

Percepciones y barreras para la adopción de bombeo fotovoltaico en el sector petrolero colombiano.

Elaborado por:

Angie Prieto Velásquez

Briyid Katherine López Vargas

Universidad EAN

Escuela de Formación en Investigación

Seminario de Investigación de Pregrado

Bogotá

03/11/2025

Resumen

Las estaciones de bombeo de crudo en Colombia dependen de energía eléctrica y diésel, generando altos costos y emisiones. Este proyecto busca evaluar la viabilidad técnica y económica de integrar bombeo solar fotovoltaico, en comparación con bombas mecánicas y motores de imanes permanentes. Referencias como Rojas-Triviño y Pérez-Soto (2023), Habib et al. (2023) y la Ley 1715 de 2014 respaldan la pertinencia de esta alternativa en la transición energética nacional.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica, Transición energética, Viabilidad económica, Bombas hidráulicas, Industria petrolera, Sostenibilidad ambiental.

Problema de Investigación

Las estaciones de bombeo de crudo en Colombia constituyen infraestructuras críticas para garantizar el transporte de hidrocarburos desde los campos de producción hasta las refinerías y puertos de exportación. Su operación depende en gran medida de fuentes energéticas tradicionales, como la red eléctrica y los generadores diésel, lo que implica altos costos de operación, dependencia de combustibles fósiles y una contribución significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero (Ministerio de Minas y Energía, 2025).

Aunque Colombia dispone de elevados niveles de radiación solar, que oscilan entre 4,5 y 6 kWh/m² diarios (UPME, 2005), y de un marco normativo favorable representado en las Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021, que promueven la adopción de energías renovables mediante incentivos tributarios y regulatorios (Congreso de la República de Colombia, 2001, 2014, 2021), la adopción de sistemas de bombeo fotovoltaico en el sector petrolero sigue siendo limitada. Esta baja adopción no solo puede atribuirse a factores técnicos o económicos, sino también a la percepción que tienen los expertos y tomadores de decisiones sobre su viabilidad y aplicabilidad en contextos operativos reales.

Existe, por tanto, una falta de comprensión sobre la percepción, aceptación y disposición de los expertos del sector petrolero y energético frente a la implementación de bombas fotovoltaicas en estaciones de bombeo, así como sobre las barreras y oportunidades que influyen en su adopción. Analizar estas percepciones permitirá identificar los factores técnicos, económicos,

regulatorios y organizacionales que determinan la viabilidad y el potencial de esta tecnología en el marco de la transición energética colombiana.

Pregunta de Investigación

¿Cuál es la percepción de los expertos del sector petrolero y energético en Colombia sobre la viabilidad técnica y regulatoria de las bombas fotovoltaicas para el bombeo de crudo, y qué barreras y oportunidades identifican para su implementación?

Objetivos

Objetivo general.

Describir la percepción, aceptación y disposición de expertos del sector petrolero y energético en Colombia frente a la implementación de bombas fotovoltaicas en estaciones de bombeo de crudo, a partir de encuestas y entrevistas, con el fin de identificar barreras, oportunidades y condiciones para su adopción.

Objetivos específicos.

1. **Caracterizar** el perfil de los expertos participantes según su experiencia, rol en la industria y nivel de conocimiento sobre tecnologías de bombeo y energías renovables.
2. **Analizar** la percepción técnica de los expertos acerca de la viabilidad operativa y confiabilidad de las bombas fotovoltaicas frente a alternativas convencionales.
3. **Identificar** la percepción económica y regulatoria en relación con los costos de inversión, operación y los incentivos para la adopción de esta tecnología.
4. **Explorar** la disposición e intención de uso de los expertos y sus organizaciones hacia la implementación de bombas fotovoltaicas en estaciones de bombeo.
5. **Determinar** las principales barreras y facilitadores que influyen en la adopción de esta tecnología en el sector petrolero colombiano.

Justificación

El sector de hidrocarburos en Colombia enfrenta retos crecientes en materia de eficiencia energética, sostenibilidad y competitividad. Las estaciones de bombeo de crudo, que son infraestructuras críticas para el transporte, dependen en gran medida de la energía de la red eléctrica y de generadores diésel, lo cual incrementa significativamente los costos operativos y genera elevadas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME], 2016; Ministerio de Minas y Energía, 2025). Esta situación plantea la necesidad de explorar alternativas energéticas que no solo aseguren la continuidad del servicio, sino que también promuevan la reducción de la huella ambiental.

En este contexto, la energía solar fotovoltaica se ha consolidado en la última década como una de las tecnologías más competitivas en la generación de electricidad a nivel mundial, debido a la drástica reducción en los costos de inversión y operación, así como a los avances tecnológicos en eficiencia y almacenamiento (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022; Rojas-Triviño & Pérez-Soto, 2023). En Colombia, el potencial solar es elevado, con una radiación promedio de 4,5 a 6 kWh/m² diarios en zonas estratégicas, lo cual refuerza la pertinencia de su aplicación en sistemas industriales de alta demanda energética (UPME, 2005). A esto se suma un marco normativo favorable, representado en la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021, que ofrecen incentivos tributarios y regulatorios para proyectos de energías renovables (Congreso de la República de Colombia, 2021).

La literatura reciente respalda la viabilidad de esta alternativa. Rojas-Triviño y Pérez-Soto (2023) demostraron que la implementación de bombeo fotovoltaico en la industria de hidrocarburos colombiana resulta competitiva frente a opciones convencionales, con resultados positivos en términos de CAPEX, OPEX y costo nivelado de la energía (LCOE). De forma complementaria, Ali y Juma (2021) evidenciaron ventajas económicas y ambientales del bombeo solar frente al diésel en estaciones petroleras, mientras que Iqbal y Hasan (2022) destacaron su factibilidad técnica en contextos remotos. Estas investigaciones sugieren que los sistemas solares no solo son confiables, sino que también representan una alternativa escalable y replicable en la industria.

Por lo anterior, este proyecto es relevante y oportuno, ya que permitirá identificar las condiciones técnicas, económicas y ambientales bajo las cuales es viable implementar bombas solares fotovoltaicas en estaciones de bombeo de crudo en Colombia. Los hallazgos contribuirán a optimizar los costos operativos, reducir las emisiones de GEI y fortalecer la transición

energética en el sector, ofreciendo un modelo replicable para otras operaciones industriales de alto consumo energético.

Marco Teórico

Energía solar fotovoltaica y su potencial en Colombia

La energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las fuentes renovables más competitivas en la última década, con reducciones de hasta un 82 % en los costos de inversión por kW entre 2010 y 2021 (Ministerio de Minas y Energía, 2023). En Colombia, el potencial solar se estima entre 4,5 y 6 kWh/m²/día, valores superiores al promedio global (Castro López & Castiblanco Orjuela, 2020; UPME, 2005). Este recurso, sumado al crecimiento acelerado de proyectos entre 2021 y 2024 (Bancolombia, 2025), evidencia condiciones favorables para la masificación de tecnologías solares en distintos sectores, incluidos aquellos de alta demanda energética como el transporte de hidrocarburos.

Estado del arte del bombeo fotovoltaico

El bombeo solar fotovoltaico ha tenido aplicaciones principalmente en contextos rurales y agrícolas, mostrando ventajas en eficiencia y bajos costos frente al diésel o la red eléctrica (Peralta, 2018; Fernández, 2022). Estudios recientes confirman estas ventajas: Habib et al. (2023) reportan eficiencias del 74,62 % con costos operativos casi nulos, mientras que Ibrik (2020) encontró que el costo del kWh solar (0,086 USD) es más bajo que el de la red (0,18 USD) y el diésel (0,45 USD). Experiencias como las implementadas en Texas por Lorentz (2020) demuestran la aplicabilidad de estas tecnologías en pozos petroleros. En América Latina, Gorostiza (2025) analizó un sistema híbrido solar-convencional en una estación de bombeo en Ecuador, con ahorros anuales de más de 17.000 USD y reducción de emisiones, evidenciando la pertinencia de esta alternativa en el sector petrolero.

Marcos de análisis de viabilidad

La viabilidad de proyectos de bombeo fotovoltaico se analiza desde tres dimensiones principales: técnica, económica y ambiental.

- **Técnica:** La eficiencia de los sistemas depende de variables como irradiancia, temperatura, pérdidas de carga y viscosidad de los fluidos (Ahmed et al., 2023)
- **Económica:** Aunque la inversión inicial es alta, los costos nivelados de energía son menores que los de tecnologías convencionales, lo que asegura retornos de inversión en plazos relativamente cortos (Khan et al., 2022; Ibrik, 2020). Herramientas como PVSyst, RETScreen y PV*SOL son ampliamente usadas para modelar estos proyectos (Castro López & Castiblanco Orjuela, 2020).
- **Ambiental:** Las evaluaciones de impacto, como la matriz de Leopold, permiten identificar beneficios claros en reducción de emisiones de CO₂ frente a sistemas fósiles (Vílchez Ochoa, 2022).

Marco regulatorio energético en Colombia

El país cuenta con un marco legal que incentiva las energías renovables. La Ley 1715 de 2014 promovió la integración de FNCER a través de incentivos tributarios, exenciones arancelarias y beneficios contables (Congreso de Colombia, 2014). Posteriormente, la Ley 2099 de 2021 amplió estos beneficios al incluir almacenamiento y eficiencia energética (Congreso de Colombia, 2021). Además, el Ministerio de Minas y Energía (2023) ha señalado la competitividad creciente de la energía solar y su papel estratégico en la transición energética justa.

