



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**TITULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**USO DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA REDUCIR COSTOS  
OPERATIVOS DE BOMBEO DEL POLIDUCTO LIBERTAD-  
PASCUALES**

**AUTOR**

**ING. JOSÉ ANDRÉS ROSALES GONZABAY**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Previo a la obtención del grado académico en  
MAGÍSTER EN PETRÓLEOS**

**TUTOR**

**ING. JORGE PAUL ORDOÑEZ ANDRADE, PhD.**

**La Libertad, Ecuador**

**Año 2025**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO  
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**Econ. Álvarez Acosta Roxana, PhD.  
COORDINADORA DEL  
PROGRAMA**

---

**Ing. Ordoñez Andrade Jorge, PhD.  
TUTOR**

---

**Ing. Sanclemente Ordoñez Eddy, PhD.  
DOCENTE  
ESPECIALISTA 1**

---

**Ing. Iturralde Kure Armando, Mgtr.  
DOCENTE  
ESPECIALISTA 2**

---

**Ab. Rivera González María, Mgtr.  
SECRETARIO GENERAL  
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por JOSÉ ANDRÉS ROSALES GONZABAY, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Petróleos.

**TUTOR**

---

**ING. JORGE PAUL ORDOÑEZ ANDRADE, PhD.**

**26 días del mes de agosto del año 2025**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, JOSÉ ANDRÉS ROSALES GONZABAY**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación, USO DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA REDUCIR COSTOS OPERATIVOS DE BOMBEO DEL POLIDUCTO LIBERTAD-PASCUALES previo a la obtención del título en Magister en Petróleos, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 26 días del mes de agosto del año 2025

**EL AUTOR**

**ING. JOSÉ ANDRÉS ROSALES GONZABAY**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO**

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado USO DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA REDUCIR COSTOS OPERATIVOS DE BOMBEO DEL POLIDUCTO LIBERTAD-PASCUALES, presentado por el estudiante, JOSÉ ANDRÉS ROSALES GONZABAY fue enviado al Sistema Antiplagio URKUND, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 4%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

 CERTIFICADO DE ANÁLISIS magister		
<b>TESIS MAESTRÍA - JOSÉ ROSALES (final corregido 1)</b>		
<b>4%</b> Textos sospechosos		<b>4% Similitudes</b> 0% similitudes entre comillas 0% entre las fuentes mencionadas <b>3% Idiomas no reconocidos (ignorado)</b> <b>29% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)</b>
Nombre del documento: TESIS MAESTRÍA - JOSÉ ROSALES (final corregido 1).docx ID del documento: a822a4c3265a0db649129740ac8fc4831d80bb5b Tamaño del documento original: 4,09 MB	Depositante: JORGE PAUL ORDOÑEZ ANDRADE Fecha de depósito: 20/8/2025 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 20/8/2025	Número de palabras: 8859 Número de caracteres: 61.049

**TUTOR**

**ING. JORGE PAUL ORDOÑEZ ANDRADE, PhD.**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **JOSÉ ANDRÉS ROSALES GONZABAY**

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de informe de investigación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

La Libertad, a los 26 días del mes de agosto del año 2025

**EL AUTOR**

---

**ING. JOSÉ ANDRÉS ROSALES GONZABAY**

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Estado ecuatoriano por brindarme la oportunidad de acceder a esta formación de posgrado a través del programa de becas. Gracias a este valioso apoyo, pude continuar con mi desarrollo profesional y avanzar en el cumplimiento de mis metas personales y académicas.

Extiendo también un agradecimiento especial a las autoridades de la Universidad Estatal Península de Santa Elena por permitirme formar parte de la IV Cohorte de la Maestría en Petróleo. Esta experiencia contribuyó de manera significativa a mi crecimiento profesional.

De manera muy especial, agradezco al Ing. Jorge Ordoñez, PhD., tutor de esta tesis. Su acompañamiento, conocimientos y disposición para guiarme fueron esenciales para llevar a cabo este trabajo. Más que un tutor, fue un guía cercano, cuyo apoyo y confianza marcaron una gran diferencia en este proceso

*José Andrés, Rosales Gonzabay*

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi esposa y a mis hijos, por estar siempre a mi lado. Su amor, apoyo incondicional y palabras de aliento fueron el motor que necesitaba para alcanzar esta meta.

También a mis padres, ejemplo constante de superación y profesionalismo. Gracias a los valores y la educación que me brindaron, hoy puedo dar un paso más en mi formación profesional.

Y, de manera muy especial, a mi tía Magdalena. Sin su insistencia, ánimo y confianza, no habría formado parte de este proceso. ¡Gracias a sus palabras, lo logré!

*José Andrés, Rosales Gonzabay*

# ÍNDICE GENERAL

<b>TITULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....</b>	<b>I</b>
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....</b>	<b>II</b>
<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>III</b>
<b>DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>IV</b>
<b>CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO .....</b>	<b>V</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>VI</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>VII</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XV</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
Planteamiento de la investigación .....	3
Formulación del problema de investigación.....	4
Objetivo General .....	4
Objetivos Específicos.....	5
Planteamiento hipotético .....	5
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....</b>	<b>6</b>
1.1. Revisión de literatura .....	6
1.2. Desarrollo teórico .....	7
1.3. Transporte de combustibles por poliductos .....	7
1.4. Energía renovable como alternativa de sistemas de bombeo.....	7
1.3. Viabilidad técnica y económica de sistemas híbridos.....	8

1.4.	Marco normativo y transición energética en Ecuador.....	8
1.5.	Teoría de la sostenibilidad energética .....	9
1.6.	Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	10
1.7.	Red de Poliductos de EP PETROECUADOR.....	10
1.8.	Poliducto Libertad-Pascuales .....	12
1.8.1	Estación de Bombeo Cabecera “La Libertad” .....	12
1.8.2	Estación Reductora Pascuales.....	13
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....</b>		<b>15</b>
2.1.	Contexto de la investigación .....	15
2.2.	Diseño y alcance de la investigación .....	16
2.2.1	Diseño de la investigación .....	16
2.2.2	Alcance de la investigación .....	16
2.3.	Tipo y métodos de investigación.....	17
2.3.1	Tipo de investigación.....	17
2.3.2	Métodos de investigación .....	17
2.4.	Población y muestra.....	18
2.4.1.	Población de estudio.....	18
2.4.2.	Muestra.....	18
2.4.3.	Variables.....	19
2.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	20
2.6.	Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.....	21
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>23</b>
3.1.	Análisis del consumo y costo energético del sistema de bombeo del poliducto Libertad-Pascuales para el periodo 2020–2023.....	23
3.2	Evaluación del potencial de generación de energías renovables en el área de operación. ....	24
3.3	Proyección del diseño conceptual de implementación energética renovable en función de su aplicabilidad para la estación de bombeo del poliducto Libertad-Pascuales. .	29
3.3.1.	Descripción general del sistema fotovoltaico y de almacenamiento para sistemas de bombeo .....	30

3.3.2.	Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía .....	36
3.3.3.	Tipología del sistema (alternativas del diseño conceptual).....	39
3.3.4.	Gestión y Automatización .....	39
3.4.	Estimación económica de la viabilidad del proyecto .....	40
3.5	Discusión de resultados. ....	52
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>53</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>55</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>56</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>61</b>
<b>Anexo 1: Poliductos y Terminales de EP PETROECUADOR.....</b>		<b>61</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Red de Poliductos de EP PETROECUADOR.....	11
<b>Tabla 2.</b> Consumo energético promedio del poliducto Libertad-Pascuales.....	23
<b>Tabla 3.</b> Comparación de recursos energéticos renovables. ....	29
<b>Tabla 4.</b> <i>Resumen de la propuesta técnica</i> .....	40
<b>Tabla 5.</b> <i>Costos estimados de inversión</i> .....	41
<b>Tabla 6.</b> <i>Flujo anual descontado</i> .....	43
<b>Tabla 7.</b> <i>Análisis comparativo de flujos descontados</i> .....	46
<b>Tabla 8.</b> <i>Análisis por caso</i> .....	47
<b>Tabla 9.</b> <i>Matriz de decisión multicriterio</i> .....	49
<b>Tabla 10.</b> <i>Resultado final del análisis multicriterio</i> .....	50
<b>Tabla 11.</b> <i>Resultado del análisis de sensibilidad</i> .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Ilustración 1.</b> <i>Esquema de energías renovables principales.</i> .....	8
<b>Ilustración 2.</b> <i>Cabecera Poliducto Libertad-Pascuales</i> .....	13
<b>Ilustración 3.</b> <i>Estación Reductora del Poliducto Libertad-Pascuales</i> .....	14
<b>Ilustración 4.</b> <i>Potencial de generación fotovoltaica del Ecuador</i> .....	25
<b>Ilustración 5.</b> <i>Energía solar de onda corta incidente diaria promedio en Santa Elena</i> 25	
<b>Ilustración 6.</b> <i>Horas de luz natural y crepúsculo en Santa Elena</i> .....	26
<b>Ilustración 7.</b> <i>Salida del sol y puesta del sol con crepúsculo en Santa Elena</i> .....	27

<b>Ilustración 8.</b> <i>Velocidad promedio del viento en Santa Elena</i> .....	28
<b>Ilustración 9.</b> <i>Dirección del viento en Santa Elena</i> .....	29
<b>Ilustración 10.</b> <i>Características de un panel solar monocristalino de 500 W</i> .....	31
<b>Ilustración 11.</b> <i>Inversor solar</i> .....	32
<b>Ilustración 12.</b> <i>Solar tracker</i> .....	32
<b>Ilustración 13.</b> <i>Cable XLPE con cubierta exterior de PVC</i> .....	34
<b>Ilustración 14.</b> <i>Batería modular ST556KWH-250UD</i> .....	38
<b>Ilustración 15.</b> <i>Análisis de sensibilidad por intervalos</i> .....	51

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación analiza la viabilidad técnica y económica de implementar energías renovables para reducir los costos operativos del sistema de bombeo del poliducto Libertad–Pascuales, ubicado en la provincia de Santa Elena, Ecuador. Actualmente, el sistema opera exclusivamente con energía eléctrica de la red, lo que genera altos costos anuales estimados en más de \$240,000. Considerando el elevado potencial de radiación solar de la zona (más de 5.5 kWh/m<sup>2</sup>/día), se plantea la instalación de un sistema fotovoltaico de entre 500 y 700 kWp, acompañado de una solución de almacenamiento con baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO<sub>4</sub>) con capacidad de 2.4 MWh, para cubrir parte de la demanda energética durante horas sin sol. El análisis financiero utiliza el método del Discounted Payback Period (DPI), revelando que el sistema completo (paneles más baterías) no logra recuperar la inversión en un horizonte de 25 años sin incentivos externos, mientras que un sistema fotovoltaico sin almacenamiento, operando en horas solares, alcanza un DPI estimado de 9 a 10 años. El análisis de sensibilidad muestra que una reducción del 30% en el costo de las baterías o un aumento en la tarifa eléctrica a \$0.15/kWh podría mejorar significativamente el DPI del sistema completo. Se concluye que la implementación de un sistema fotovoltaico sin almacenamiento constituye la alternativa más viable a corto plazo, permitiendo reducir costos energéticos y avanzar hacia la sostenibilidad operativa del poliducto, con la opción de expandirse a soluciones híbridas o con almacenamiento en el futuro.

**Palabras claves:** energías renovables, sistemas híbridos, poliducto, huella de carbono.

## ABSTRACT

This research study analyzes the technical and economic viability of implementing renewable energies to reduce the operating costs of the pumping system of the Libertad-Pascuales polyduct, located in the province of Santa Elena, Ecuador. Given the area's substantial solar radiation potential (exceeding 5.5 kWh/m<sup>2</sup>/day), the implementation of a photovoltaic system with a capacity ranging from 500 to 700 kWp is proposed, complemented by a storage solution employing lithium-ferrophosphate batteries (LiFePO<sub>4</sub>) with a capacity of 2.4 MWh, thereby addressing the energy requirements during periods of sunlight scarcity. The financial analysis employs the Discounted Payback Period (DPI) method, revealing that the complete system (consisting of panels and batteries) fails to recover the investment within a 25-year timeframe without external incentives. In contrast, a PV system without storage, operating in solar hours, attains an estimated DPI of 9 to 10 years. The sensitivity analysis indicates that a 30% reduction in battery costs or an increase in the electricity tariff to \$0.15/kWh could substantially enhance the IPR of the entire system. It is concluded that the implementation of a photovoltaic (PV) system without storage is the most viable alternative in the short term. This alternative would allow for a reduction in energy costs and a transition towards operational sustainability of the pipeline. In the future, the option to expand to hybrid solutions or with storage would be available.

