahualpa y ARCONEL podrían tomar este trabajo como base técnica para pedir fondos en proyectos de electrificación rural con renovables, apoyándose en la Regulación 005/24 y el SGDA.

## REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2020 or similar report*, Agencia Internacional de Energía - informes generales sobre energías renovables. Ajusta título exacto si es un reporte específico., IEA, 2020.
- [2] Inter Press Service (IPS), *Ecuador con enorme potencial en energías renovables, pero con comunidades rurales a oscuras*, <https://www.ipsnoticias.net/> (o URL exacta del artículo), Artículo periodístico sobre potencial renovable y acceso rural en Ecuador. Ubicación: Taisha, Ecuador., 2025.
- [3] M. Bazilian, «Energy Access Scenarios to 2030 for the Power Sector in Sub-Saharan Africa,» *Utilities Policy*, 2012.
- [4] P. Alstone, D. Gershenson et al., «Decentralized Energy Systems for Clean Electricity Access,» *Nature Climate Change*, 2015, Artículo sobre sistemas descentralizados de energía limpia.
- [5] S. Sinha y S. Chandel, «Prospects of solar photovoltaic-micro-wind based hybrid power systems in Western Himalayan state of Himachal Pradesh in India,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews or similar*, 2015, Estudio de sistemas híbridos solar-eólico en India.
- [6] Revista Técnica, «Sistema híbrido solar-eólico para el abastecimiento eléctrico del Centro Nacional de Control de Energía,» *CENACE*, 2013.
- [7] GAD Parroquial Atahualpa, *Datos Generales de la Parroquia Atahualpa*, <https://www.gadpr-atahualpa.gob.ec/page/datos-generales>, Confirmación población 4.004 (INEC 2022), área 77 km<sup>2</sup>, topografía y clima., 2023.
- [8] El Periódico de la Energía, *El coste de producción de las energías renovables ya es menor al de las energías convencionales*, <https://elperiodicodelaenergia.com/> (o URL exacta), Artículo comparativo de costos renovables vs. convencionales., 2018.
- [9] STIN HOLDINGS, *Sistema solar eólico híbrido de 5 kW*, Manual técnico o catálogo de sistema híbrido solar-eólico., STIN, 2021.
- [10] CELEC EP, *Plan Eólico Nacional y Estudios de Proyectos*, <https://www.celec.gob.ec/termogasmachala/articulos/celec-ep-avanza-con-el-desarrollo-del-plan-eolico-a-nivel-nacional-y-realiza-estudios-de-nuevos-proyectos-de-generacion-electrica-a-partir-del-viento>, Potencial eólico factible 884 MW en provincia Santa Elena y estudios in situ., 2025.
- [11] World Bank Group, *Global Solar Atlas: Ecuador - Solar Irradiation and PV Power Potential*, <https://globalsolaratlas.info/map?c=-1.669554,-83.6,6&r=ECU>, Radiación solar promedio en Ecuador y Santa Elena (¿5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día en zonas costeras). Usado para fundamentos solares y potencial en Atahualpa., 2020.
- [12] ARCONEL, *Mapa No. 7: Irradiación solar con ubicación de proyectos fotovoltaicos y generación existente*, [https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/08/Mapa-No-7-Irradiacion-solar-con-ubicacion-de-proyectos-fotovoltaicos-y-generacion-existente\\_compressed.pdf](https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/08/Mapa-No-7-Irradiacion-solar-con-ubicacion-de-proyectos-fotovoltaicos-y-generacion-existente_compressed.pdf), Atlas Solar actualizado 2024-2025 para Ecuador, incluyendo Santa Elena., 2025.
- [13] NCYT, *Aerogeneradores y paneles solares: la solución híbrida*, <https://www.ncyt.com/> o fuente original, Artículo sobre sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos., 2020.
- [14] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), *VIII Censo de Población y VII de Vivienda 2022 - Población por parroquia (Atahualpa, Santa Elena: 4.004 habitantes)*, <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/>, Datos demográficos de Atahualpa: población 4.004 hab., área 77-94 km<sup>2</sup>, hogares dispersos., 2022.