Impactos ambientales y sostenibilidad empresarial

La integración de energías renovables en procesos industriales no solo reduce costos, sino que fortalece el compromiso empresarial con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (acción por el clima). Organismos como la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2022) destacan que la expansión de la energía solar contribuye de manera significativa a la descarbonización global. En el contexto colombiano, gremios como Campetrol (s. f.) han enfatizado la necesidad de que el sector petrolero adopte soluciones sostenibles, mientras empresas como Celsia (s. f.) han demostrado con proyectos a gran escala la viabilidad empresarial de estas inversiones.

Metodología

Primer nivel

Enfoque, alcance y diseño de la investigación

La presente investigación es de tipo cuantitativo, descriptivo y tiene como objetivo analizar la percepción de expertos del sector petrolero y energético en Colombia respecto a la viabilidad técnica y regulatoria de la implementación de bombas fotovoltaicas en el bombeo de crudo.

El enfoque cuantitativo permitirá medir y analizar datos obtenidos a través de encuestas estructuradas aplicadas a una muestra de expertos del sector petrolero. El diseño descriptivo tiene como objetivo caracterizar la visión de los expertos y su disposición hacia la adopción del bombeo fotovoltaico.

Definición de Variables

Para este estudio se definieron variables que permitirán medir la percepción de los expertos sobre la viabilidad técnica y regulatoria de la implementación de bombas fotovoltaicas en el bombeo de crudo, así como las barreras y facilitadores que influyen en su adopción.

A continuación, se presentan las definiciones conceptuales y operacionales de cada variable:

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones / indicadores
Percepción técnica	Opinión de los expertos sobre la viabilidad y la confiabilidad operativa de los sistemas fotovoltaicos para abastecer el bombeo en	Medida mediante 5 ítems tipo Likert (1–5): <ul style="list-style-type: none"> • T1 Continuidad y seguridad del suministro con o sin respaldo. • T2 Integración con bombas, variadores y SCADA existentes. • T3 Gestión de la variabilidad solar (baterías/diésel/red). 	<ul style="list-style-type: none"> – Viabilidad técnica (gestión de variabilidad, desempeño hidráulico) – Confiabilidad / continuidad – Mantenimiento – Integración e interoperabilidad

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones / indicadores
	estaciones de crudo (integración, continuidad, desempeño hidráulico y mantenimiento).	<ul style="list-style-type: none"> • T4 Mantenibilidad con capacidades actuales de personal/proveedores. • T5 Capacidad para sostener caudal y altura manométrica. 	
Percepción económica	Valoración sobre costos y rentabilidad de un sistema fotovoltaico frente a alternativas convencionales (diésel/red).	<p>Medida mediante 5 ítems tipo Likert (1–5):</p> <ul style="list-style-type: none"> • E1 Recuperación del CAPEX (payback) en plazo razonable. • E2 Reducción de OPEX ≥ 5 años. • E3 LCOE del FV competitivo vs. alternativas. • E4 Incentivos tributarios/regulatorios mejoran la rentabilidad. • E5 Costos de respaldo no anulan beneficios económicos 	<ul style="list-style-type: none"> – Inversión inicial y payback (CAPEX) – Costos operativos (OPEX) – Costo nivelado de energía (LCOE) – Incentivos y rentabilidad – Costos de respaldo (baterías/diésel/red)

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones / indicadores
<p>Percepción regulatoria y de viabilidad institucional</p>	<p>Percepción sobre la claridad y suficiencia del marco normativo, los trámites, los esquemas contractuales y las capacidades institucionales (HSE y mercado de proveedores) para implementar proyectos FV en estaciones de bombeo.</p>	<p>Medida mediante 5 ítems tipo Likert (1–5):</p> <ul style="list-style-type: none"> • R1 Normativa actual facilita proyectos FV en estaciones de bombeo. • R2 Trámites ambientales/de conexión/permisos son claros y manejables. • R3 Existen mecanismos contractuales adecuados (PPA, autogeneración, etc.). • R4 Requisitos de seguridad industrial (HSE) son compatibles con instalaciones FV. • R5 Disponibilidad/calidad de proveedores y servicio técnico en el país es suficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> – Normativa e incentivos – Trámites y permisos – Esquemas contractuales (PPA, autogeneración) – Seguridad industrial (HSE) – Mercado y proveedores
	<p>Grado en que los expertos y sus organizaciones están dispuestos a recomendar, priorizar, financiar y participar en</p>	<p>Medida mediante 5 ítems tipo Likert (1–5):</p> <ul style="list-style-type: none"> • A1 Recomendar evaluación formal para estaciones conocidas. • A2 Considerar inversión en piloto ≤12 	<ul style="list-style-type: none"> – Recomendación – Inversión en piloto (≤12 meses) – Patrocinio ejecutivo – Participación personal – Prioridad estratégica

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones / indicadores
Disposición de uso / aceptación (Intención de adopción)	proyectos FV en estaciones de bombeo.	meses. <ul style="list-style-type: none"> • A3 Percepción de patrocinio de la alta dirección. • A4 Disposición personal a participar (sponsor/rol técnico). • A5 Prioridad estratégica de incorporar FV. 	
Barreras y facilitadores	Factores técnicos, económicos, regulatorios, de seguridad y organizacionales que limitan o favorecen la adopción de sistemas FV en estaciones de bombeo.	Medida mediante selección múltiple: <ul style="list-style-type: none"> • Barreras (B1–B10): técnica/variabilidad, espacio/sombras, necesidad de respaldo, falta de datos, CAPEX/financiamiento, trámites/regulación, HSE/seguridad, resistencia cultural, proveedores, otro. Incluye pregunta abierta 8.1 para detallar barrera principal. <ul style="list-style-type: none"> • Facilitadores (F1–F9): incentivos, ahorro OPEX, metas ODS, espacio disponible, experiencia previa, 	<ul style="list-style-type: none"> – Barreras: técnicas, económicas, regulatorias, HSE/seguridad, organizacionales, mercado/proveedores – Facilitadores: incentivos, ahorro, objetivos corporativos, disponibilidad física, experiencia y financiamiento

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones / indicadores
		financiación/PPA/ESCO, proveedores, datos/modelos, otro.	
Impacto ambiental y sostenibilidad	Percepción sobre los beneficios ambientales y de sostenibilidad asociados a la adopción de FV (reducción de GEI, reputación, huella y reporte).	<p>Medida mediante 4 ítems tipo Likert (1–5):</p> <ul style="list-style-type: none"> • S1 Reducción significativa de emisiones de GEI. • S2 Mejora de reputación/licencia social. • S3 Huella ambiental total menor que diésel/red. • S4 Compromiso de medir y reportar (ODS 7 y 13). 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducción de GEI – Reputación/licencia social – Huella ambiental comparativa – Medición y reporte (ODS)
Perfil de los expertos	Características sociodemográficas y profesionales para describir a los participantes según su experiencia en el sector petrolero y energético.	Medida mediante preguntas cerradas: sector/segmento (Q5), tipo de organización (Q6), región (Q7), años de experiencia (Q4), exposición previa a FV (Q8), participación en proyectos de bombeo (Q9) y fuentes de energía predominantes (Q10).	<ul style="list-style-type: none"> – Sector y rol – Región – Años de experiencia – Nivel de conocimiento/experiencia en FV – Experiencia en bombeo – Contexto energético de referencia

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones / indicadores
Priorización de condiciones críticas de decisión	Condiciones que los expertos consideran más determinantes para aprobar un proyecto FV en estación de bombeo.	Pregunta de selección múltiple (máx. 3) con lista de condiciones: payback, garantía de caudal/altura, trámite de conexión, financiamiento/PPA, respaldo robusto, espacio disponible, soporte/proveedores, compromiso directivo, beneficios tributarios, otro.	<ul style="list-style-type: none"> - Económico-financieras (payback, financiamiento, beneficios) - Técnicas (garantía de caudal/altura, respaldo) - Regulatorias (trámite de conexión) - Organizacionales/mercado (soporte, compromiso, espacio)
Experiencia previa en FV (módulo condicional)	-	Se muestra si Q8 = Media/Alta. Preguntas 12.1-12.5: tipo de proyecto, tamaño (kWp), almacenamiento, resultado económico, lecciones clave.	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo y tamaño del proyecto - Presencia de almacenamiento - Desempeño económico percibido - Aprendizajes

Alcance y diseño

El diseño adoptado es no experimental, transversal y descriptivo-aplicado.

- **No experimental**, porque no se manipularán variables, sino que se observarán percepciones y experiencias reales.

- **Transversal**, ya que la recolección de la información se hará en un único momento del tiempo.
- **Descriptivo-aplicado**, dado que se pretende caracterizar percepciones y actitudes de los expertos, pero también generar recomendaciones prácticas para el sector petrolero colombiano

Población y Muestra

La población para esta investigación estará constituida por profesionales con experiencia en operaciones de estaciones de bombeo y en tecnologías de energía solar fotovoltaica. Se incluyen: ingenieros de operaciones y mantenimiento de estaciones de bombeo, líderes de proyectos, profesionales con conocimientos en equipos fotovoltaicos, y profesionales de entidades reguladoras o gremiales vinculadas al sector energético y petrolero. Los participantes deben contar con experiencia técnica o gerencial relevante para evaluar la viabilidad técnica y regulatoria del bombeo fotovoltaico.