**Keywords:** renewable energy, hybrid systems, polyduct, carbon footprint, carbon footprint.

# INTRODUCCIÓN

La transición hacia un modelo energético sostenible ha impulsado la incorporación de energías renovables en las operaciones hidrocarburíferas, tradicionalmente asociadas con combustibles fósiles. Esta adopción responde a la creciente presión por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, optimizar costos y cumplir con estándares ambientales más estrictos (IEA, 2020).

En las operaciones de exploración, producción, transporte y refinación, tecnologías como la energía solar, eólica y el uso de biocombustibles están siendo implementadas para alimentar equipos, reducir el consumo de combustibles fósiles en sitio y minimizar la huella de carbono. Por ejemplo, paneles solares se emplean en plataformas remotas para alimentar sistemas de comunicación o monitoreo, mientras que turbinas eólicas pueden complementar el suministro eléctrico en áreas costeras (ARPEL, 2020).

La integración de renovables no solo mejora el desempeño ambiental, sino que también ofrece ventajas económicas a largo plazo al reducir la dependencia de combustibles tradicionales y estabilizar los costos operativos frente a la volatilidad del mercado. Este enfoque sostenible está transformando la industria hidrocarburífera, demostrando que es posible mantener la producción eficiente mientras se avanza hacia una economía energética más limpia y responsable (Rinkenbach, 2023).

Dentro de este contexto, el poliducto Libertad – Pascuales se seleccionó como caso de estudio por su gran importancia para el abastecimiento estratégico de combustible para la región costa, específicamente en Guayaquil, donde se concentra alrededor del 70% del consumo de combustible a nivel nacional, el cual depende de la infraestructura. Este sistema para el abastecimiento y bombeo demanda de un gran consumo de energía eléctrica que bordea los 2.3 GWh al año, cuyos gastos de operación superan fácilmente los 278 mil dólares, representando una gran porción del gasto total del sistema de transporte de combustible (EP PETROECUADOR, 2023).

Sin embargo, las estaciones de bombeo utilizadas en el sistema dependen principalmente de fuentes de energía convencionales, lo que genera altos costos operativos y una significativa huella de carbono (CYAMBIENTE LTDA., 2022). La integración de energías renovables, como la solar y la eólica, podría ser una solución viable para mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental de estas instalaciones. Este estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica y económica de incorporar energías renovables en las estaciones de bombeo del poliducto Libertad-Pascuales.

### **Planteamiento de la investigación**

El sistema de bombeo del poliducto Libertad–Pascuales constituye un componente crítico para el abastecimiento de combustibles en la región costa del Ecuador. No obstante, su operación demanda un consumo continuo de energía eléctrica proveniente de la red nacional, un promedio de anual de 2.3 millones de kW/h, lo cual representa un costo operativo elevado para la empresa pública encargada del transporte de hidrocarburos, USD 278277 aproximadamente (EP PETROECUADOR, 2023). Este escenario se agrava en contextos de incremento de tarifas eléctricas, interrupciones en el suministro o racionamientos energéticos, afectando la eficiencia y sostenibilidad del servicio (Campaña-Arévalo, 2015).

A pesar del potencial solar y eólico existente en la zona litoral del país, no se ha implementado una estrategia integral para aprovechar estas fuentes en sistemas industriales como los poliductos. La falta de estudios técnicos y económicos que respalden la integración de energías renovables en este tipo de infraestructura limita la toma de decisiones orientadas a la eficiencia energética y la sostenibilidad operativa (Redacción Ecuavisa y Televistazo, 2023).

Frente a esta problemática, evaluar la integración de fuentes de energías renovables fotovoltaicas y eólicas, mismas que se presentan como una estrategia integral que permitirá la reducción de costos operativos y la mejora de la sostenibilidad del sistema de

bombeo. Sin embargo, para aplicar este tipo de soluciones es importante considerar los aspectos técnicos como la carga de estaciones, posibles intermitencias de estas fuentes, sistemas de almacenamiento de energía y de respaldo con el fin de mantener una operatividad continua.

La investigación propuesta tendrá su fundamentación técnica-económica en las simulaciones con RETScreen, y en los indicadores LCOE (Costos Nivelados de Energía), VAN (Valor Actual Neto) y TIR (Tasa Intera de Retorno). Además de incorporarse las comparaciones con experiencias de otros sectores de la región Andina y Latinoamérica en referencia a proyectos de transporte de hidrocarburos. Estas estrategias pretenden proponer modelos viables para la reducción de costos operativos y el fomento de la sostenibilidad ambiental.

### **Formulación del problema de investigación**

El sistema de bombeo del poliducto Libertad – Pascuales en la actualidad depende únicamente del Sistema Interconectado Nacional (SIN) para la alimentación energética de su sistema de transporte de hidrocarburos, mismos que operan con motores eléctrico de inducción de 2400 VCA a una frecuencia de 60 Hz, dos bombas principales de 560 HP y dos bombas Booster de 40 HP. Durante el periodo 2020 – 2023 el consumo de energía eléctrica está bordeando los 2320000 KWh que alcanzan costos anuales cercanos a 278000 dólares, en periodos de estiajes tienen a aumentar considerablemente. Referente a las energías renovables planteadas, la zona de estudio tiene un promedio de 6.0 a 6.8 KWh/m<sup>2</sup>/día de irradiancia y un promedio de velocidad de viento que oscila entre 14.4 y 18.5 Km/h.

### **Objetivo General**

Identificar la viabilidad del uso de energías renovables aplicables en operaciones de bombeo del poliducto Libertad-Pascuales.

## **Objetivos Específicos**

1. Determinar el consumo energético actual de las estaciones de bombeo y sus costos asociados mediante el análisis de la data estadística de operación en el periodo 2020 a 2023.
2. Evaluar el potencial de generación de energías renovables en el área de operación de las estaciones de bombeo mediante datos de irradiación solar y patrones de viento de la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) y levantamiento de datos de campo mediante piranómetro y medidor de velocidad de viento.
3. Proyectar un diseño de implementación energética renovable en función de su aplicabilidad para la estación de bombeo del poliducto Libertad-Pascuales.
4. Estimar la viabilidad económica del proyecto mediante el método DPI (discounted payback period index).

## **Planteamiento hipotético**

¿Es técnica y económicamente viable incorporar sistemas de energía renovable que permitan reducir el consumo de eléctrico de la red nacional y los costos operativos en el bombeo del poliducto Libertad–Pascuales?

# CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

## 1.1. Revisión de literatura

Según los autores (Landron & Herrera, 2021) en su trabajo de investigación para realizar sistemas de bombeos de carácter híbrido, presenta una metodología que evalúa, diseña y optimiza los sistemas eólico y fotovoltaico para bombeos de agua en zonas no interconectadas, específicamente para plantación de banana en áreas periféricas. Mediante simulaciones y técnicas de algoritmos genéticos y optimización heurísticas es posible determinar las configuraciones óptimas para el funcionamiento correcto. La disponibilidad de los sistemas presentada fue del 16.5% con costos de energía aproximado de 8.167 dólares por cada Kilo Watt hora. Es importante mencionar que dentro de este proyecto la generación fotovoltaica es la que predomina, representando un 76% de la energía producida (1103623.75 Wh) bajo las mejores condiciones de irradiación del sector. Con la implementación de este sistema se logra una optimización de la operación del proceso hidráulico alcanzando un caudal de  $6.5\text{m}^3/\text{h}$ , con una eficiencia del 88% de las bombas.

Guerrero – Calero (2024) presentaron un estudio referente al potencial fotovoltaico para sistemas de bombeo de agua en la comuna Joa, Manabí, en territorio ecuatoriano. Esta investigación utiliza un enfoque mixto cualitativo-cuantitativo para realizar el análisis de los datos correspondientes al periodo 2012 – 2022, donde se pudo observar que el promedio de horas solares pico en ese sector fue de 4.19 HSP, mientras que su radiación media estuvo alrededor de  $4.197\text{ W/m}^2$ , registrándose como punto máximo un valor de  $5.9\text{ W/m}^2$ , y como punto mínimo  $2.65\text{ W/m}^2$  para los meses de diciembre y noviembre, respectivamente. El resultado de este análisis destaca la necesidad de la implementación de 19 paneles monocristalinos de 140 W, 2 baterías de 24 V y un controlador de 300 Ah. Demostrando la viabilidad y energética para el montaje de la infraestructura.

El estudio realizado por Villavicencio et al- (2021), evalúa y optimiza el dimensionamiento de los sistemas híbridos eólicos – fotovoltaicos que se utilizan en los sistemas de bombeo en zonas aisladas dentro del Ecuador. Los datos de irradiación solar y velocidades del viento que se obtuvieron de la zona de estudio permiten la determinación de irradiación de 4.62 KWh/m<sup>2</sup>/día y 5.2 m/s, respectivamente. Para este dimensionamiento para el sistema de bombeo considera el uso de 12 paneles de 250 W, un sistema eólico de 1.5KW, un banco de 8 baterías de 12V, un equipo inversor de 3KW y un dispositivo controlador de carga de 60 A, lo que permite cubrir el 96% de la demanda de agua y logrando reducir la dependencia de los combustibles fósiles en un 70%.

## **1.2. Desarrollo teórico**

### **1.3. Transporte de combustibles por poliductos**

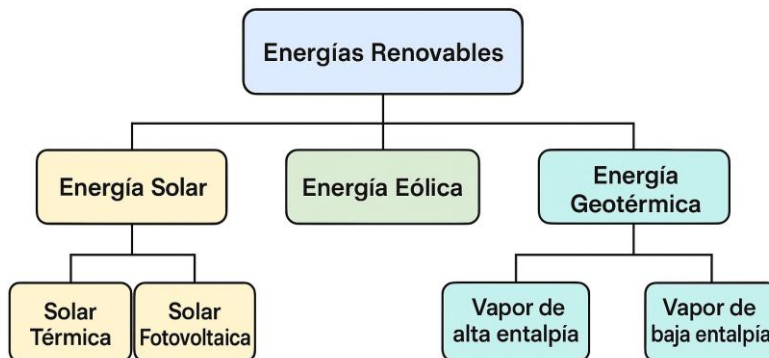
Los poliductos son sistemas esenciales para el transporte seguro y eficiente de derivados de hidrocarburos en estado líquido, especialmente en países con una red de distribución territorial extensa. Estos sistemas requieren de estaciones de bombeo con motores de gran potencia, alimentados comúnmente por grupos electrógenos o redes eléctricas convencionales (Cuessy-Vázquez et al., 2009). El uso de grupos de bombeo electrógenos o a diésel, aunque confiable, implica altos costos operativos y un significativo impacto ambiental (Acosta-Amado, 2024).

### **1.4. Energía renovable como alternativa de sistemas de bombeo**

Las energías renovables —principalmente la solar fotovoltaica y la eólica— se han consolidado como alternativas viables para alimentar sistemas de bombeo, incluso en aplicaciones industriales. Su implementación permite reducir costos energéticos recurrentes, dependencia de combustibles fósiles y emisiones contaminantes. Estudios recientes demuestran que los sistemas híbridos (solar-diésel o solar-eólico-diésel) pueden cubrir parcialmente la demanda energética de estaciones de bombeo en zonas remotas, manteniendo la confiabilidad operativa (Agajie et al., 2023).

### Ilustración 1.

*Esquema de energías renovables principales.*



### 1.3. Viabilidad técnica y económica de sistemas híbridos

La selección del sistema renovable adecuado depende de múltiples factores: demanda energética del sistema de bombeo, irradiación solar promedio, velocidad del viento, disponibilidad de espacio físico, y costos de instalación y mantenimiento. La metodología del costo nivelado de energía (LCOE) y los análisis de retorno de inversión (TIR, VAN) son herramientas fundamentales para evaluar la viabilidad económica de estas alternativas (Mubaarak et al., 2020; Salisu et al., 2019).

### 1.4. Marco normativo y transición energética en Ecuador

Ecuador ha establecido lineamientos para la promoción de energías renovables no convencionales en el sector público y privado, especialmente en zonas con alto potencial solar y limitado acceso a la red. El Plan Nacional de Eficiencia Energética y el Plan Maestro de Electrificación contemplan incentivos para proyectos que reduzcan el uso de diésel en operaciones industriales, alineados con los compromisos de reducción de emisiones del país (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2017; Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2023).

## 1.5. Teoría de la sostenibilidad energética

Desde un enfoque teórico, la sostenibilidad energética busca garantizar el acceso confiable, asequible y ambientalmente sostenible a la energía. Gunnarsdóttir et al. (2021) proponen un marco analítico que redefine la sostenibilidad energética como un concepto multidimensional que trasciende el enfoque técnico y económico, integrando también riesgos sociales y contextos específicos de aplicación (Gunnarsdottir et al., 2021). La sostenibilidad energética no debe verse únicamente como el suministro de energía de bajo impacto ambiental, sino también como la capacidad de los sistemas energéticos para adaptarse a condiciones cambiantes, gestionar riesgos y contribuir al bienestar a largo plazo de las comunidades.