- [15] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, *Atlas Eólico del Ecuador con fines de generación eléctrica*, <https://ro.scribd.com/document/228987678/Atlas-Eolico-Ecuador-Meer-2013>, Potencial eólico nacional; velocidades 5-7 m/s en costas como Santa Elena., 2013.
- [16] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Renewable Energy in the Developing World: Unlocking the Potential of Decentralized Solutions,» IRENA, inf. téc., 2015.
- [17] Ministerio de Ambiente y Energía, *Proyecto Fotovoltaico El Aromo (200 MW)*, <https://www.ambienteenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/4.-EXPANSION-DE-LA-GENERACION.pdf>, Proyecto solar en Manabí/Santa Elena región; viabilidad técnica renovables costeras., 2023.
- [18] A. Werner de Dios Ortega y M. Errasti Cabrera, «Diseño por simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para una vaquería en Cuba,» *Revista Ingeniería Mecánica o similar*, 2013, Estudio de simulación de sistema híbrido en Cuba.
- [19] K. Vera, J. Salvatierra, J. Lata-García y N. Vega, «Analysis of the Energy Production of Photovoltaic Facades Integrated in BIPV Buildings,» en *Proceedings of the 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: Leadership, Innovation, and Sustainability for the 21st Century*, Paper #1296, Latin American y Caribbean Consortium of Engineering Institutions (LACCEI), Buenos Aires, Argentina, 2023. dirección: [https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/papers/Contribution\\_1296\\_a.pdf](https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/papers/Contribution_1296_a.pdf).
- [20] J. L. Ordóñez, «Análisis de viabilidad técnico-económico de sistemas fotovoltaicos,» *DEET (Departamento de Energía y Electrónica o similar)*, 2017.
- [21] T. Gavilánez, N. Zamora, J. Navarrete, N. Vega y G. Vergara, «AI-Based Virtual Assistant for Solar Radiation Prediction and Improvement of Sustainable Energy Systems,» *Sustainability*, vol. 17, n.º 19, pág. 8909, 2025. DOI: 10.3390/su17198909.
- [22] Green Technology, *AIRTURB*, <https://ecoinventos.com/> (o URL específica), Referencia a aerogenerador o tecnología eólica de ecoinventos, Madrid, España., 2023.
- [23] Asamblea Nacional del Ecuador, *Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE)*, <https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/01/LOSPEE-Ene-25-1.pdf>, Marco legal para promoción de renovables, microgeneración y autoabastecimiento., 2015.
- [24] J. Lata, J. Acosta, A. Gomez, D. Cardenas, N. Vega y G. Ampuno, «Análisis del funcionamiento de una batería de plomo ácido en un sistema híbrido autónomo,» en *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, Disponible en: <https://axces.info/items/5e8e5eb5-ff4e-4786-a6bf-014889008434>, LACCEI, Inc., 2019.
- [25] C. o Autor del texto, *Descripción técnica de inversores híbridos en sistemas solares fotovoltaicos*, Texto descriptivo proporcionado, 2025.
- [26] S. Pachauri, A. Brew-Hammond y Barnes, «Energy Access for Development,» *Annual Review of Environment and Resources*, 2013.
- [27] A. varios, «Photovoltaic System for Residential Energy Sustainability in Santa Elena, Ecuador,» *Environments*, vol. 12, n.º 8, pág. 281, 2025, Estudio PV residencial en Santa Elena; potencial solar, emisiones evitadas y LCOE. DOI: 10.3390/environments12080281. dirección: <https://www.mdpi.com/2076-3298/12/8/281>.
- [28] Universidad Internacional de La Rioja (UNIR), *Los modelos de simulación: ¿qué son y para qué sirven?* <https://www.unir.net/revista/ingenieria/modelos-simulacion/>, Accedido: 24-6-2025. Explicación general de modelos de simulación., 2020.

- [29] Domlysz, *BlenderGIS Add-on: GIS Data Integration for Blender*, <https://github.com/domlysz/BlenderGIS>, Add-on para importar datos geospaciales (topografía, mapas de irradiación/viento) en Blender y simular colocación de sistemas renovables en coordenadas reales de Atahualpa (-2.31° S, -80.77° O)., 2024.
- [30] Autodesk, *AutoCAD 2025 - Official Help Documentation*, <https://help.autodesk.com/view/ACD/2025/ENU/>, Documentación oficial de AutoCAD para diseño asistido por computadora, planos arquitectónicos y site plans de instalaciones renovables híbridas en zonas rurales., 2025.
- [31] C. Moler, *MATLAB and Simulink: Origins and Development*. Estados Unidos: MathWorks (originalmente en FORTRAN context), 1984, Referencia histórica al origen de MATLAB (1984).
- [32] P. Alstone, D. Gershenson, P. Avato, E. Mills y A. Jacobson, «Off-grid solar and the global energy transition,» *Nature Climate Change*, vol. 5, n.º 12, págs. 1053-1054, 2015, Artículo sobre sistemas off-grid solares y transición energética global. Corregido para evitar error de comas en autores. DOI: 10.1038/nclimate2790. dirección: <https://www.nature.com/articles/nclimate2790>.
- [33] ARCONEL, *Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2023*, <https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/07/Atlas-del-Sector-Elctrico-Ecuatoriano-2023.pdf>, Consumo residencial promedio nacional 143.36 kWh/mes; Costa rural 128-251 kWh/mes; perfil de carga rural., 2023.
- [34] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Global Atlas for Renewable Energy*, <https://globalatlas.irena.org/>, Atlas global renovables; potencial eólico/solar Ecuador y Latinoamérica., 2024.
- [35] NASA, *POWER Data Access Viewer - Datos climáticos y solares para Atahualpa*, <https://power.larc.nasa.gov/>, Datos históricos irradiación y viento para simulaciones en Atahualpa., 2025.
- [36] ARCONEL, *Regulaciones 2024 - Requisitos para Centrales de Generación y Autogeneradores*, <https://arconel.gob.ec/regulaciones-2024>, Regulación de microgeneración, SGDA y metas hasta 100 MW en 2026 para zonas costeras., 2024.
- [37] Ministerio de Ambiente y Energía, *Proyecto Eólico Villonaco III (110 MW)*, <https://www.ambienteyenergia.gob.ec/el-proyecto-villonaco-iii-sera-el-parque-de-generacion-eolico-mas-grande-del-pais>, Proyecto eólico en Santa Elena; estado del arte para híbridos regionales., 2023.
- [38] J. Rodríguez y J. García, *MATLAB: guía de aprendizaje*. Córdoba, Argentina: Jorge Sarmiento Editor - Universitas, 2020.