Se cuenta con la disponibilidad aproximada de 12 profesionales entre el sector petrolero y el sector de energía solar fotovoltaica.

Tipo de muestreo

Dado el tamaño de la población disponible (12 expertos), se adopta un censo por conveniencia para la fase cuantitativa (encuesta estructurada). Se invitará a participar a la totalidad de los 12 expertos por medio de tecnología.

<https://forms.office.com/Pages/ResponsePage.aspx?id=WbVvwGgbhEuhT0fQ2Delq7h7eZu2JXhMpmjbcDb8CW5UM1hBRIBJS0IGRFdIT05BWFIGQUVVOUFJSy4u>

Criterios de inclusión y Exclusión

- **Criterios de inclusión:** profesionales con experiencia mínima de 2 años en el sector petrolero o en proyectos de energía solar fotovoltaica; cargo relacionado con operación, mantenimiento, diseño, provisión o regulación de estaciones de bombeo; disposición para participar en encuesta.
- **Criterios de exclusión:** profesionales sin experiencia relevante en el tema o que no otorguen consentimiento para participar.

Segundo nivel

Selección de métodos o instrumentos para recolección de información

Propósito del análisis y alineación con objetivos

El análisis cuantitativo de la encuesta tiene como finalidad describir y explicar las percepciones de expertos del sector petrolero y energético en Colombia acerca de la viabilidad del bombeo fotovoltaico (FV) en estaciones de crudo, así como estimar la intención de adopción, identificar barreras/facilitadores y priorizar condiciones críticas de decisión. Dado el diseño no experimental y transversal, el énfasis recae en la caracterización de tendencias, la comparación entre grupos (rol, segmento, tipo de organización, regional y experiencia) y la modelación asociativa para comprender qué percepciones se vinculan con mayor intención de adopción.

Preparación, depuración y calidad de los datos

Antes de la inferencia se implementará un protocolo de **aseguramiento de calidad**:

Validación y depuración.

- Eliminación de duplicados y registros con tiempos irregulares ej., formularios completados en <2–3 minutos si el cuestionario exige 8–12 minutos.
- Para evitar errores de respuestas no contestadas, se determinará en la encuesta todas como obligatorias

Tratamiento de valores faltantes.

- Las categorías “No sabe/No aplica” se codificarán como NA y no ingresarán al cálculo de promedios.

Codificación y dicotomización.

- Escalas Likert: 1 = totalmente en desacuerdo ... 5 = totalmente de acuerdo.
- Barreras (B1–B10) y facilitadores (F1–F9): dicotomización marcado = 1 / no marcado = 0.
- Priorización (Q11): se permite hasta 3 marcas; se construye un conteo por opción y proporción sobre el total de participantes.

Construcción de índices y evaluación de fiabilidad

Las dimensiones de percepción se operativizan como índices compuestos mediante el promedio de sus ítems:

- ITEC (Índice Técnico) = promedio (T1–T5).
- IECO (Índice Económico) = promedio (E1–E5).
- IREG (Índice Regulatorio/Institucional) = promedio (R1–R5).
- IADOP (Índice de Adopción) = promedio (A1–A5).
- ISOS (Índice de Sostenibilidad) = promedio (S1–S4).

Estadística descriptiva y visualización

Se presentarán descriptores univariados por ítem e índice:

- Medidas de tendencia y dispersión: media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo.
- Barreras y facilitadores: frecuencias absolutas y relativas y un diagrama de Pareto para priorizar las categorías más incidentes.
- Priorización (Q11): ranking de condiciones críticas por conteo y proporción; se mostraran top-3 global y por segmentos

Reporte de resultados

El informe presentará:

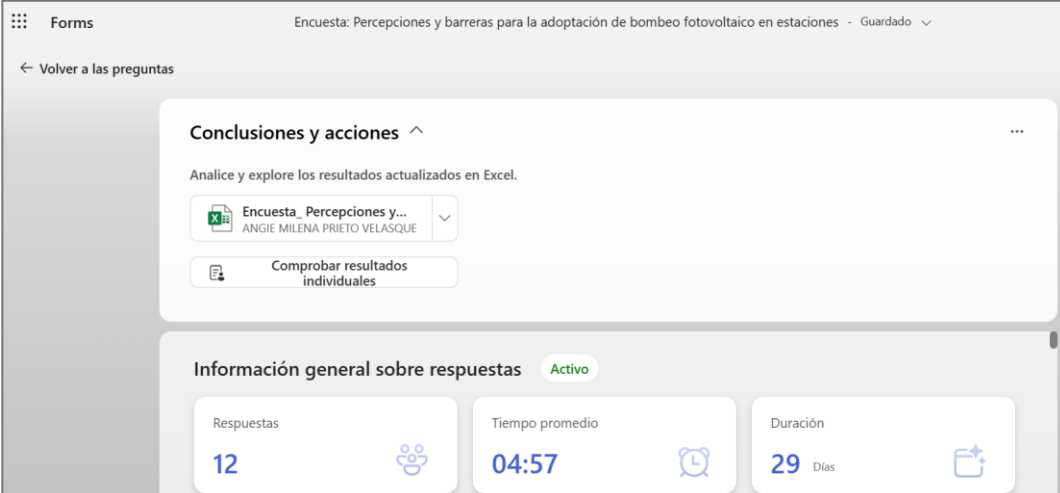
- Tablas de fiabilidad e ítem-total por índice.
- Descriptivos por ítem e índice, con gráficos.
- Barreras/facilitadores como pareto y coocurrencias y/o priorización ranking global y segmentado)

Cierre operativo

Con este plan, el análisis solo con encuestas podremos primero, validar la consistencia de las escalas, segundo, mapear el estado de las percepciones en la industria, tercero, explicar qué dimensiones se asocian más con la intención de adopción, y finalmente, priorizar acciones para un piloto FV (trámites, esquema contractual, respaldo, financiamiento) según los perfiles donde la adopción es más factible.

Análisis y discusión de los resultados

Se analizó una encuesta aplicada a trabajadores del sector energético/petrolero en Colombia para conocer su percepción sobre el bombeo fotovoltaico en estaciones y las barreras y facilitadores para su adopción. La base de datos contiene 12 respuestas y 44 columnas que incluyen variables sociodemográficas, percepciones sobre la tecnología, barreras y facilitadores, así como la importancia de distintos impactos ambientales y sociales. Los ítems de percepción se midieron mediante una escala Likert de cinco puntos que asigna 1 a totalmente en desacuerdo y 5 a totalmente de acuerdo.



Forms Encuesta: Percepciones y barreras para la adaptación de bombeo fotovoltaico en estaciones - Guardado

← Volver a las preguntas

Conclusiones y acciones

Analice y explore los resultados actualizados en Excel.

Encuesta_Percepciones y...
ANGIE MILENA PRIETO VELASQUE

Comprobar resultados individuales

Información general sobre respuestas

Activo

Respuestas	Tiempo promedio	Duración
12	04:57	29 Días

Caracterización del perfil de los expertos

La muestra analizada estuvo compuesta por doce (12) expertos provenientes de distintos segmentos del sector energético y petrolero. Entre los participantes se incluyen ingenieros eléctricos y mecánicos, responsables de operación y mantenimiento, así como personal vinculado a áreas de planeación, proyectos y regulación. Esta composición refleja una diversidad de perspectivas técnicas y gerenciales, lo cual fortalece la validez de los hallazgos obtenidos. En términos regionales, los encuestados se concentraron principalmente en Bogotá, Cartagena y la región Andina (Neiva), zonas donde se ubican operaciones críticas de transporte de crudo. Los resultados evidencian que los ingenieros mecánicos y eléctricos presentan los niveles más altos de percepción técnica y regulatoria, mientras que los profesionales de áreas administrativas o de gobierno tienden a mostrar una postura más conservadora frente a la adopción del bombeo fotovoltaico. Esto sugiere que el grado de conocimiento y exposición a tecnologías renovables influye directamente en la percepción de viabilidad de la solución.

Percepción técnica

El índice técnico (media = 3,51; DE = 0,76) evidencia una percepción moderadamente positiva sobre la viabilidad operativa de las bombas fotovoltaicas. Los expertos reconocen que los avances en variadores, sistemas SCADA y tecnologías híbridas (red-diésel-baterías) permiten mantener la continuidad del bombeo bajo condiciones variables de irradiancia. Sin embargo, persisten inquietudes sobre la gestión de la intermitencia solar y la necesidad de sistemas de respaldo que garanticen la estabilidad del caudal. Este resultado coincide con lo reportado por Habib et al. (2023), quienes resaltan que la confiabilidad del sistema depende del diseño hidráulico y del control operacional implementado.

Desde la perspectiva de la confiabilidad, los encuestados destacan la mantenibilidad de los equipos fotovoltaicos y su compatibilidad con la infraestructura existente, lo cual sugiere que la tecnología podría integrarse sin requerir modificaciones mayores en las estaciones actuales. La percepción técnica más favorable en roles de ingeniería refuerza la hipótesis de que la experiencia práctica es un factor determinante para aceptar la factibilidad tecnológica del bombeo fotovoltaico.