El marco conceptual presentado por estos autores incluye tres pilares fundamentales:

1. **Suficiencia energética:** garantizar el acceso estable a energía suficiente para satisfacer las necesidades básicas y productivas.
2. **Resiliencia energética:** capacidad de los sistemas para enfrentar perturbaciones externas (fallas técnicas, crisis económicas o ambientales).
3. **Legitimidad social:** aceptación pública y percepción de equidad en los proyectos energéticos.

Como una de las industrias con mayor consumo energético, los poliductos que transportan combustibles derivados de petróleo enfrentan una gran presión ante las políticas de neutralidad de carbono. Para alinearse con el desarrollo sostenible, esta industria tradicional debe avanzar hacia una transición inteligente y priorizar estratégicamente la reducción de emisiones de carbono (Liao et al., 2022).

## **1.6. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible**

La integración de energías renovables en sistemas industriales como el bombeo de combustibles en poliductos se alinea directamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por las Naciones Unidas. En particular, el ODS 7: Energía asequible y no contaminante promueve el acceso a servicios energéticos fiables, sostenibles y modernos, con énfasis en el aumento de la proporción de energía renovable en la matriz energética global (United Nations, 2024).

Asimismo, el proyecto contribuye al ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, al fomentar la modernización de infraestructuras energéticas mediante tecnologías más limpias y eficientes. De igual manera, incide en el ODS 13: Acción por el clima, ya que la sustitución parcial de combustibles fósiles por fuentes limpias en operaciones críticas del sector hidrocarburífero representa una medida concreta para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (United Nations, 2024).

## **1.7. Red de Poliductos de EP PETROECUADOR**

La red de poliductos de EP Petroecuador es fundamental para el transporte eficiente de derivados de petróleo en Ecuador, conectando refinerías y terminales de almacenamiento con las principales zonas de consumo. Entre estos tenemos, a continuación, en la Tabla 1.

**Tabla 1***Red de Poliductos de EP PETROECUADOR*

<b>Poliducto</b>	<b>Longitud (Km)</b>	<b>Diámetro (Pulg)</b>	<b>Capacidad de bombeo (Bls/día)</b>	<b>Volumen empaquetado (Bls)</b>	<b>Caudal máximo (Bls/hora)</b>
<b>Esmeraldas- Sto. Domingo</b>	163,9	16	60.000	121.800	2.500
<b>Sto. Domingo- Quito</b>	890	12	48.000	42.800	2.000
<b>Sto. Domingo- Pascuales</b>	2.760	10	38.400	9.1800	1.600
<b>Quito- Ambato</b>	1.110	6	12.000	13.572	500
<b>Shushufindi- Quito</b>	3.050	6,4	10.800	37.000	450
<b>Libertad- Pascuales</b>	1.280	10	21.600	42.300	900
<b>Libertad- Manta</b>	1.700	6	8.400	21.500	350
<b>Tres Bocas- Pascuales</b>	20	12	108.000	10.000	4.500
<b>Tres Bocas- Fuel Oil</b>	56	14	48.000	2.700	2.000

**Fuente:** (Echeverría Amores & Jiménez-Coral, 2014)

## 1.8. Poliducto Libertad-Pascuales

El poliducto Libertad–Pascuales forma parte de la red de transporte de derivados de petróleo de la región costa del Ecuador, operado por la Gerencia de Transporte y Almacenamiento de EP Petroecuador. Esta infraestructura permite el transporte continuo de combustibles desde la estación cabecera en La Libertad hasta el terminal de recepción en Pascuales, en la ciudad de Guayaquil (Echeverría Amores & Jiménez-Coral, 2014; González-Peláez, 2001; Suárez-Quimí & Solórzano-Toala, 2025). Los principales datos del poliducto son los siguientes:

- **Año de instalación-operación:** 1985-1991
- **Longitud:** 128 kilómetros
- **Condición:** 125 km enterrados
- **Tipo de tubería:** API 5LX42
- **Espesores:** 0,219” / 0,250”
- **Presión máxima de operación:** 1134 psi
- **Revestimiento:** cinta polyken 980 & 955
- **Altitud promedio:** 200 m.
- **Potencia:** 1120 HP
- **Diámetro de tubería:** 10 pulgadas
- **Productos transportados:** Gasolina base, gasolina premezcla, gasolina ron 80, gasolina alto octano, gasolina ron 95, diésel 1, diésel 2, diésel premium y jet fuel.

### 1.8.1 Estación de Bombeo Cabecera “La Libertad”

Esta estación impulsa los productos desde los tanques de la Refinería La Libertad hacia el Terminal Pascuales mediante cuatro grupos de bombeo conformados por dos bombas principales y dos bombas booster (de succión) dispuestas en paralelo. Las bombas principales son de 10

etapas y funcionan con motores eléctricos de 2400 VCA / 60 Hz (Echeverría Amores & Jiménez-Coral, 2014; González-Peláez, 2001).

- **Bombas principales:** 560 HP (caballos de fuerza)
- **Bombas booster:** 40 HP
- **Caudales de operación (promedio):**
  - **Gasolina base y extra:** 1800 barriles por hora (bph)
  - **Diésel 1 y 2:** 1200 bph
  - **Jet fuel:** 380 bph

## Ilustración 2.

*Cabecera Poliducto Libertad-Pascuales*



Fuente: [www.coeltec.com.ec](http://www.coeltec.com.ec) (2021)

### 1.8.2 Estación Reductora Pascuales

Instalada en 1981, esta estación opera como punto de recepción y distribución. Posee tanques con capacidades individuales que van desde los 500 mil hasta más de 4 millones de galones, dependiendo del producto. Está equipada con actuadores eléctricos, válvulas automáticas y sistemas de medición digitalizados, incluyendo un sistema SCADA para supervisión y control (González-Peláez, 2001; Suárez-Quimí & Solórzano-Toala, 2025).

- **Caudal máximo de recepción desde el poliducto Libertad–Pascuales:** 900 bph
- **Presión de entrada:** 150 psi
- **Funciones:** recepción, mezcla y despacho de combustibles

**Ilustración 3.**

*Estación Reductora del Poliducto Libertad-Pascuales*



**Fuente:** (Fierro-Arcaya, 2011)

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Contexto de la investigación

En el actual contexto nacional e internacional, el sector energético enfrenta una presión creciente para adoptar sistemas más eficientes, sostenibles y resilientes frente a la variabilidad de los precios de los combustibles fósiles, los compromisos ambientales y las limitaciones operativas de las infraestructuras tradicionales. En Ecuador, la operación del sistema de transporte de derivados de hidrocarburos mediante poliductos representa una de las actividades energéticamente más intensivas, especialmente por el uso de grupos electrógenos alimentados con energía del SIN para impulsar estaciones de bombeo en tramos clave como el poliducto Libertad–Pascuales, donde se ha observado que el consumo promedio anual entre los años 2020 – 2023 fue de 2.32 GWh, lo que equivale a 107KWh por cada mil barriles transportados, mismo que han acarreado un costo operativo de 278000 dólares, aproximadamente.

En la actualidad EP Petroecuador realiza evaluaciones de indicadores de eficiencia, entre los cuales se encuentra el consumo de KWh/barril en conjunto con el factor de carga de cada una de las estaciones de bombeo, mismos que se alinean con las directrices del Plan Nacional de Eficiencia Energética. Adicional las experiencias de aplicaciones en este tipo de proyectos con integración de energías renovables en Petrobras, Brasil, con un sistema híbrido solar-diésel en estaciones de bombeo han alcanzado una reducción de consumo energético entre el 20% y 40% sin comprometer la confiabilidad.

Es importante mencionar que depender únicamente del SIN tiene consecuencias como la exposición a problemas de operatividad causados por la baja calidad de energía que se pudiera presentar, problemas como caídas de tensión, cambios momentáneos de frecuencias, entre otros. Por esta razón se justifica la implementación de la integración de soluciones híbridas que permitan garantizar la operatividad del sistema.

## **2.2. Diseño y alcance de la investigación**

El diseño y alcance de la investigación tiene las siguientes características (Hernández-Sampieri et al., 2014):

### **2.2.1 Diseño de la investigación**

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo no experimental y de tipo descriptivo y evaluativo, orientado a analizar la viabilidad técnica y económica del uso de energías renovables en el sistema de bombeo del poliducto Libertad–Pascuales. El estudio se basa en la recopilación de datos técnicos de operación (caudales, potencias instaladas, consumos energéticos, perfiles de demanda), así como en información climática (irradiación solar y velocidad del viento) de la región costera de Ecuador. También se incluyen datos de costos referenciales de implementación de sistemas solares fotovoltaicos y eólicos.

La metodología contempla la simulación del comportamiento energético de alternativas renovables mediante herramientas de modelado energético y análisis económico, como el cálculo del Costo Nivelado de Energía (LCOE), el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

### **2.2.2 Alcance de la investigación**

El estudio se limita al tramo Libertad–Pascuales, de 126 km de longitud, perteneciente a la red de poliductos de Petroecuador. Incluye exclusivamente las estaciones de bombeo y transferencia de producto, sin intervenir en el diseño estructural del ducto ni en procesos de refinación o comercialización. No se contempla la implementación operativa del sistema propuesto, sino su evaluación en fase de prefactibilidad.

Asimismo, el alcance temporal del análisis corresponde a una proyección de 20 años de operación, considerando condiciones estándar de mantenimiento y eficiencia de equipos. Se espera que los resultados generen una base técnica para futuras decisiones estratégicas de inversión y modernización energética en la infraestructura de transporte de combustibles del país.

## **2.3. Tipo y métodos de investigación**

### **2.3.1 Tipo de investigación**

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que busca ofrecer una solución concreta a un problema técnico-operativo real: el alto costo energético del sistema de bombeo del poliducto Libertad–Pascuales. Además, se clasifica como una investigación cuantitativa y no experimental, dado que no se manipulan variables en un entorno controlado, sino que se analiza información existente mediante modelos técnico-económicos (Hernández-Sampieri et al., 2014). Su enfoque es descriptivo y evaluativo, porque caracteriza las condiciones actuales del sistema energético y evalúa la factibilidad de implementar energías renovables.

### **2.3.2 Métodos de investigación**

Para el cumplimiento de los objetivos específicos de la investigación, se aplicaron los siguientes métodos:

- **Método analítico:** Se descompone el sistema de bombeo en sus componentes energéticos para determinar el consumo actual, la demanda de potencia y los puntos críticos de eficiencia.

- **Método comparativo:** Se contrastan distintos escenarios de generación energética (convencional vs. renovable), considerando variables como costos operativos, inversión inicial, emisiones y rendimiento.
- **Método económico-financiero:** A través de indicadores como el Costo Nivelado de Energía (LCOE), Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), se evalúa la rentabilidad de las alternativas propuestas.
- **Método de simulación:** Se utiliza software especializado (RETScreen) para modelar el comportamiento de sistemas híbridos (solar–diésel o solar–eólico–diésel) bajo condiciones climáticas y operativas locales.

## **2.4. Población y muestra**

### **2.4.1. Población de estudio**

La población de esta investigación está constituida por el conjunto de sistemas de transporte de hidrocarburos por poliducto operados por EP Petroecuador, específicamente aquellos que utilizan estaciones de bombeo con grupos electrógenos en la región costa del Ecuador. Esta población incluye varias instalaciones distribuidas a lo largo de los poliductos Libertad–Pascuales, Libertad–Manta, Santo Domingo–Pascuales y Pascuales–Cuenca.

### **2.4.2. Muestra**

La muestra seleccionada para el presente estudio es intencional y no probabilística, enfocándose exclusivamente en el tramo del poliducto Libertad–Pascuales, debido a su importancia estratégica, su nivel de consumo energético y su potencial para integrar fuentes de energía renovable. En particular, se analiza la estación de bombeo cabecera La Libertad y la estación reductora Pascuales, que constituyen los puntos clave del sistema

bajo estudio. Esta muestra es representativa del tipo de infraestructura y condiciones operativas que se desea mejorar mediante la incorporación de energías limpias.

### **2.4.3. Variables**

#### **Variable dependiente:**

- **Costo operativo del sistema de bombeo**

Esta variable representa el gasto energético que genera el funcionamiento continuo de los grupos electrógenos que alimentan los motores eléctricos de las estaciones de bombeo.

#### **Indicadores asociados:**

- Consumo de diésel (galones/mes)
- Gasto energético mensual (USD)
- Reducción porcentual del consumo de combustibles fósiles (%)
- Emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> (toneladas/año)
- Costo nivelado de energía (LCOE)

#### **Variable independiente:**

- **Integración de energías renovables**

Esta variable se refiere a la incorporación de sistemas de generación solar fotovoltaica y/o eólica en el sistema de bombeo del poliducto Libertad–Pascuales. Incluye el diseño del sistema, tipo de tecnología seleccionada, capacidad

instalada, perfil de generación y porcentaje de cobertura de la demanda energética actual.

**Indicadores asociados:**

- Tipo de fuente renovable (solar, eólica, híbrido)
- Potencia instalada (kW)
- Producción energética estimada (kWh/año)
- Costo de inversión inicial (USD)

**2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para el desarrollo de esta investigación, se emplearon técnicas de recolección de datos documentales, técnica y estadística, orientadas a obtener información precisa sobre el sistema de bombeo del poliducto Libertad–Pascuales y sobre el potencial energético renovable de la zona.

**Técnicas utilizadas:**

- **Revisión documental y bibliográfica:** Se recopilaron informes técnicos de Petroecuador, tesis universitarias, estudios ambientales, datos de consumo energético y documentación oficial sobre las características de las estaciones de bombeo.
- **Consulta de bases de datos climáticas y energéticas:** Se utilizaron fuentes como el Atlas Solar del Ecuador, informes de CELEC EP, y datos meteorológicos de entidades como el INAMHI, para establecer el potencial solar y eólico de la región costera.

- **Modelado energético-simulativo:** Se aplicaron simulaciones con software especializado (RETScreen) para estimar el desempeño técnico y económico de sistemas híbridos aplicados al caso de estudio.

#### **Instrumentos empleados:**

- **Fichas técnicas y tablas de consumo energético:** para determinar la demanda operativa de las estaciones de bombeo.
- **Software de simulación energética:** para evaluar escenarios con fuentes renovables.
- **Hojas de cálculo (Excel):** para el procesamiento de datos de consumo, costos y rendimientos energéticos.
- **Mapas climáticos y curvas de irradiancia/viento:** para caracterizar el recurso renovable disponible.

#### **2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.**

Para garantizar la calidad de los datos recolectados, se aplicaron criterios rigurosos de validez y confiabilidad en los instrumentos empleados durante el levantamiento de información.

**Validez.** - Se aseguró la validez de contenido mediante la selección de fuentes especializadas, oficiales y actualizadas, tales como informes técnicos de EP Petroecuador, estudios de tesis previas, datos de organismos públicos (ARCONEL, INAMHI, CELEC

EP), y publicaciones científicas sobre energía renovable. Asimismo, los parámetros técnicos utilizados en los modelos (irradiancia solar, velocidad del viento, consumo de energía, caudal, potencia instalada, etc.) se basaron en datos reales y contextualizados a la zona de estudio, lo que garantiza una representación fiel del sistema bajo análisis.

**Confiabilidad.** - Los instrumentos utilizados presentan alta confiabilidad, dado que se apoyan en herramientas estandarizadas y replicables. Por ejemplo:

- El uso de software RETScreen, ampliamente validado en estudios energéticos, asegura la consistencia de los resultados simulados.
- Las fichas técnicas y hojas de cálculo se estructuraron siguiendo protocolos de control de calidad, con validación cruzada entre distintas fuentes para minimizar errores de cálculo o interpretación.
- Los datos climatológicos provienen de estaciones meteorológicas oficiales y bases reconocidas internacionalmente, lo que refuerza la confiabilidad de los insumos aplicados en la simulación.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del presente estudio.

### 3.1. Análisis del consumo y costo energético del sistema de bombeo del poliducto Libertad-Pascuales para el periodo 2020–2023

Para el presente análisis se ha supuesto los siguientes datos de entrada en la operación de grupos de bombeo del poliducto:

- 1 bomba principal (560 HP  $\approx$  417,6 kW) operando 15 h/día
- 1 bomba booster (40 HP  $\approx$  29,83 kW) operando 3 h/día
- Costo de energía: 0,12 USD/kWh

Tabla 2.

*Consumo energético promedio del poliducto Libertad-Pascuales.*

Año	Días	Consumo bomba principal (kWh)	Consumo booster (kWh)	Consumo total (kWh)	Costo anual (USD)
2020	366	2.292.580,08	32.751,14	2.325.331,22	279.039,75
2021	365	2.286.316,20	32.661,66	2.318.977,86	278.277,34
2022	365	2.286.316,20	32.661,66	2.318.977,86	278.277,34
2023	365	2.286.316,20	32.661,66	2.318.977,86	278.277,34

### 3.2 Evaluación del potencial de generación de energías renovables en el área de operación.

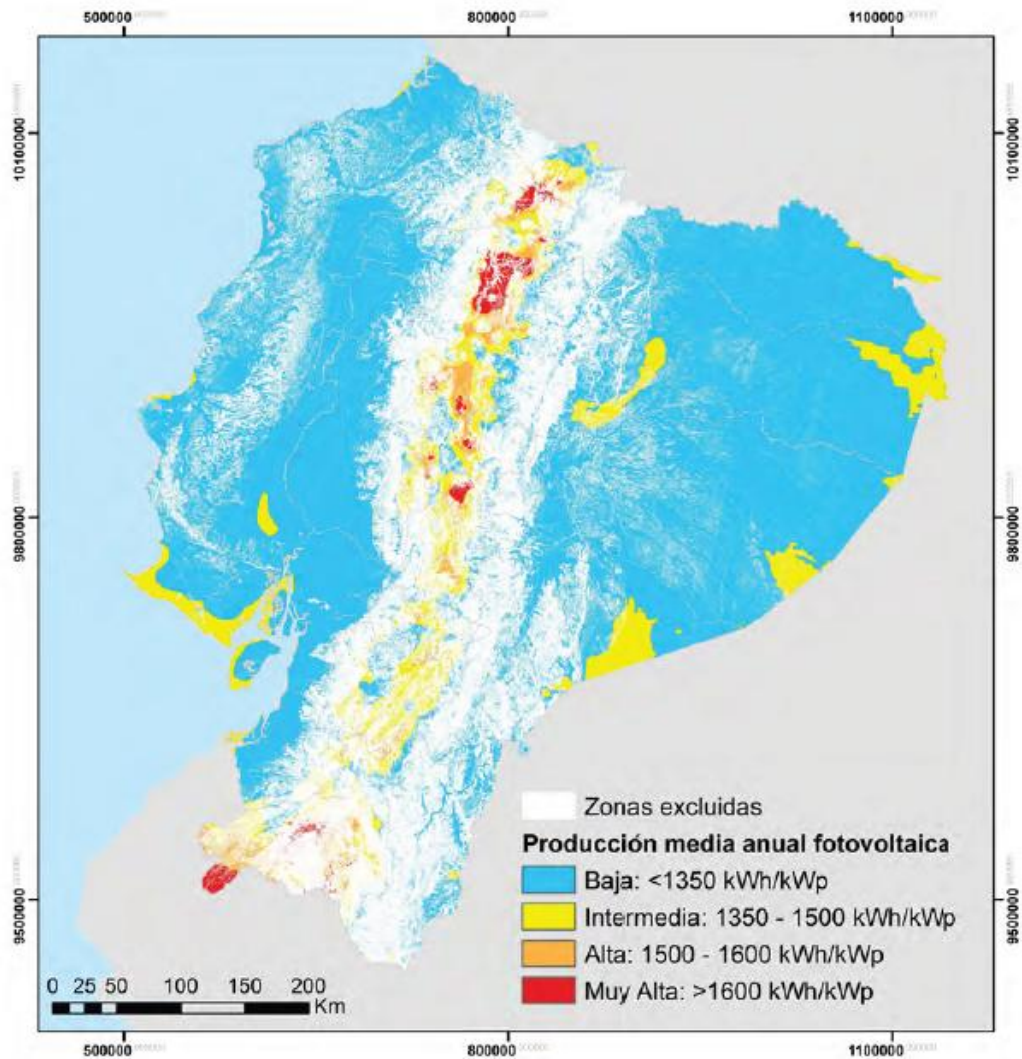
#### -Potencial de Energía Solar Fotovoltaica

La provincia de Santa Elena, y en particular la zona de La Libertad se caracteriza por una alta radiación solar, lo que la convierte en una región ideal para la implementación de sistemas fotovoltaicos.

- **Radiación Solar Promedio:** Estudios indican que Santa Elena registra una radiación solar promedio anual de aproximadamente 4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día, con valores que pueden alcanzar hasta 4.9 kWh/m<sup>2</sup>/día en ciertos meses (Holguín Govea, 2024).
- **Proyectos en Desarrollo:** La Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) ha recibido terrenos en Santa Elena para el desarrollo de un proyecto fotovoltaico de hasta 60 MWp, lo que subraya el reconocimiento oficial del potencial solar de la región (CELEC EP, 2022).
- **Uniformidad Estacional:** Debido a la ubicación ecuatorial, la región experimenta una variación estacional mínima en la radiación solar, lo que permite una generación de energía más constante a lo largo del año (Vásquez et al., 2018).

#### Ilustración 4.

##### *Potencial de generación fotovoltaica del Ecuador*

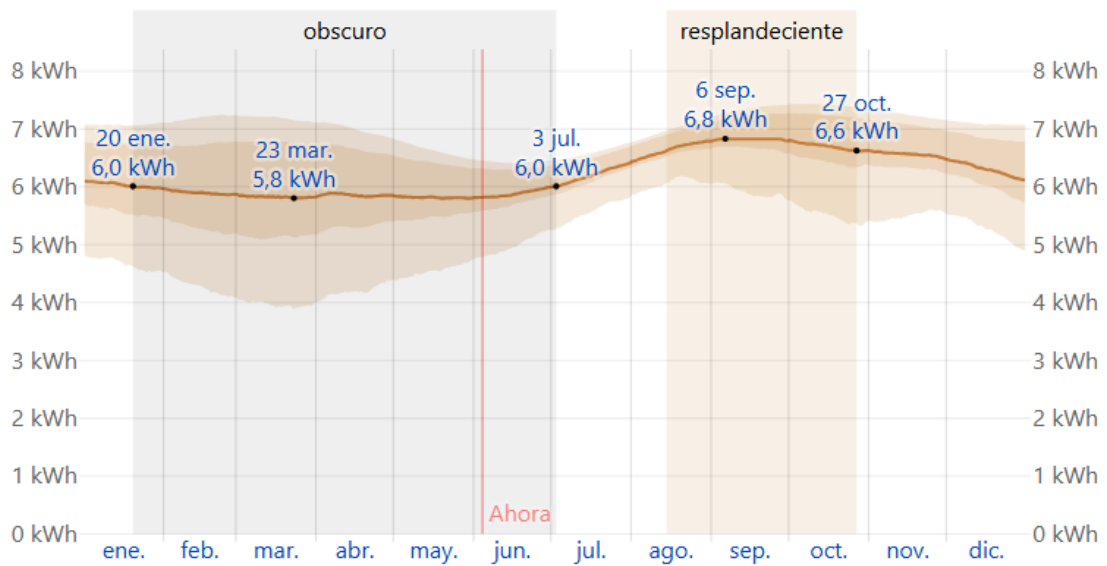


**Nota:** La faja costera de la provincia de Santa Elena se encuentra en la región media de producción de energía fotovoltaica entre 1350-1500 kWh/kWp, la cual corresponde al área de estudio.

**Fuente:** (Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, 2024)

#### Ilustración 5.

##### *Energía solar de onda corta incidente diaria promedio en Santa Elena*



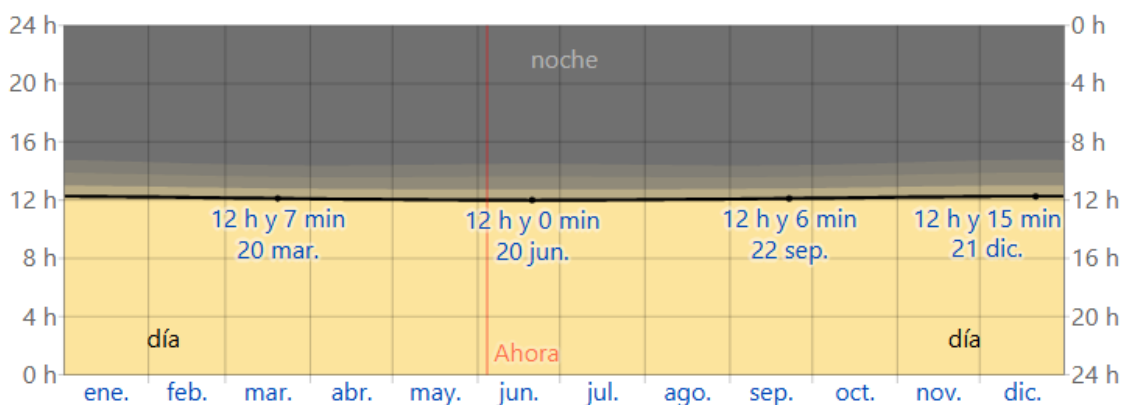
**Nota:** La energía solar de onda corta promedio diario que llega a la tierra por metro cuadrado (línea anaranjada), con las bandas de percentiles 25° a 75° y 10° a 90°.