Para una visión más completa de los hallazgos, se recomienda consultar el apartado “Análisis Detallado de Gráficas – A. Estadística Descriptiva”, donde se presentan los resultados específicos y su interpretación correspondiente.

Percepción económica y regulatoria

El índice económico presenta el valor promedio más bajo (media = 3,45), lo que indica una preocupación constante por los costos de inversión y el retorno financiero de los proyectos. Aunque los incentivos tributarios previstos en las Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021 son reconocidos como facilitadores relevantes, los encuestados consideran que la inversión inicial y las dificultades de financiación siguen siendo barreras significativas. Estos hallazgos concuerdan con lo descrito por Khan et al. (2022) y Ali & Juma (2021), quienes subrayan que la rentabilidad de los proyectos fotovoltaicos industriales depende en gran medida del costo nivelado de la energía (LCOE) y del acceso a mecanismos de financiación estables

Por su parte, el índice regulatorio/institucional (media = 3,60) fue el más alto de los cuatro, reflejando una moderada confianza en la claridad del marco normativo colombiano. Los expertos perciben que la legislación actual facilita la adopción de energías renovables, aunque advierten que los trámites ambientales y de conexión aún pueden representar cuellos de botella administrativos. De acuerdo con Ortiz Motta et al. (2012) y Estudio Legal Hernández (2024), la simplificación de los permisos y la consolidación de contratos tipo PPA constituyen factores decisivos para acelerar la adopción tecnológica en el sector energético.

Para una visión más completa de los hallazgos, se recomienda consultar el apartado “Análisis Detallado de Gráficas – A. Estadística Descriptiva”, donde se presentan los resultados específicos y su interpretación correspondiente.

Disposición e intención de adopción

El índice de adopción (media = 3,63) muestra una disposición positiva hacia la implementación de proyectos piloto de bombeo fotovoltaico. La mayoría de los encuestados expresaron voluntad de recomendar evaluaciones técnicas y de participar en estudios de factibilidad dentro de un horizonte de doce meses. Esta actitud sugiere una apertura progresiva hacia la innovación energética, especialmente en contextos donde los beneficios ambientales y reputacionales son valorados por las organizaciones. IRENA (2022) y Campetrol (s.f.) destacan

que este tipo de proyectos fortalecen la imagen corporativa y alinean las operaciones con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y 13).

Las correlaciones positivas entre los índices técnico, económico y regulatorio con el índice de adopción confirman que la disposición a incorporar bombeo fotovoltaico depende de la conjunción de factores de viabilidad tecnológica, claridad normativa y rentabilidad percibida. En particular, la correlación alta ($r \approx 0,80$) entre los índices económico y regulatorio evidencia que la percepción de estabilidad institucional puede aumentar la confianza en la viabilidad financiera de la tecnología.

Para una visión más completa de los hallazgos, se recomienda consultar el apartado “Análisis Detallado de Gráficas – C. Priorización de Condiciones Críticas”, donde se presentan los resultados específicos y su interpretación correspondiente.

Barreras y facilitadores para la adopción

Entre las barreras más relevantes identificadas se encuentran las dudas técnicas relacionadas con la variabilidad solar (58 %), la necesidad de respaldo (42 %), la limitación de espacio o presencia de sombras (33 %) y la falta de datos confiables de consumo (33 %). Estos factores técnicos y operativos limitan la madurez de los proyectos en fase de diseño, especialmente en estaciones donde la demanda energética presenta alta variabilidad diaria. De manera complementaria, los altos costos iniciales y la dificultad de acceso a financiamiento refuerzan las restricciones económicas percibidas por los encuestados.

En contraste, los principales facilitadores fueron las metas corporativas de descarbonización (83 %), los incentivos tributarios vigentes (58 %) y la disponibilidad de datos de consumo y modelos de ingeniería (42 %). Estos resultados revelan que las políticas organizacionales y gubernamentales tienen un papel fundamental para impulsar la transición energética. El alineamiento entre los objetivos empresariales y las metas nacionales de sostenibilidad crea un entorno favorable para la inversión en proyectos de energías limpias. Según Gorostiza (2025) y Ministerio de Minas y Energía (2025), la existencia de programas de incentivos y la cooperación público-privada son elementos clave para superar las barreras estructurales en la adopción de tecnologías fotovoltaicas.

Para una visión más completa de los hallazgos, se recomienda consultar el apartado “Análisis Detallado de Gráficas – B. Barreras y Facilitadores”, donde se presentan los resultados específicos y su interpretación correspondiente.

Comparaciones entre grupos y correlaciones

El análisis comparativo muestra que los ingenieros mecánicos y eléctricos poseen percepciones más favorables que los roles administrativos y gubernamentales, tanto en los índices técnico como regulatorio. En cuanto a las regiones, Neiva-Andina presenta los valores más altos en la mayoría de los índices, lo cual puede atribuirse a una mayor exposición a radiación solar y proyectos piloto en esa zona. Este comportamiento evidencia que la familiaridad con el recurso solar influye en la percepción de su aplicabilidad. El sector upstream mostró la percepción técnica más positiva, mientras que el sector gubernamental exhibe las más bajas, reflejando diferencias de contexto y prioridades organizacionales.

Las correlaciones de Pearson evidencian asociaciones moderadas a altas entre las dimensiones analizadas, destacándose la relación entre el índice regulatorio y el económico ($r \approx 0,80$). Esto confirma que los expertos asocian un marco normativo sólido con la viabilidad económica de los proyectos. En términos prácticos, una regulación estable y predictiva reduce la percepción de riesgo y promueve la disposición a invertir en tecnologías renovables dentro del sector petrolero.

Para una visión más completa de los hallazgos, se recomienda consultar el apartado “Análisis Detallado de Gráficas – C. Priorización de Condiciones Críticas” y D. Asociación entre Variables, donde se presentan los resultados específicos y su interpretación correspondiente.

Síntesis interpretativa de los hallazgos

De manera general, los resultados obtenidos permiten concluir que existe una percepción positiva hacia la adopción de bombeo fotovoltaico en el sector petrolero colombiano, aunque persisten desafíos técnicos y económicos que deben ser atendidos. El marco regulatorio es visto como un soporte clave, y los incentivos tributarios son reconocidos como facilitadores decisivos. Sin embargo, la rentabilidad financiera y la confiabilidad del suministro siguen siendo los puntos críticos que determinan la intención final de adopción.

En coherencia con la literatura especializada (Rojas-Triviño & Pérez-Soto, 2023; Iqbal & Hasan, 2022; Ahmed et al., 2023), los hallazgos evidencian que la integración de bombeo fotovoltaico es técnicamente viable y económicamente competitiva bajo condiciones de diseño adecuadas y políticas de incentivo claras. Se recomienda fortalecer la capacitación técnica, promover esquemas de financiamiento y desarrollar pilotos demostrativos que validen la eficiencia operativa y económica del sistema en entornos reales.

Para una visión más completa de los hallazgos, se recomienda consultar el apartado “Análisis Detallado de Gráficas – D. Asociación entre Variables, donde se presentan los resultados específicos y su interpretación correspondiente.

Análisis Detallado de Gráficas

A. Estadística Descriptiva;

Las percepciones se agruparon en cuatro índices para facilitar el análisis:

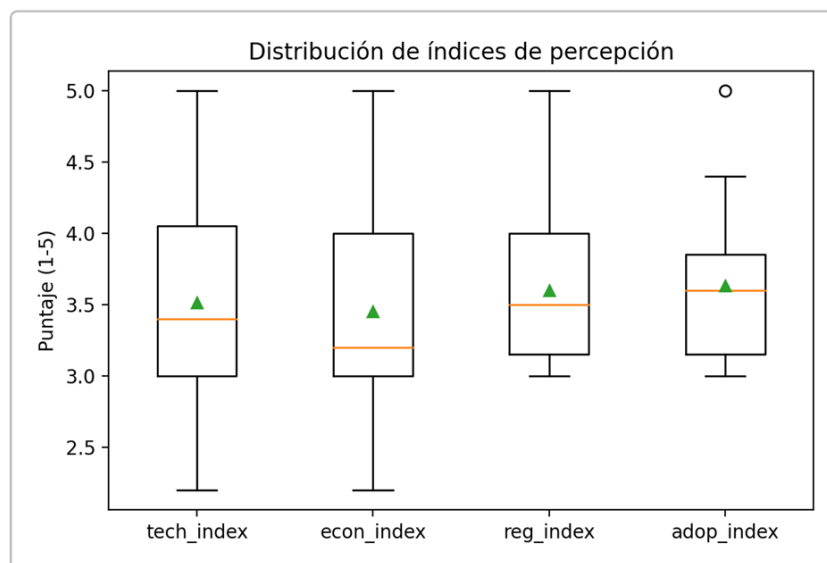
- Índice técnico (tech_index): Mide la confianza en la capacidad técnica del FV: abastecimiento, integración con equipos, gestión de variabilidad, mantenimiento y desempeño de bombeo.
- Índice económico (econ_index); Evalúa el retorno de inversión, reducción de OPEX, costos de respaldo, competitividad del LCOE e incentivos económicos.
- Índice regulatorio e institucional (reg_index): Contempla la percepción sobre el marco regulatorio, los trámites, los mecanismos contractuales, la compatibilidad con HSE y la disponibilidad de proveedores.
- Índice de adopción (adop_index): Refleja la disposición de la organización a evaluar, invertir y priorizar proyectos fotovoltaicos.