	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
<b>Energía solar (kWh)</b>	6.0	5.9	5.8	5.9	5.8	5.9	6.2	6.7	6.8	6.7	6.6	6.3

**Fuente:** [es.weatherspark.com](https://es.weatherspark.com) (consultado en junio de 2025)

### Ilustración 6.

#### *Horas de luz natural y crepúsculo en Santa Elena*



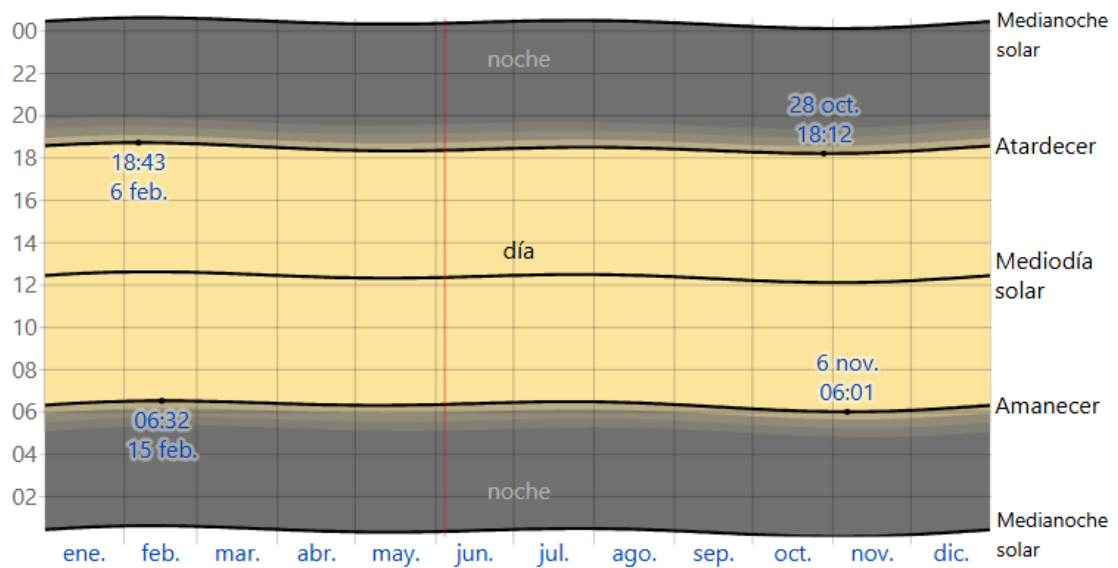
**Nota:** La cantidad de horas durante las cuales el sol está visible (línea negra). De abajo (más amarillo) hacia arriba (más gris), las bandas de color indican: luz natural total, crepúsculo (civil, náutico y astronómico) y noche total.

Cantidad de luz natural	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
horas	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,2	12,2	12,3

Fuente: [es.weatherspark.com](https://es.weatherspark.com) (consultado en junio de 2025)

### Ilustración 7.

*Salida del sol y puesta del sol con crepúsculo en Santa Elena*



**Nota:** El día solar durante el año 2025. De abajo hacia arriba, las líneas negras son la medianoche solar anterior, la salida del sol, el mediodía solar, la puesta del sol y la siguiente medianoche solar. El día, los crepúsculos (civil, náutico y astronómico) y la noche se indican por el color de las bandas, de amarillo a gris.

Fuente: [es.weatherspark.com](https://es.weatherspark.com) (consultado en junio de 2025)

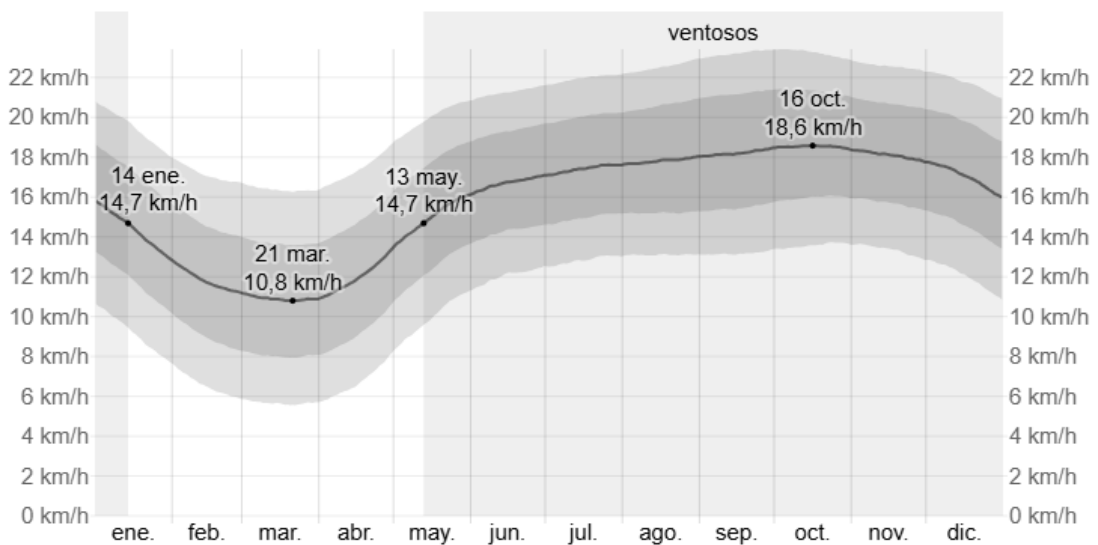
### -Potencial de Energía Eólica

La provincia de Santa Elena también presenta condiciones favorables para la generación de energía eólica, especialmente en áreas costeras y elevadas.

- **Velocidad del Viento:** En Santa Elena, la velocidad promedio del viento supera los 14.7 km/h durante gran parte del año, alcanzando un promedio de 18.5 km/h en octubre (Cedar Lake Ventures, 2025)
- **Dirección Predominante:** La dirección del viento es predominantemente del oeste, lo que facilita el diseño y orientación de aerogeneradores para maximizar la captación de energía (Cedar Lake Ventures, 2025).
- **Estudios Específicos:** Investigaciones en áreas como Atahualpa y La Chokolatera han demostrado que ciertas zonas de Santa Elena tienen un potencial eólico significativo, adecuado para la instalación de parques eólicos (Luna Maldonado, 2008).

**Ilustración 8.**

*Velocidad promedio del viento en Santa Elena*



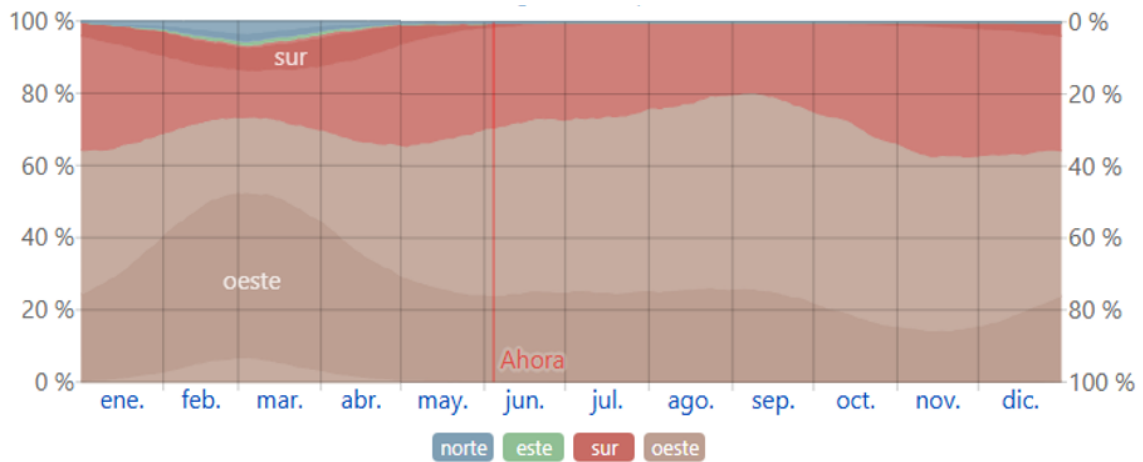
**Nota:** El promedio de la velocidad media del viento por hora (línea gris oscuro), con las bandas de percentil 25° a 75° y 10° a 90°.

	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
<b>Vel. del viento (kph)</b>	14,4	11,8	10,9	12,1	15,1	16,7	17,4	17,8	18,2	18,5	18,1	17,0

**Fuente:** [es.weatherspark.com](https://es.weatherspark.com) (consultado en junio de 2025)

### Ilustración 9.

#### Dirección del viento en Santa Elena



**Nota:** El porcentaje de horas en las que la dirección media del viento viene de cada uno de los cuatro puntos cardinales, excluidas las horas en que la velocidad media del viento es menos de 1,6 km/h. Las áreas de colores claros en los límites son el porcentaje de horas que pasa en las direcciones intermedias implícitas (noreste, sureste, suroeste y noroeste).

**Fuente:** [es.weatherspark.com](https://es.weatherspark.com) (consultado en junio de 2025)

Tabla 3.

#### Comparación de recursos energéticos renovables.

Recurso	Potencial en Santa Elena	Observaciones
Solar	Alto	Radiación solar constante y alta durante todo el año.
Eólico	Moderado a Alto	Velocidades de viento adecuadas en zonas específicas.

### 3.3 Proyección del diseño conceptual de implementación energética renovable en función de su aplicabilidad para la estación de bombeo del poliducto Libertad-Pascuales.

Debido a las condiciones climáticas y de disposición de recursos, una planta solar fotovoltaica es más conveniente para un proyecto de energía renovable debido a que no

necesita desplegar grandes movimientos de materiales como en el caso de los generadores eólicos. Por tanto, se decide por menor complejidad logística tomar en consideración un proyecto fotovoltaico (FV) para este tipo de proyectos energéticos.

### **3.3.1. Descripción general del sistema fotovoltaico y de almacenamiento para sistemas de bombeo**

#### **-Requerimientos de Energía del Sistema de Bombeo**

Potencia nominal requerida:

- Dos bombas principales:  $2 \times 560 \text{ HP} = 1.120 \text{ HP} \approx 835 \text{ kW}$
- Dos bombas booster:  $2 \times 40 \text{ HP} = 80 \text{ HP} \approx 60 \text{ kW}$
- Potencia total estimada:  $895 \text{ kW}$  ( $1 \text{ HP} \approx 0,7457 \text{ kW}$ )

#### **-Sistema Fovovoltaico (PV)**

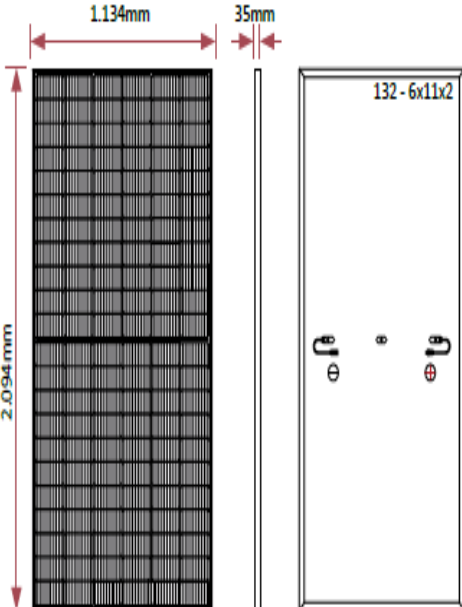
##### **Componentes clave**

- **Paneles solares (módulos fotovoltaicos):**
  - Tipo: Monocristalinos (mayor eficiencia, ideales para zonas cálidas).
  - Número estimado: Para una potencia de alrededor de 900 kW, se requerirían aproximadamente 1.800 paneles de 500 W cada uno, sin considerar pérdidas.

## Ilustración 10.

Características de un panel solar monocristalino de 500 W

Características mecánicas	
Cubierta frontal (material/espesor)	Vidrio templado / 3.2mm
Peso del módulo	25,0 kg
Dimensiones del módulo (L / W / H)	2.094 x 1.134 x 35mm
Lámina de protección posterior	TPT en blanco
Células (cantidad/material)	132 (6x11x2) / Silicio mono
Marco (material/color)	Aluminio anodizado / Plata
Grado protección caja de conexiones	≥ IP68
Cables y conectores	4mm <sup>2</sup> , long. 1.400mm
Clasificación de calidad	Clase A
Clase de protección eléctrica	Clase II
Clase de seguridad contra incendios	Clase C



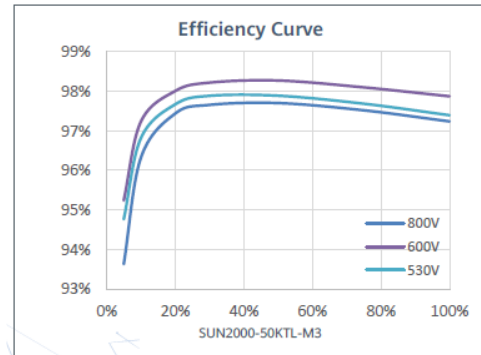
Fuente: <https://autosolar.es/panel-solar-24-voltios/panel-solar-500w-tensite-monocristalino-perc>

- **Inversores solares:**

- Conversión de corriente continua (DC) a alterna (AC).
- Capacidad: Inversores trifásicos industriales, con factor de sobredimensionamiento (al menos 1.1×).
- Se recomienda una distribución modular para facilitar mantenimiento y escalabilidad.