Cada respuesta Likert se codificó de 1 (totalmente en desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo) siguiendo la convención mostrada anteriormente. La siguiente tabla resume el número de respuestas válidas, la media, mediana, desviación estándar (DE), mínimo y máximo para los índices.

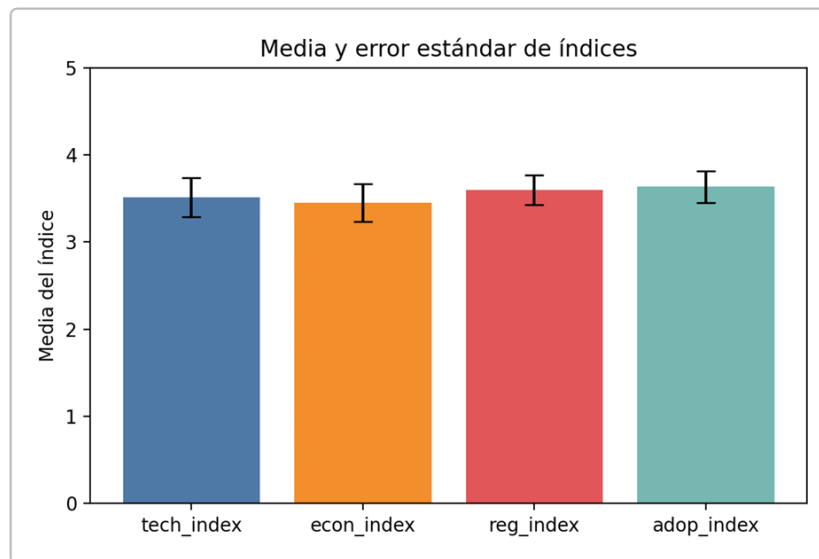
Índice	N	Media	Mediana	DE	Mín	Máx
Técnico	12	3,51	3,40	0,76	2,20	5,00
Económico	12	3,45	3,20	0,74	2,20	5,00
Regulatorio/institucional	12	3,60	3,50	0,58	3,00	5,00
Adopción	12	3,63	3,60	0,63	3,00	5,00

El índice regulatorio obtuvo el mayor valor promedio, indicando moderada percepción de apoyo institucional, mientras que el índice económico es el más bajo (3,45), evidenciando preocupación por la rentabilidad. Para visualizar la dispersión de los puntajes se elaboraron un diagrama de cajas y una gráfica de barras con error estándar de la media. El diagrama muestra que la mayoría de los valores se sitúan entre 3 y 4, aunque algunos encuestados reportaron valores extremos (2,2 o 5).

Grafica 1. Distribución de Índices de Percepción



Gráfica 2. Media y error estándar de Índices



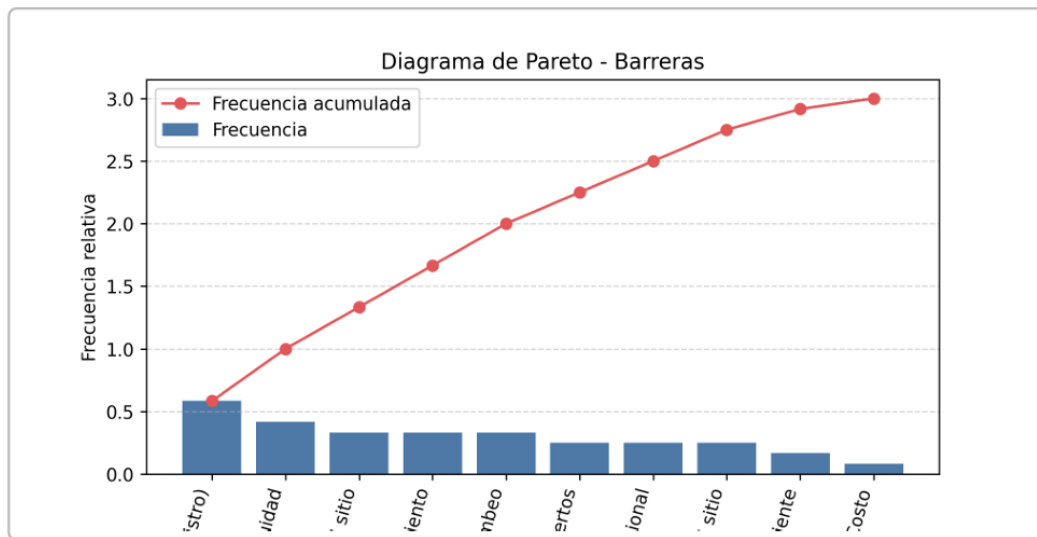
B. Barreras y Facilitadores

Las preguntas de barreras y facilitadores permitían seleccionar múltiples opciones. Se cuantificó el número de menciones de cada opción y se calculó su frecuencia relativa. Las cinco barreras más frecuentes fueron:

- Dudas técnicas (variabilidad solar, confiabilidad del FV) – 58 % de los encuestados.
- Necesidad de respaldo (baterías, diésel o red) – 42 %.
- Falta de espacio o sombras en el sitio – 33 %.
- Inversión inicial alta o dificultad de financiación – 33 %.
- Falta de datos confiables de consumo y curvas de bombeo – 33 %.

Las principales barreras son técnicas y financieras, y afectan la percepción económica global.

Gráfica 3. Barreras más Frecuentes

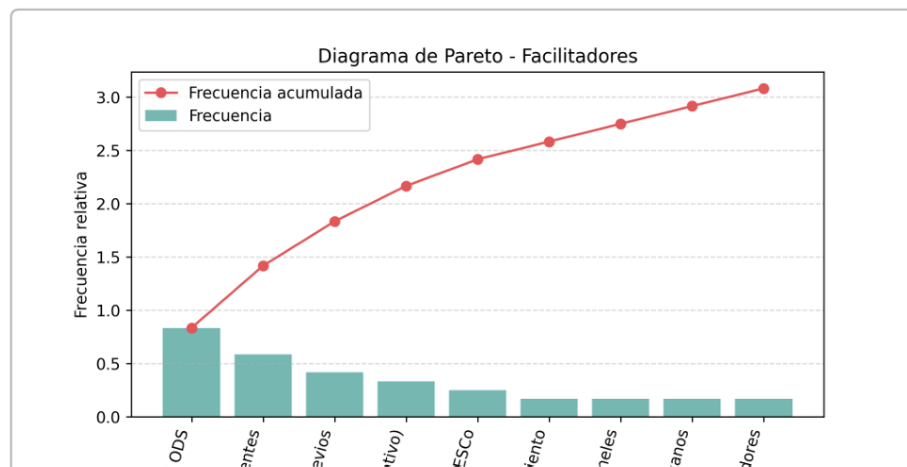


En cuanto a los facilitadores, las tres condiciones más citadas fueron:

- Metas corporativas de descarbonización/ODS – 83 % de los participantes consideran que una política corporativa de reducción de emisiones impulsa la adopción.
- Incentivos tributarios vigentes – 58 %, lo que muestra la importancia de las exenciones fiscales.
- Datos de consumo confiables y modelos de ingeniería – 42 %; se requiere información técnica para dimensionar los sistemas.

los factores institucionales y normativos son clave para la adopción.