### Ilustración 11.

#### *Inversor solar*



**Fuente:** <https://cdn.autosolar.es/pdf/datasheet-sun2000-50ktl-m3-trifasico.pdf>

- **Estructuras de montaje:**

- Fijas o con seguimiento solar (trackers).
- Montaje fijo con inclinación óptima (10–15° en La Libertad) para captación máxima anual.

### Ilustración 12.

#### *Solar tracker*



**Fuente:** <https://www.solarpowerworldonline.com/2020/01/what-is-a-solar-tracker-and-how-does-it-work/>

- **Cableado, protecciones, sistema de monitoreo y control:**
- **Cableado:**

**a. Cableado CC (corriente continua)**

- **Entre paneles y string box (caja combinadora):**
  - Cableado de cobre flexible XLPE/PVC o XLPE/LSZH de 4 mm<sup>2</sup> a 6 mm<sup>2</sup>, según la distancia y corriente.
- Deben diseñarse múltiples strings con fusibles de protección en cada entrada de la string box.
- Cables con doble aislamiento y protección UV (UV-resistant).
- **Desde string box hasta inversores:**
  - Cableado de 10 mm<sup>2</sup> a 25 mm<sup>2</sup>, dependiendo de la cantidad de strings combinados.
  - Se recomienda usar canaletas o bandejas tipo escalerilla, con protección mecánica.

**b. Cableado CA (corriente alterna)**

- Desde el inversor al centro de carga o al transformador elevador:
  - Cableado de 70 mm<sup>2</sup> a 240 mm<sup>2</sup> dependiendo del voltaje y corriente nominal de salida.
  - Se diseña con una caída de tensión <2%.

### Ilustración 13.

*Cable XLPE con cubierta exterior de PVC*



**Nota:** Catálogo de productos de Cablec.

**Fuente:** <https://n9.cl/nqx7z>

- **Protecciones eléctricas:**

- a. Protecciones en CC**

- Fusibles por string (6 A – 20 A típicamente).
- Seccionadores bajo carga tipo DC (aislación mínima de 1000 Vdc).
- Supresores de sobretensión (SPD) tipo 2 en cada caja combinadora.
- Se recomienda configuración bipolar en strings y caja de distribución.

- b. Protecciones en CA**

- Interruptores termomagnéticos tipo industrial o disyuntores automáticos, seleccionados según la potencia y el tipo de inversor.
- Relé de protección contra pérdida de red (anti-islanding).
- Supresores de sobretensión tipo 2 y 3 (para cuadros eléctricos y tablero principal).
- Sistema de puesta a tierra general (varilla de cobre, malla, o anillos de puesta a tierra con baja resistividad  $<10 \Omega$ ).

- **Sistema de Monitoreo y Control:**

- a. Sistema Básico de Monitoreo**

- Inversores con capacidad de comunicación (RS485 / Ethernet / Wi-Fi).
    - Plataforma web o local con acceso en tiempo real a:
      - Producción de energía (kWh, kW).
      - Estado de strings (V, I).
      - Alarmas por fallos, desconexiones, o sobrecalentamiento.

- b. Sistema SCADA (opcional, industrial)**

- Integración con el sistema de control del poliducto mediante protocolo Modbus TCP/IP o OPC UA.
    - Visualización centralizada (pantallas HMI/SCADA) con:
      - Condición de cada inversor.
      - Control remoto de conexión/desconexión.
      - Sincronización con operación de bombeo.
      - Registro histórico de eficiencia y fallos.

- c. Sensores y Datos Complementarios**

- Estación meteorológica (radiación, temperatura ambiente y del módulo, viento).
    - Medidores de energía bidireccionales certificados.
    - Posibilidad de conexión con baterías (estado de carga, ciclos, etc.).

### 3.3.2. Dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía

Supuestos para el diseño:

- El bombeo puede requerir energía en horas no solares (temprano en la mañana o en la noche).
- Compensación por variabilidad climática o de demanda energética.
- Respaldo ante interrupciones eléctricas.

#### -Supuestos básicos para el cálculo

Tomamos como base:

- **Carga crítica que respaldar:**
  - Bomba principal (560 HP  $\approx$  417,6 kW) por 4 horas sin sol.
  - Bomba booster (40 HP  $\approx$  29,83 kW) por 2 horas sin sol.
- **Energía total que respaldar por día sin sol:**
  - Principal:  $417,6 \text{ kW} \times 4 \text{ h} = 1.670,4 \text{ kWh}$
  - Booster:  $29,83 \text{ kW} \times 2 \text{ h} = 59,66 \text{ kWh}$
  - **Total, energía diaria crítica: aproximadamente 1.730 kWh**
- **Tipo de baterías:** Litio-ferrofosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ), por su alta eficiencia (>90%), vida útil (5,000+ ciclos), alta densidad energética y bajo mantenimiento.
- **Profundidad de descarga (DoD):** 80%
- **Eficiencia del sistema de almacenamiento  $E_a$  (carga/descarga):** 90%

### **-Cálculo de capacidad útil requerida**

Para el cálculo de la capacidad útil de requerida  $Cu_r$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$Cu_r = \frac{\text{Energía total diaria crítica}}{DoD \times E_a} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$Cu_r = \frac{1730 \text{ kWh}}{0,8 \times 0,9} = 2400 \text{ kWh} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

$Cu_r$ : Capacidad útil requerida

DoD: Profundidad de descarga

$E_a$ : Eficiencia del sistema de almacenamiento

Esto significa que se necesitará un banco de baterías de aproximadamente 2.4 MWh para respaldar las cargas necesarias para satisfacer la demanda del proyecto en condiciones de baja generación solar.

### **-Opciones de configuración**

- **Opción 1: Baterías modulares industriales**
  - Ejemplo: Tesla Megapack o Huawei LUNA2000, BYD, Sungrow ST556KWH-250UD
  - Unidades de 200–300 kWh que pueden instalarse en paralelo
  - Para este caso se necesitarían:
    - 10 a 12 unidades de 250 kWh  $\approx$  2,5–3,0 MWh

#### Ilustración 14.

Batería modular ST556KWH-250UD

**ST556KWH-250UD** NEW  
Energy Storage System

SUNGROW | SAMSUNG SAMSUNG SDI



Fuente: <https://n9.cl/lqozx> (consultado en junio de 2025)

- **Opción 2: Sistema contenerizado**

- 1 o 2 contenedores de 20 pies con batería integrada, sistema BMS, inversores bidireccionales y sistema de refrigeración (TLS Offshore Containers / TLS Energy, 2024).
- Es recomendable tener un margen del 10–20% adicional para evitar sobrecarga o descarga profunda en días consecutivos sin sol (TLS Offshore Containers / TLS Energy, 2024).

### **-Recomendaciones para el diseño**

- Incluir un sistema de gestión de baterías (BMS) para proteger contra sobrecargas, cortocircuitos y temperatura.
- Instalar un sistema de refrigeración y monitoreo térmico.
- Evaluar la reposición del banco de baterías cada 8–12 años (según el fabricante).
- Coordinar el sistema de almacenamiento con la lógica de control del bombeo (puede incluir SCADA para automatización).

### **3.3.3. Tipología del sistema (alternativas del diseño conceptual)**

#### **a) Sistema híbrido solar + red eléctrica:**

- El sistema solar reduce el consumo de red, pero la red sigue como respaldo.
- Ideal para evitar sobredimensionar baterías.

#### **b) Sistema solar + almacenamiento (off-grid o autónomo):**

- En caso de operar fuera de red o en zonas sin conexión estable.
- Requiere sobredimensionamiento del campo solar y del banco de baterías.

### **3.3.4. Gestión y Automatización**

- Sistema SCADA o software de monitoreo para:
  - Visualizar el rendimiento solar.
  - Administrar el flujo de energía entre el PV, las baterías y el sistema de bombeo.
  - Detectar anomalías y facilitar el mantenimiento preventivo.

La propuesta técnica del proyecto se resume en la Tabla 4. En esta se presentan los componentes mínimos, con los cuales debe contar la unidad de generación y provisión de energía para el Poliducto Libertad-Pascuales.

**Tabla 4.**

*Resumen de la propuesta técnica*

<b>Componente</b>	<b>Especificación Estimada</b>
<b>Potencia total requerida</b>	895 kW
<b>Campo fotovoltaico</b>	≈ 1.000 kWp
<b>Número de paneles (500 W)</b>	2.000 (considerando pérdidas)
<b>Capacidad del banco de baterías (útil)</b>	2.400 kWh
<b>Tipo de baterías</b>	Ion-litio industrial
<b>Tipo de sistema</b>	Híbrido (PV + Red + Baterías)
<b>Control</b>	Inversores inteligentes + BMS + monitoreo

### **3.4. Estimación económica de la viabilidad del proyecto**

#### **-Supuestos para el análisis de viabilidad**

- **Sistema fotovoltaico:**
  - Capacidad instalada: **500 kW**
  - Generación diaria promedio: **2.100 kWh/día**
  - Aporta: parte de la energía de bombeo diaria (principal y booster)
- **Sistema de almacenamiento:**
  - Capacidad útil: **2.400 kWh**
  - Tipo: Baterías de litio (LiFePO<sub>4</sub>)

- **Vida útil del sistema:**
  - Paneles: 25 años
  - Baterías: 10–12 años (reposición a mitad del proyecto)

### **-Costos de inversión inicial**

Los costos estimados de inversión para el tipo de sistema de generación renovable seleccionado se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5.**

*Costos estimados de inversión*

<b>Componente</b>	<b>Costo estimado</b>
<b>Paneles FV 500 kWp (1,000 USD/kWp)</b>	\$500.000
<b>Inversores, estructuras, cables, SCADA</b>	\$150.000
<b>Baterías (2.4 MWh × 400 USD/kWh)</b>	\$960.000
<b>Ingeniería e instalación</b>	\$140.000
<b>Total, inversión inicial</b>	<b>\$1.750.000</b>

Reposición de baterías en año 12: \$960.000

### **-Ahorro anual por generación solar**

Del análisis anterior, se obtuvieron los resultados de ahorro anual por generación solar:

- Consumo diario promedio (bombeo parcial): 1.950 kWh
- Costo energía: 0,12 USD/kWh
- Ahorro diario:  $1.950 \text{ kWh} \times 0.12 = \$234$
- Ahorro anual (330 días operativos):  $\$234 \times 330 = \$77.220$

### **-Parámetros para el cálculo DPI**

- Inversión inicial: \$1.750.000
- Reinversión año 12: \$960.000
- Ahorro anual (flujo de caja): \$77,220
- Tasa de descuento (WACC): 10%
- Horizonte: 25 años

### **-Cálculo del DPI (Discounted Payback Period Index)**

El DPI se calcula encontrando el primer año en que la suma acumulada de los flujos de caja descontados es igual o superior a la inversión inicial. Esta se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Flujo descontado al año } n = \frac{\text{Ahorro anual (flujo de caja)}}{(1 + WACC)^n} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\text{Flujo descontado al año } n = \frac{77.200}{(1 + 0,10)^n} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

n: número de años transcurridos en el proyecto.

El WACC representa el costo promedio del dinero que una empresa utiliza para financiar sus inversiones, considerando tanto el capital propio (acciones) como el capital ajeno (deuda). Se usa ampliamente en la evaluación de proyectos, análisis financiero y cálculo de indicadores como el VPN o el DPI.

El WACC se lo calcula de la siguiente manera:

$$WACC = \left(\frac{E}{V} \times R_e\right) + \left(\frac{D}{V} \times R_d \times (1 - t_c)\right) \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

E: Valor del capital propio (equity)

D: Valor de la deuda (debt)

V: Valor total del capital (E + D)

$R_e$ : Costo del capital propio

$R_d$ : Costo de la deuda

$t_c$ : Tasa impositiva corporativa

El procedimiento consiste en acumular los fondos hasta recuperar \$1.750.000 de la inversión, lo cual se presenta en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Flujo anual descontado*

<b>Año</b>	<b>Flujo anual descontado</b>	<b>Acumulado</b>
1	\$70.200	\$70.200
2	\$63.818	\$134.018
3	\$58.016	\$192.034
4	\$52.742	\$244.776
5	\$47.947	\$292.723
6	\$43.588	\$336.311
7	\$39.626	\$375.937
8	\$35.998	\$411.935

<b>Año</b>	<b>Flujo anual descontado</b>	<b>Acumulado</b>
<b>9</b>	\$32.725	\$444.660
<b>10</b>	\$29.750	\$474.410
<b>11</b>	\$27.045	\$501.455
<b>12</b>	\$24.586	\$526.041
<b>12</b>	<b>Reposición baterías</b>	<b>-\$960.000</b>
<b>13</b>	\$22.351	-\$411.608
<b>14</b>	\$20.319	-\$391.289
<b>15</b>	\$18.472	-\$372.817
<b>16</b>	\$16.792	-\$356.025
<b>17</b>	\$15.266	-\$340.759
<b>18</b>	\$13.878	-\$326.881
<b>19</b>	\$12.616	-\$314.265
<b>20</b>	\$11.469	-\$302.796
<b>21</b>	\$10.426	-\$292.370
<b>22</b>	\$9.478	-\$282.892
<b>23</b>	\$8.616	-\$274.276
<b>24</b>	\$7.833	-\$266.443
<b>25</b>	\$7.121	-\$259.322

## **Resultados:**

- El DPI no se cumple en 25 años con los parámetros actuales.
- Esto significa que el proyecto no recupera la inversión inicial más la reinversión dentro de su vida útil con el ahorro actual y sin incentivos.

## **-Posibles mejoras del DPI para encontrar la viabilidad económica del proyecto**

### **1. Subsidios estatales o incentivos tributarios**

- Reducción de CAPEX de baterías o paneles en un 30% esto equivale a un DPI entre 19–21 años.

### **2. Incremento del precio de la electricidad**

- Si el precio sube a \$0,15/kWh, el DPI sería de 21–23 años.

### **3. Diseñar el sistema solo para operación diurna (sin baterías)**

- La inversión inicial disminuiría a aproximadamente \$700.000, con un DPI de 9 a 10 años.

## **-Comparación de escenarios**

A continuación, se presenta en la Tabla 7 una comparativa de los escenarios económicos para el proyecto de generación fotovoltaica para bombeo en el poliducto Libertad–Pascuales, utilizando el método del DPI y bajo el análisis de ahorro energético. En esta se presentan todas las alternativas posibles, las cuales permitan darle viabilidad al proyecto de generación solar fotovoltaico.

**Tabla 7.***Análisis comparativo de flujos descontados*

<b>Escenario</b>	<b>CapEx (USD)</b>	<b>Ahorro anual (USD)</b>	<b>DPI estimado</b>	<b>Observaciones</b>
1. FV 500 kWp + Baterías 2.4 MWh	\$1.750.000	\$77.220	>25 años	No recupera la inversión en 25 años; requiere subsidios o ingresos adicionales
2. FV 500 kWp sin baterías (solo diurno)	\$700.000	\$62.000	9–10 años	Viable para operación parcial diurna. sin respaldo nocturno
3. FV 500 kWp + Baterías + Incentivo 30%	\$1.225.000	\$77.220	17–19 años	Más viable con subsidio estatal o fondo climático para almacenamiento
4. FV 500 kWp + Diésel backup (sin baterías)	\$900.000	\$62.000 (neto)	11–13 años	Menor CAPEX. usa generador como respaldo nocturno; requiere OPEX por diésel
5. FV 700 kWp sin baterías (para cubrir más carga)	\$980.000	\$86.000	11 años	Mayor cobertura del consumo sin baterías; optimiza uso solar directo

**Tabla 8.***Análisis por caso*

<b>Caso</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>FV + baterías (autonomía total parcial)</b>	Autonomía para operación continua (día/noche)	Alto costo de baterías; DPI fuera de rango aceptable sin incentivos
<b>FV solo diurno</b>	Ahorro significativo con menor inversión	Limitado a operación en horas solares; se requiere respaldo de red o generador para noche
<b>FV + baterías con subsidio (ej. fondo climático. gobierno. OLADE)</b>  <b>Supone subsidio del 30% para baterías y equipos FV</b>	Mejora el DPI a niveles aceptables	Alternativa viable si se obtiene financiamiento verde
<b>FV + respaldo con generador diésel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usa generador en las horas fuera del pico solar</li> <li>• Reducción del costo total frente a baterías</li> </ul>	Costo operativo por consumo de diésel. pero inversión más baja
<b>FV ampliado sin baterías (más cobertura en el día)</b>	Aprovecha máximo el recurso solar disponible	Buena opción si se puede coordinar operación del bombeo para funcionar mayormente en horas solares

## **-Análisis multicriterio para toma de decisiones**

Se utiliza una matriz de decisión multicriterio con los cinco escenarios planteados para la implementación del sistema fotovoltaico en el poliducto Libertad–Pascuales. Esta matriz evalúa cada alternativa según criterios técnicos, económicos y ambientales, ponderados para obtener un puntaje final de viabilidad.

### **Criterios y ponderación:**

- Costo inicial (CAPEX): 25%
- Tiempo de recuperación (DPI): 25%
- Ahorro energético anual: 15%
- Autonomía operativa: 15%
- Impacto ambiental (CO<sub>2</sub> evitado): 10%
- Facilidad de implementación: 10%

Cada criterio se puntúa del 1 (muy bajo) al 5 (muy alto), multiplicado por su peso correspondiente. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Matriz de decisión multicriterio*

<b>Escenario</b>	<b>CAPEX (25%)</b>	<b>DPI (25%)</b>	<b>Ahorro (15%)</b>	<b>Autonomía (15%)</b>	<b>Ambiental (10%)</b>	<b>Implementación (10%)</b>	<b>Puntaje final /5</b>
<b>FV + Baterías (2.4 MWh)</b>	2 (0,5)	1 (0,25)	4 (0,60)	5 (0,75)	5 (0,50)	2 (0,20)	2,8
<b>FV sin baterías (500 kWp)</b>	4 (1,00)	4 (1,00)	3 (0,45)	2 (0,30)	4 (0,40)	5 (0,50)	3,65
<b>FV + baterías con subsidio (30%)</b>	3 (0,75)	2 (0,50)	4 (0,60)	5 (0,75)	5 (0,50)	3 (0,30)	3,4
<b>FV + respaldo diésel (sin baterías)</b>	4 (1,00)	3 (0,75)	3 (0,45)	3 (0,45)	3 (0,30)	4 (0,40)	3,35
<b>FV 700 kWp sin baterías (alta cobertura solar)</b>	3 (0,75)	4 (1,00)	5 (0,75)	3 (0,45)	4 (0,40)	4 (0,40)	<b>3.75</b>

El resultado final del análisis multicriterio se presenta en la Tabla 10, donde se presentan a detalle el escenario más viable para implementar el proyecto.

**Tabla 10.**

*Resultado final del análisis multicriterio*

<b>Escenario más viable</b>	<b>FV 700 kWp sin baterías</b>
<b>Puntaje</b>	3,75 / 5
<b>Ventajas</b>	Alta cobertura solar, buen ahorro, fácil implementación, DPI aceptable
<b>Limitación</b>	No opera en la noche; requiere respaldo si es necesario bombeo continuo

### **-Análisis de sensibilidad del DPI**

- **Escenario base:**

- Sistema: Fotovoltaico con baterías (2,4 MWh)
- Inversión inicial: 1,5 millones USD
- Ahorro anual base (con tarifa \$0,12/kWh):  $\approx$  \$273.312
- DPI base: 7,5 años

- **Variables analizadas:**

- Variación del precio de la electricidad: de \$0.10 a \$0.15 USD/kWh
- Variación del costo de las baterías: reducción de hasta el 30% (impacta al CAPEX)

Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en la Tabla 11 y en la Ilustración 15.

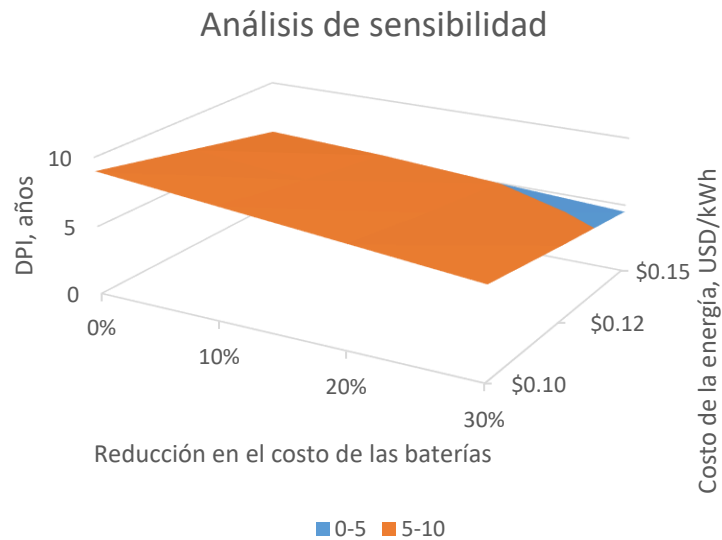
**Tabla 11.**

*Resultado del análisis de sensibilidad*

Precio energía (USD/kWh)	0.10	0.12	0.15
<b>Reducción en costo baterías</b>			
<b>Base (0% costo)</b>	9.0 años	7.5 años	6.0 años
<b>10%</b>	8.2 años	6.8 años	5.6 años
<b>20%</b>	7.4 años	6.1 años	5.0 años
<b>30%</b>	6.6 años	5.5 años	4.5 años

**Ilustración 15.**

*Análisis de sensibilidad por intervalos*



**Nota:** la región de 5-10 años concentra la tarifa de USD 0,15/kWh con una reducción del 30% en el costo de las baterías.

### **Resultado del análisis de sensibilidad:**

- **Tarifa eléctrica más alta con menor DPI:** a \$0,15/kWh, el sistema se paga en menos de 5 años si los costos de baterías bajan un 30%.
- **Reducción del costo de baterías mejora fuertemente la viabilidad económica.**
- En el caso de políticas de subsidio o incentivos fiscales, la inversión se vuelve aún más atractiva (<5 años).

### **3.5 Discusión de resultados.**

Como se puede deducir por medio de los resultados obtenidos para cada escenario descrito. si no se dispone de subsidios inmediatos, los escenarios sin baterías o con respaldo diésel son las opciones más económicamente viables a corto plazo.

Para una estrategia a largo plazo y sostenibilidad ambiental, implicaría que se debería:

- Aplicar a programas de financiamiento climático o bonos verdes
- Diseñar una implementación escalonada: primero FV sin baterías. luego incorporar almacenamiento según disponibilidad de recursos

Por tanto, es importante tomar en cuenta que para la implementación de este tipo de proyectos para la generación de energía por métodos de descarbonación de la producción y transporte de hidrocarburos, es necesario contar con subsidios estatales o incentivos fiscales para poder llevarlos a cabo, ya que como se ha demostrado a través de los cálculos, los costos iniciales de inversión son altos.

## CONCLUSIONES

Conforme a los resultados determinados durante la investigación del tema abordado, se puede concluir lo siguiente:

- 1) Se comprobó la viabilidad técnica de un proyecto solar fotovoltaico para la generación de energía para ser implementada en el sistema de bombeo del poliducto Libertad-Pascuales de EP PETROECUADOR. El área de operación del poliducto Libertad-Pascuales presenta un alto potencial para la generación de energía renovable, especialmente solar, con irradiaciones promedio superiores a 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/día, lo que favorece la instalación de sistemas fotovoltaicos.
- 2) Se determinó que existe una demanda energética significativa. El consumo energético estimado para el sistema de bombeo principal (560 HP) y booster (40 HP), con un régimen promedio de 15 y 3 horas diarias respectivamente, supera los 2.000 MWh anuales, generando costos operativos de más de \$240.000 por año.
- 3) Se encontró a lo largo del análisis técnico-económico que existiría una reducción de costos operativos. La implementación de un sistema fotovoltaico de al menos 700 kWp permitiría cubrir parcialmente la demanda, reduciendo el costo energético en más de \$100.000 anuales, dependiendo de la modalidad (con o sin almacenamiento).
- 4) Se determinó que existe un tiempo de recuperación con base en el análisis del DPI. Según el análisis de sensibilidad, el sistema completo con almacenamiento tiene un DPI base de 7,5 años. Este puede reducirse a menos de 5 años con tarifas eléctricas más altas o disminución del precio de baterías.

- 5) Según el análisis multicriterio, se determinó que la opción más viable actualmente es un sistema fotovoltaico sin almacenamiento de 700 kWp, con un DPI de 4 a 5 años, el cual tiene una alta facilidad de implementación y un buen desempeño ambiental.

## RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan las siguientes recomendaciones obtenidas a lo largo del desarrollo del proyecto de investigación:

1. Implementar un sistema fotovoltaico modular (sin baterías), iniciando con un sistema de 700 kWp conectado a red, aprovechando la alta radiación solar, permitiendo cubrir al menos un 40-50% del consumo diurno.
2. Monitorear el mercado de baterías, para evaluar la incorporación de almacenamiento en el futuro cercano, especialmente si disminuyen los precios de baterías de litio (>20%) o si se habilitan incentivos o financiamiento verde.
3. Gestionar incentivos estatales y alianzas. Se recomienda buscar apoyo mediante programas públicos o privados para energías renovables, reduciendo el CAPEX mediante subsidios, exenciones fiscales u otras estrategias de apalancamiento.
4. Instalar sistema de monitoreo y SCADA básico, con el fin de garantizar el seguimiento de la producción solar y su integración con los equipos de bombeo, asegurar mantenimiento predictivo y continuidad operativa.
5. Analizar la incorporación de respaldo híbrido (solar + diésel) como alternativa para situaciones de alta demanda o contingencia, combinando la energía solar con fuentes convencionales de respaldo.
6. Actualizar el estudio cada 2 años, considerando la evolución tecnológica, cambios tarifarios y condiciones operativas del poliducto, para evaluar la expansión del sistema o mejoras integradas.