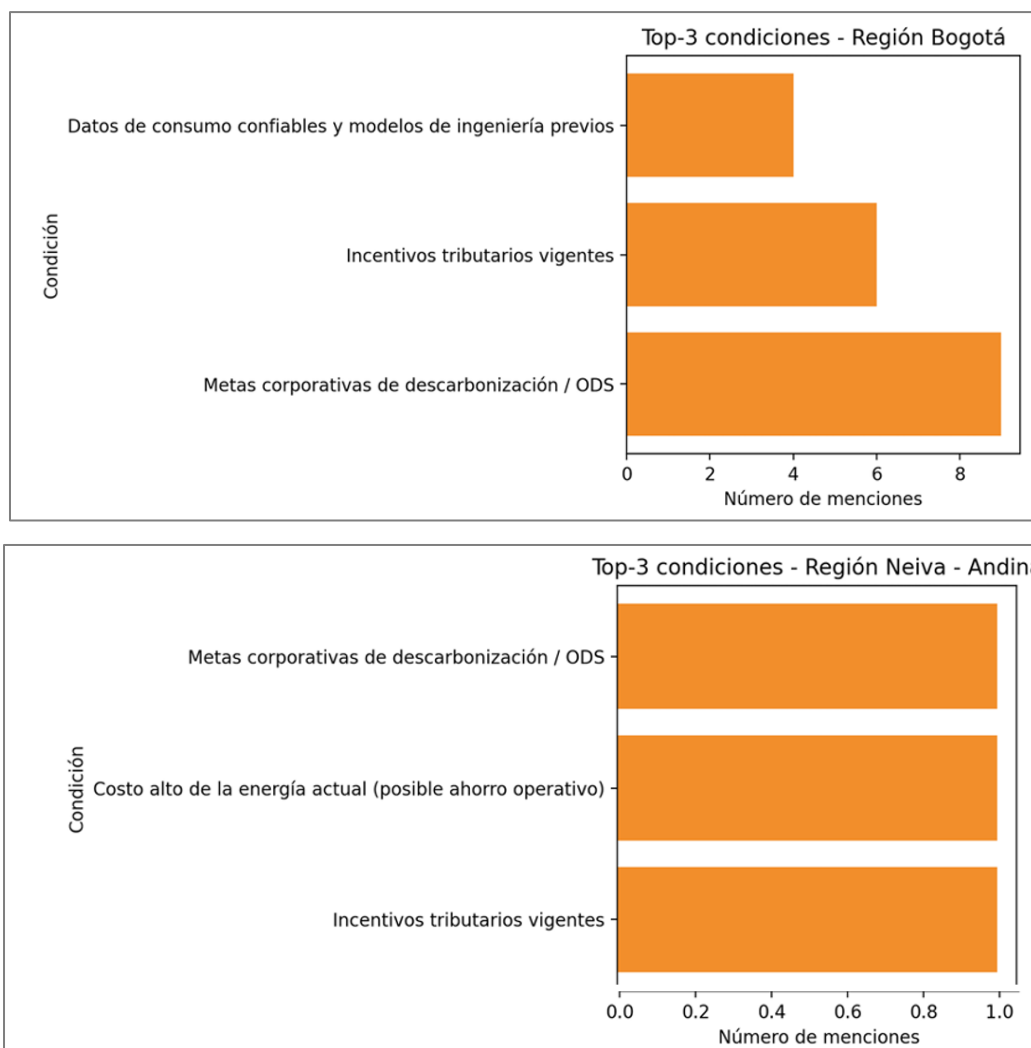
Gráfica 4. Facilitadores

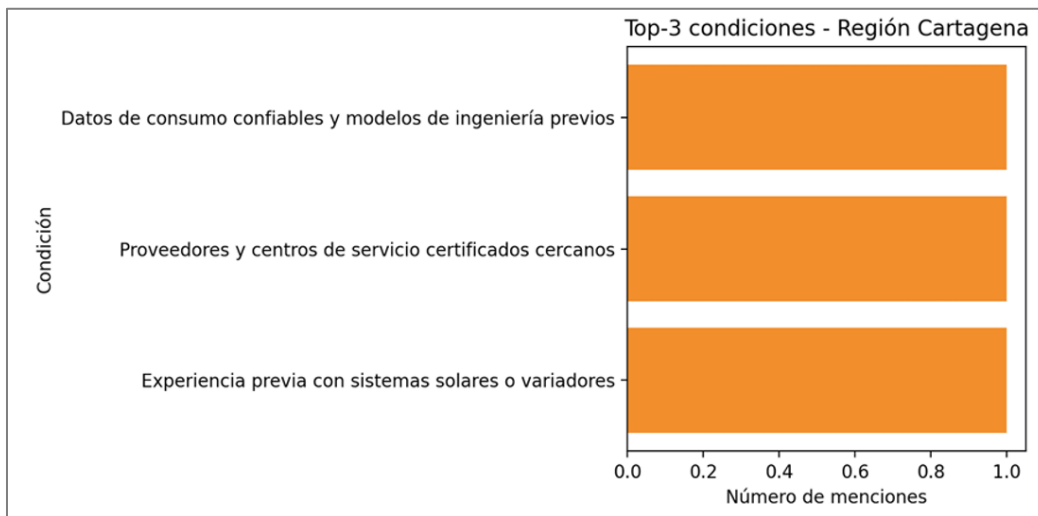


C. Priorización de Condiciones Críticas

Cuando se desagrega por región, se observa que las prioridades varían. Por ejemplo, en Cartagena y Neiva predominan los incentivos tributarios y la disponibilidad de techos/terrenos, mientras que en Bogotá las metas de descarbonización y los datos de consumo son las más relevantes. La siguiente figura presenta los tres facilitadores principales en cada región.

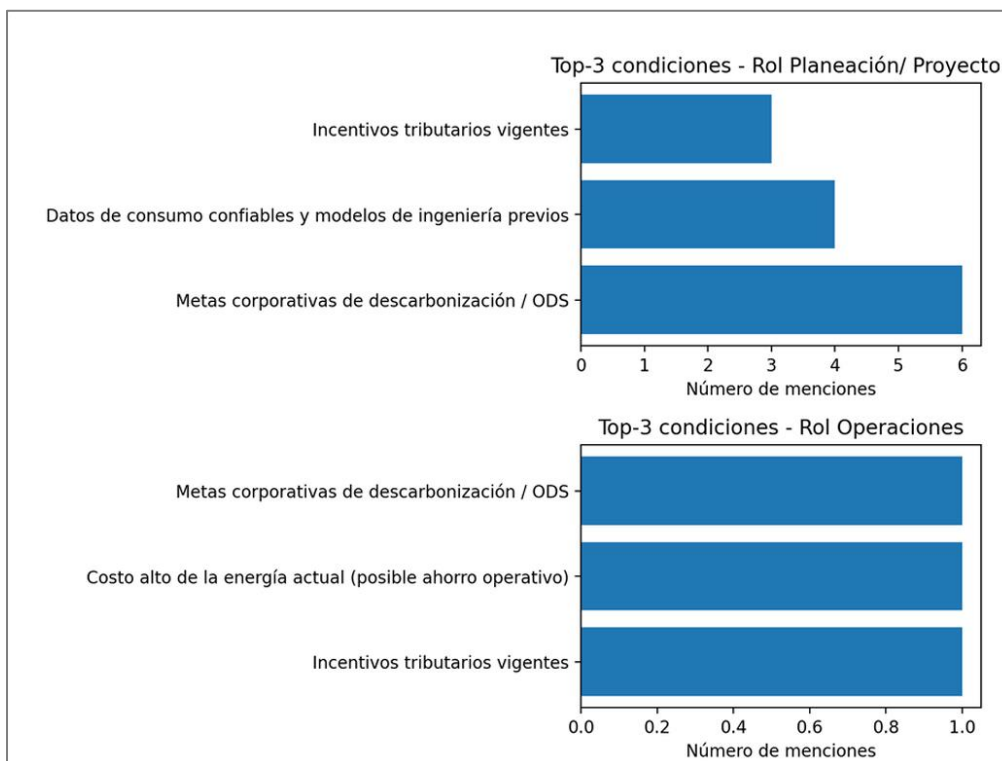
Gráfica 5. Segmentación por Región

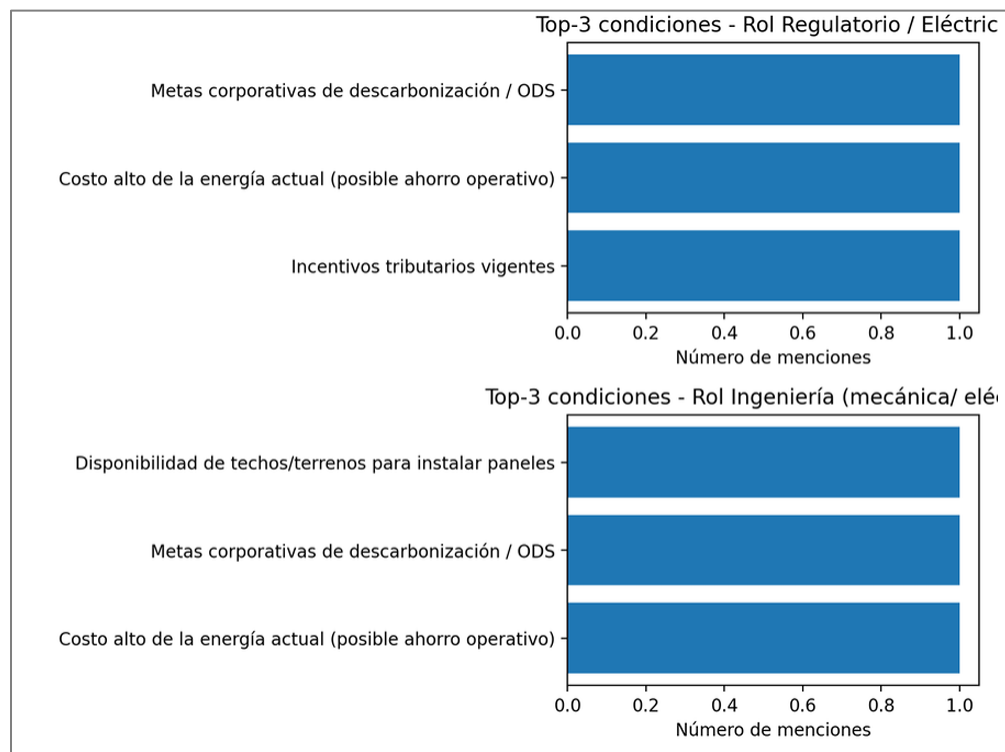
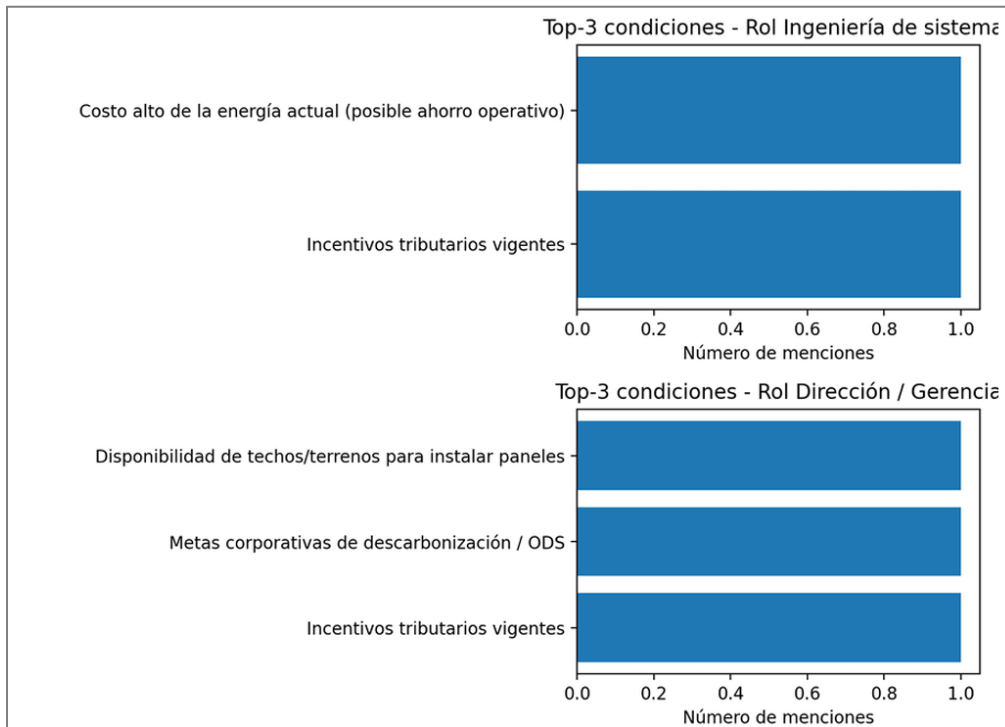