## REFERENCIAS

- Acosta-Amado, R. J. (2024). Optimization of petroleum products distribution via pipeline systems: Modeling and computational challenges. In *Heliyon* (Vol. 10, Issue 14). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33947>
- Agajie, T. F., Fopah-Lele, A., Amoussou, I., Ali, A., Khan, B., Mahela, O. P., Nuvvula, R. S. S., Ngwashi, D. K., Soriano Flores, E., & Tanyi, E. (2023). Techno-Economic Analysis and Optimization of Hybrid Renewable Energy System with Energy Storage under Two Operational Modes. *Sustainability*, *15*(15), 11735. <https://doi.org/10.3390/su151511735>
- ARPEL. (2020). *Transiciones energéticas en América Latina y el Caribe El rol de la industria del petróleo y del gas Índice*. <https://www.arpel.org/publicaciones/transiciones-energeticas-america-latina-caribe-industria-petroleo-gas>
- Campaña-Arévalo, G. (2015). *Ficha informativa Proyecto Repotenciación Poliducto Libertad-Pascuales*. <https://sistemasinternos.eppetroecuador.ec/lotaip/pdfs/2015/septiembre/proyectos/PEC%20TP%2013TI24.pdf>
- Cedar Lake Ventures, I. (2025). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Santa Elena Ecuador*.
- CELEC EP. (2022, May 27). *CELEC EP recibe terrenos para futuro proyecto fotovoltaico en Santa Elena*. CELEC EP. <https://www.celec.gob.ec/noticias/celec-ep-recibe-terrenos-para-futuro-proyecto-fotovoltaico-en-santa-elena/>
- Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP. (2024). *Estudio de Potencial Fotovoltaico Solar del Ecuador*. <https://www.celec.gob.ec/wp-content/uploads/2024/05/Folleto-PROYECTOS-FOTOVOLTAICOS-ECU-2024-2-26-FEB.pdf>
- Cuessy-Vázquez, A., Hernández-Arestigui, F., & Lira de la Mora, I. (2009). *Diseño, Construcción y Mantenimiento de un Poliducto en la Ruta Distrito Federal-Paso de Cortes-Puebla-Izucar de Matamoros* [Tesis de grado en Ingeniería Química]

- Petrolera, Instituto Politécnico Nacional].  
<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21440/1/Dise%C3%B1o%20construcci%C3%B3n%20y%20mantenimiento%20de%20un%20poliducto%20en%20la%20ruta%20Distrito%20Federal-Paso%20de%20Cortes-Puebla-Izucar%20de%20Matamoros.pdf>
- CYAMBIENTE LTDA. (2022). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL EX POST POLIDUCTO LIBERTAD-PASCUALES-MANTA*.  
<https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/10/EIA-EX-POST-POLIDUCTO-LIBERTAD-PASCUALES-MANTA.pdf>
- Echeverría Amores, J. P., & Jiménez-Coral, F. B. (2014). *Estudio Técnico-Económico para Mejorar la Distribución de Productos Limpios del Poliducto Quito-Ambato* [Tesis de grado de ingeniería en petróleo, Escuela Politécnica Nacional].  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7841/4/CD-5660.pdf>
- EP PETROECUADOR. (2023). *Plan General de Negocios 2023*.  
<https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/09/PGN-2023-FINAL-con-actualizacion-estimados-05-07-2023-con-resolucion.pdf>
- Fierro-Arcaya, G. (2011). *Elaboración del Manual de Operaciones para la Recepción y Almacenamiento de los Poliductos Libertad Pascuales, del Poliducto Tres Bocas Pascuales y del Poliducto Santo Domingo Pascuales de la Empresa EP-PETROECUADOR* [Tesis de tecnología de petróleo]. Universidad Tecnológica Equinoccial.
- González-Peláez, W. J. (2001). *Diseño de un Sistema SCADA para los Poliductos de la Costa de Petrocomercial* [Tesis de ingeniero en electrónica y telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional].  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10354/3/T1758.pdf>
- Guerrero-Calero, J. M., Moran-González, M., Zapata-Velasco, M. L., Mielles-Giler, J. W., & Cárdenas-Baque, D. A. (2024). *Potencial fotovoltaico para sistemas de bombeo de agua para la comuna de Joa, Manabí, Ecuador*. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(3), 32–45. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n3/119>

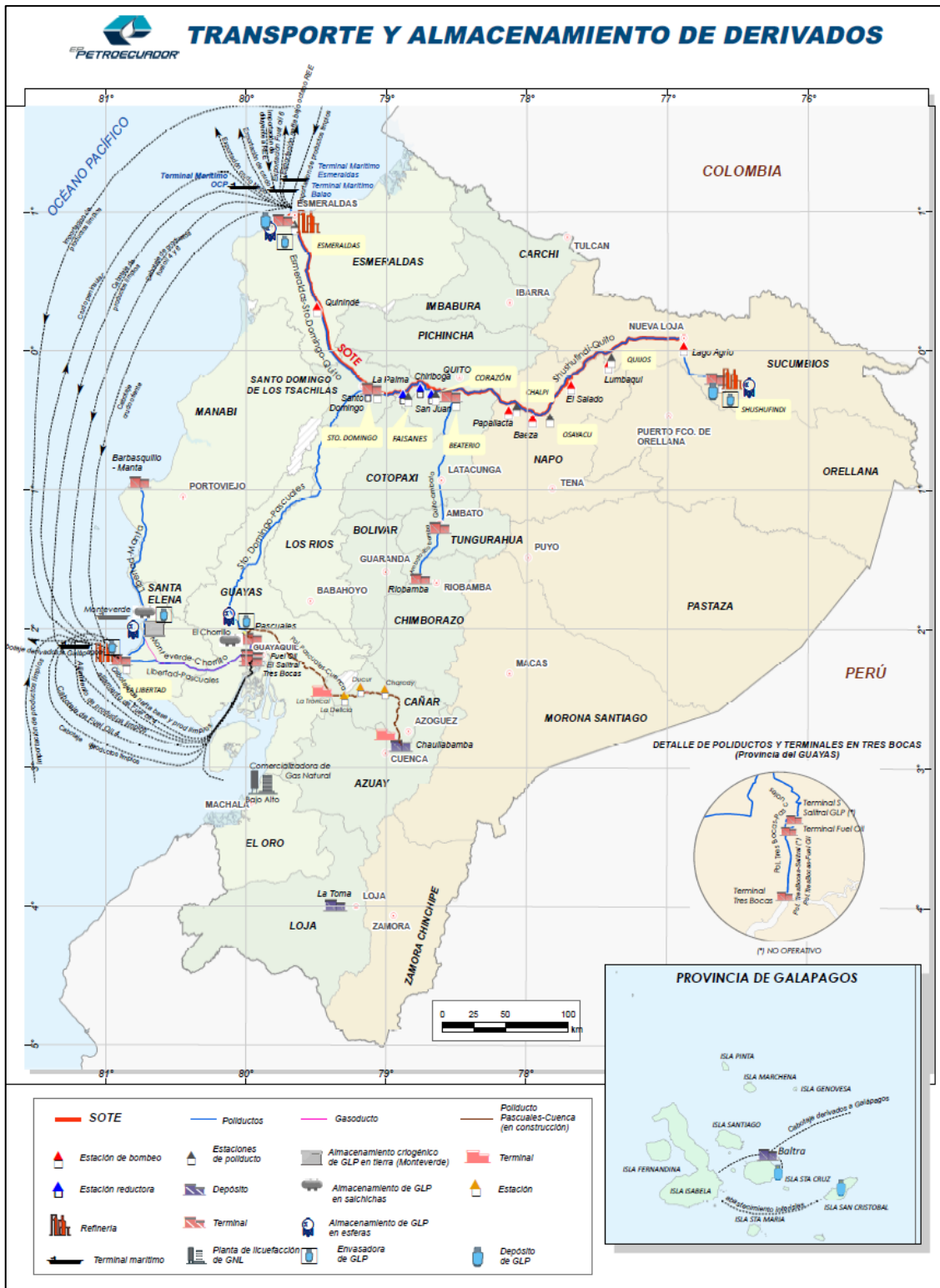
- Gunnarsdottir, I., Davidsdottir, B., Worrell, E., & Sigurgeirsdottir, S. (2021). Sustainable energy development: History of the concept and emerging themes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110770. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110770>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (M. Toledo-Castellanos & M. I. Rocha-Martínez, Eds.; 6th ed.). Mc Graw Hill.
- Holguín Govea, E. M. (2024). *Estudio de un sistema de energía solar fotovoltaica para la empresa camaronera Lanec situada en Engunga provincia de Santa Elena* [Tesis de Maestría en Electricidad Mención Energías Renovables y Eficiencia Energética, Universidad Católica Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/22832/1/UCSG-C437-22373.pdf>
- IEA. (2020). *The Oil and Gas Industry in Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industry-in-energy-transitions>
- Liao, Q., Liang, Y., Tu, R., Huang, L., Zheng, J., Wang, G., & Zhang, H. (2022). Innovations of carbon-neutral petroleum pipeline: A review. *Energy Reports*, 8, 13114–13128. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.09.187>
- Luna Maldonado, E. R. (2008). *Evaluación del potencial eólico y propuesta preliminar para la instalación de un parque aerogenerador en el área de La Chocollera – puntilla de Santa Elena* [Tesis de ingeniero en mecánica, ESPOL]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/8668>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2017). *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035*. [https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2017/09/1.PLAN\\_NACIONAL\\_EFICIENCIA\\_ENERGETICA\\_maqueta-final-digital.pdf](https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2017/09/1.PLAN_NACIONAL_EFICIENCIA_ENERGETICA_maqueta-final-digital.pdf)
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2023). *Plan Maestro de Electricidad*. <https://www.celec.gob.ec/wp-content/uploads/2023/02/Plan-Maestro-de-Electricidad.pdf>
- Mubaarak, S., Zhang, D., Liu, J., Chen, Y., Wang, L., Zaki, S. A., Yuan, R., Wu, J., Zhang, Y., & Li, M. (2020). Potential Techno-Economic Feasibility of Hybrid

- Energy Systems for Electrifying Various Consumers in Yemen. *Sustainability*, 13(1), 228. <https://doi.org/10.3390/su13010228>
- Redacción Ecuavisa y Televistazo. (2023, January 23). “*Petroecuador en agonía*”: se usa diésel importado para la energía en la estatal [Broadcast]. Ecuavisa. <https://www.ecuavisa.com/noticias/economia/petroecuador-en-agonia-se-usa-diesel-importado-para-la-energia-en-la-estatal-JD4261830>
- Rinkenbach, J. P. (2023, May 16). Retos de la transición energética para las empresas petroleras. *Plumas invitadas*. <https://energiaadebate.com/retos-de-la-transicion-energetica-para-las-empresas-petroleras/>
- Salisu, S., Mustafa, M. W., Olatomiwa, L., & Mohammed, O. O. (2019). Assessment of technical and economic feasibility for a hybrid PV-wind-diesel-battery energy system in a remote community of north central Nigeria. *Alexandria Engineering Journal*, 58(4), 1103–1118. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2019.09.013>
- Suárez-Quimí, Y., & Solórzano-Toala, J. (2025). *Propuesta de Sistema de Detección de Fugas en Ductos de Transporte de Hidrocarburos para Detectar la Sustracción Clandestina de Combustible en la Provincia de Santa Elena* [Tesis de ingenieros en petróleo, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/12999/1/UPSE-TPE-2025-0008.pdf>
- TLS Offshore Containers / TLS Energy. (2024, September 15). *Battery Management System (BMS) in Battery Energy Storage Systems (BESS): Importance, Architecture, and Functions*.
- United Nations. (2024). *The Sustainable Development Goals Report*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf>
- Vásquez, A. P., Rodríguez, M. G., Saltos A, W. M., Rodríguez B, C. G., & Cuenca A, L. A. (2018). Rendimiento energético, económico y ambiental de una Central Fotovoltaica de 3,4 KWp en el modo de la generación distribuida (GD). *Revista Espacios*, 39(47), 47. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n47/a18v39n47p34.pdf>

Villavicencio, L., Torres, M., & Pincay, J. (2021). *Evaluación y optimización del dimensionamiento de sistemas híbridos de generación eólicos y fotovoltaicos para bombeo de agua en zonas aisladas* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Manabí]. Repositorio UTM.

# ANEXOS

## Anexo 1: Poliductos y Terminales de EP PETROECUADOR



Fuente: EPP Petroecuador (2018)