Al segmentar por rol, se evidencian diferencias sutiles. Los directores/gerentes mencionan incentivos tributarios y metas corporativas por igual, mientras que los ingenieros mecánicos/eléctricos destacan el alto costo de la energía actual y la disponibilidad de espacios. La figura siguiente ilustra los tres facilitadores más citados por cada rol.

Gráfica 6. Segmentación por Rol

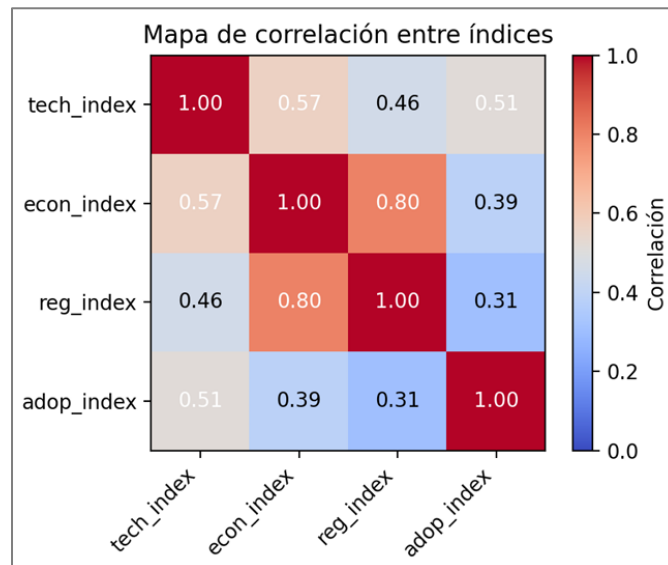




D. Asociación entre Variables

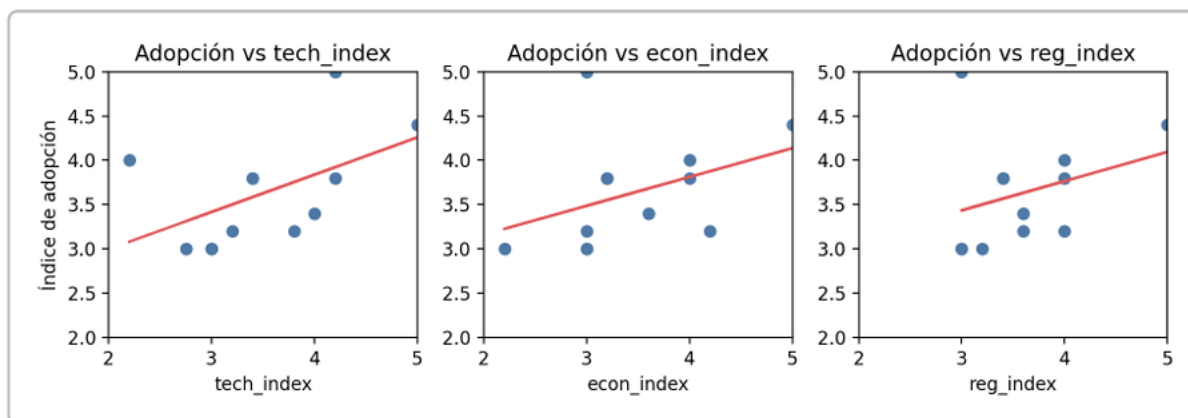
Se calcularon correlaciones de Pearson entre los índices. El índice económico correlaciona fuertemente con el índice regulatorio ($r \approx 0,80$), lo que indica que quienes perciben condiciones regulatorias favorables también tienden a ver viable económicamente la tecnología. El índice técnico muestra correlaciones moderadas con los demás ($r \approx 0,46-0,57$). El índice de adopción guarda correlaciones positivas con los otros tres, aunque de menor magnitud, lo que sugiere que la disposición a adoptar la tecnología depende de una combinación de factores técnicos, económicos y regulatorios.

Gráfica 7. Mapa de Correlación entre Variables



Para explorar la relación entre la intención de adopción y los otros índices, se elaboraron diagramas de dispersión con líneas de tendencia. Se observa un patrón ascendente: a mayor percepción técnica, económica o regulatoria, mayor es el índice de adopción, aunque la relación presenta dispersión debido al tamaño reducido de la muestra.

Gráfica 8. Adopción entre Variables.



Conclusiones

Los resultados del estudio permiten concluir que la adopción del bombeo fotovoltaico (FV) en el sector petrolero colombiano representa una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible, aunque enfrenta desafíos financieros y de gestión operativa. El análisis de percepciones de expertos evidenció una valoración favorable hacia la confiabilidad, mantenibilidad e integración de los sistemas FV en estaciones de bombeo, con un índice técnico medio de 3,51, lo que confirma la madurez tecnológica alcanzada por estas soluciones. Estos hallazgos se alinean con lo expuesto por Habib et al. (2023) e Iqbal y Hasan (2022), quienes demuestran que la eficiencia del bombeo solar depende de una adecuada gestión de la variabilidad y del diseño hidráulico.

Desde la perspectiva económica, persisten percepciones moderadas (media=3,45) que reflejan preocupación por los altos costos iniciales y la disponibilidad de financiamiento. Sin embargo, estudios previos (Khan et al., 2022; Rojas-Triviño & Pérez-Soto, 2023) han demostrado que los sistemas FV presentan costos nivelados de energía (LCOE) competitivos frente a tecnologías diésel, especialmente cuando se integran con esquemas de incentivos establecidos en las Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021. Esta relación entre marco regulatorio y viabilidad financiera fue corroborada por la alta correlación ($r \approx 0,80$) entre los índices económico y regulatorio, evidenciando que la estabilidad institucional impulsa la disposición empresarial a invertir en energías renovables.

En cuanto a la disposición de adopción, los participantes manifestaron interés en promover pilotos y evaluaciones técnicas, lo que indica un cambio cultural hacia la innovación energética. Este hallazgo refuerza la tesis de IRENA (2022) sobre la importancia de las políticas corporativas de sostenibilidad y la adopción de energías limpias como parte de la transición energética global. No obstante, se identificaron barreras técnicas como la variabilidad solar y la necesidad de respaldo, además de factores financieros y de acceso a información técnica. Superar estos desafíos requerirá fortalecer capacidades técnicas, mecanismos de financiamiento verde y cooperación público-privada.

En síntesis, el estudio aporta evidencia empírica y teórica sobre las condiciones para viabilizar la adopción del bombeo FV en el sector petrolero, contribuyendo a la literatura sobre sostenibilidad industrial y transición energética. Los resultados confirman que la integración de tecnologías solares puede optimizar los costos operativos, reducir las emisiones de GEI y mejorar la competitividad del sector, en consonancia con los planteamientos de Rojas-Triviño & Pérez-Soto (2023), Habib et al. (2023) y Khan et al. (2022). De este modo, la investigación constituye un insumo clave para la toma de decisiones empresariales y el diseño de políticas públicas orientadas hacia una matriz energética más limpia y resiliente.

Lista de referencias

- Ali, A. A., & Juma, R. S. (2021). Economic and environmental comparison of solar PV and diesel generator for powering oil pumping stations in Iraq. *Energy and Power Engineering*, 13(3), 115-125.
- Congreso de la República de Colombia. (2021). *Ley 2099 de 2021: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética*. Diario Oficial 51.587.
- Iqbal, K., & Hasan, M. (2022). Technical feasibility of solar photovoltaic powered submersible pump for oil production in remote areas. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 210, 109852.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Renewable power generation costs in 2021*. IRENA.
- Ministerio de Minas y Energía. (2025). *Catálogo tecnológico colombiano: Tecnologías de generación y almacenamiento de energía*. Ministerio de Minas y Energía.
- Rojas-Triviño, H., & Pérez-Soto, J. A. (2023). Análisis de viabilidad técnica y económica de un sistema de bombeo fotovoltaico para la industria de hidrocarburos en Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 25(1), e4010.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2016). *Plan de acción indicativo de eficiencia energética PAI-PROURE 2017–2022*. UPME.
- Bolt, O. (2024, 4 de abril). *Eficiencia energética de los paneles solares y degradación a lo largo del tiempo*. Energy Theory. <https://energytheory.com/es/Eficiencia-de-los-paneles-solares-a-lo-largo-del-tiempo/>
- Corporación EMA. (2012). *Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas utilizando recursos renovables: Informe final presentado a la CREG*. Corporación EMA.
- Grupo RDS. (2025, 10 de abril). Guía completa sobre el mantenimiento correctivo de sistemas fotovoltaicos. <https://www.grupords.es/mantenimiento-correctivo-instalaciones-fotovoltaicas/>
- Ahmed, N. M., Hassan, A. M., Kassem, M. A., Hegazi, A. M., & Elsaadawi, Y. F. (2023). Reliability and performance evaluation of a solar PV-powered underground water

pumping system. Scientific Reports, 13, 14174. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41272-5>

- Vilchez Ochoa, G. L. (2022). *Metodología para evaluar impactos ambientales en sistemas de riego y drenaje: Estudio de caso, sistema de riego y drenaje del Valle de Cañete (Lima, Perú)* [Ponencia]. VII Congreso Nacional de Riego, Drenaje y Biosistemas, Teziutlán, Puebla, 23–26 de noviembre de 2022.
- Novomet. (s. f.). *Permanent magnet ESP motors*. Recuperado de <https://www.novometgroup.com/products-services/artificial-lift/esp-motors/permanent-magnet-motor/index.html>
- Boada Pérez, P. J. (2023). *Evaluación técnico-económica de la implementación de equipos electro sumergibles con motor de imán permanente en pozos de Campo Rubiales* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].
- Lorentz. (2020). *Case study: Bombeo de petróleo usando bombas de baja energía y energía solar en los Estados Unidos (Texas Secondary Oil Corporation)*. Lorentz.
- Sunrise Energía. (s. f.). *Bombeo solar*. Recuperado de <https://sunrisenergia.com/bomba-solar-rural/>
- Ruhrpumpen. (s. f.). *Oil & gas pipelines*. Ruhrpumpen. Recuperado de <https://www.ruhrpumpen.com/en/markets/oil-and-gas/pipelines.html>
- Salinas Salinas, Y. (2013). *Análisis de oportunidades de eficiencia energética en la industria mediante la aplicación de nuevas tecnologías (Motores de alta eficiencia y sistemas de generación alternativa)*
- González Dávila, L. E., & Lanuza Centeno, Á. R. (2018). *Propuesta de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para riego por goteo en la finca Concepción comarca Ato Viejo, San Nicolás – Estelí (2017)* [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua].
- Peralta Vera, A. A. (2018). *Evaluación técnico-económica de una instalación de bombeo solar fotovoltaico aplicada a la ampliación de la frontera agrícola en zonas aisladas de Arequipa* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María].
- Fernández Fernández, A. (2022). *Diseño de sistema de bombeo con energía solar para reducir el costo energético en el cultivo de maíz en Batangrande, Lambayeque* [Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo].

- Mahecha Chimbi, R. E., Suárez Gil, S. C., Montes Páez, E. G., & Guerrero Martin, C. (2021). Estudio de la viabilidad técnica-financiera del uso de plantas solares fluctuantes en el suministro de energía eléctrica para una bomba electrosumergible en una plataforma flotante [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América].
- Gorostiza Soriano, A. A. (2025). Estudio técnico económico y ambiental para la implementación de un sistema de energía híbrida (solar–convencional) en la estación de bombeo de hidrocarburos La Libertad [Trabajo de titulación, Universidad Estatal Península de Santa Elena].
- Ortiz Motta, D. C., Sabogal Aguilar, J., & Hurtado Aguirre, E. (2012). Una revisión a la reglamentación e incentivos de las energías renovables en Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas*, 20(2), 55–67.
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Diagnóstico base para la Transición Energética Justa*. Gobierno de Colombia. <https://minenergia.gov.co>
- Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*. Diario Oficial No. 49.150. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- Ibrik, I. H. (2020). Techno-economic feasibility of energy supply of water pumping in Palestine by photovoltaic-systems, diesel generators and electric grid. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(3), 69–75. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8816>
- Khan, S. U.-D., Wazeer, I., Almutairi, Z., & Alanazi, M. (2022). Techno-economic analysis of solar photovoltaic powered electrical energy storage (EES) system. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 6739–6753. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.025>
- Habib, S., Liu, H., Tamoor, M., Zaka, M. A., Jia, Y., Hussien, A. G., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2023). Technical modelling of solar photovoltaic water pumping system and evaluation of system performance and their socio-economic impact. *Heliyon*, 9(5), e16105. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16105>
- Estudio Legal Hernández. (2024, abril). Incentivos tributarios energías renovables Colombia 2024 [PDF]. Estudio Legal Hernández.

<https://estudiollegalhernandez.com/wp-content/uploads/2024/04/INCENTIVOS-TRIBUTARIOS-ENERGI%CC%81AS-RENOVABLES-COLOMBIA-2024.pdf>

- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2016). Plan de acción indicativo de eficiencia energética PAI-PROURE 2017-2022 [PDF]. UPME. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Ministerio de Minas y Energía de Colombia, & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2005). Atlas de Radiación Solar de Colombia [PDF]. UPME. https://rds.org.co/apc-aa-files/205ec78c9cca6d1850bdca24e20e50bf/1-atlas_radiacion_solar.pdf
- Celsia. (s.f.). Granjas solares. Celsia. <https://www.celsia.com/es/granjas-solares/>
- Moncada Delgado, D. A. (2015). Caracterización y guía de estudio de los sistemas de bombeo mecánico y electro sumergible para pozos de crudo pesado (Trabajo de grado de especialización). Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/22e8f8aa-3f77-4694-b7a7-458d3883fb76/content>
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2016). Plan de acción indicativo PROURE 2017-2022 [Resolución adoptada]. Ministerio de Minas y Energía. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf
- Ini, L. (2024, junio 25). En Colombia entran en operación comercial las plantas solares La Loma y Fundación, que suman 240 MWac. PV magazine Latin America. <https://www.pv-magazine-latam.com/2024/06/25/en-colombia-entran-en-operacion-comercial-las-plantas-solares-la-loma-y-fundacion-que-suman-240-mwac/>
- Campetrol. (s. f.). Informes Campetrol. Campetrol. <https://campetrol.org/informes-campetrol/>
- Ministerio de Minas y Energía (2025). Catálogo Tecnológico Colombiano: Tecnologías de generación y almacenamiento de energía [PDF]. Ministerio de Minas y Energía. <https://minenergia.gov.co/documents/13276/Catalogo-Tecnologico-Colombiano-tecnologias-generacion-almacenamiento-energia-ES.pdf>
- Bancolombia. (2025, 15 de julio). Reportes del sector energía y petróleo en Colombia en 2025: Cuando el sol no basta: el desafío de la firmeza energética. Capital

Inteligente.

<https://www.bancolombia.com/empresas/capital-inteligente/especiales/informes-sectoriales/sector-energia>

- Moncada Delgado, D. A. (2015). Caracterización y guía de estudio de los sistemas de bombeo mecánico y electrosumergible para pozos de crudo pesado (Trabajo de grado de especialización). Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/22e8f8aa-3f77-4694-b7a7-458d3883fb76/content>
- San Juan, P. (2020, 3 de marzo). De motores eléctricos y energía solar. Suria Energy. <https://www.suriaenergy.com/de-motores-electricos-y-energia-solar>
- Bancolombia. (2025, julio). Informe sectorial energía – julio 2025: Cuando el sol no basta: el desafío de la firmeza energética [Informe sectorial]. Dirección de Investigaciones Económicas, Sectoriales y de Mercado, Grupo Bancolombia. <https://www.bancolombia.com/wcm/connect/www.bancolombia.com-26918/dfb76f5c-fc6b-4f21-9e20-fcc0eabd83e3/Informe+Sectorial+Energ%25C3%25ADa++Julio+2025.pdf?MOD=AJPERES>
- Universidad de la Costa.(2023, julio). Estudio de Viabilidad Técnica y Económica de un Sistema Híbrido Eólico Solar para la Extracción de Hidrocarburos en Colombia. <https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/4a2db109-2741-4c82-b75c-0518e47e9d2f/content>
- Alata-Rey, J. E., Zingg-Rosell, A. F., Orellana-Pardave, J. A., & Altamirano-Chunga, L. A. (2023). La energía solar fotovoltaica en los sistemas de bombeo para acueductos: una revisión sistemática. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 6(12). <https://doi.org/10.46296/ig.v6i12.0115>
- Mercado Correa, G. A., & Henao Quintero, D. (2014). *Sistemas de bombeo de agua con energías alternativas* [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana].
- Castro López, N. D., & Castiblanco Orjuela, L. K. (2020). *Sistema de extracción de agua por bombeo con fuente de energía solar fotovoltaica* [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio institucional.