

# Escenarios energéticos hipotéticos e improbables para la producción de electricidad en Colombia

Un contexto de todas las fuentes de energía en la transición energética



Amat David Zuluaga Guerra  
Eusebio Orozco Cera  
Marlon Bastidas Barranco  
Arián Sarmiento Orjuela  
Daniela Polo Padilla  
Stefany Rodríguez Redondo  
Gilbert Albino Serpa  
Dubán Jaramillo Contreras  
Dixon Sierra Beltrán  
José Salazar Hernández  
Raúl Ospino Carbonell  
Brandon Álvarez Yépez  
Camilo Daza Torres

# **Escenarios energéticos hipotéticos e improbables para la producción de electricidad en Colombia**

**Un contexto de todas las fuentes de  
energía en la transición energética**



# **Escenarios energéticos hipotéticos e improbables para la producción de electricidad en Colombia**

**Un contexto de todas las fuentes de  
energía en la transición energética**

**Amat Zuluaga Guerra**

**Eusebio Orozco Cera**

**Marlon Bastidas Barranco**

**Arián Sarmiento Orjuela**

**Daniela Polo Padilla**

**Stefany Rodríguez Redondo**

**Gilbert Albino Serpa**

**Dubán Jaramillo Contreras**

**Dixon Sierra Beltrán**

**José Salazar Hernández**

**Raúl Ospino Carbonell**

**Brandon Álvarez Yépez**

**Camilo Daza Torres**

**AREANDINA**

Fundación Universitaria del Área Andina

Zuluaga Guerra, Amat

Escenarios energéticos hipotéticos e improbables para la producción de electricidad en Colombia: un contexto de todas las fuentes de energía en la transición energética / autores Amat Zuluaga Guerra, Eusebio Orozco Cera, Marlon Bastidas Barranco (y otros diez autores) -- Bogotá: Fundación Universitaria del Área Andina, 2023

ISBN (Digital) 978-958-5139-83-1

ISBN (Impreso) 978-958-5139-82-4

Incluye índice.

1. Industrias – Abastecimiento de energía. – 2. Industrias de energía. – 3. Recursos energéticos – Investigaciones.

Catalogación en la fuente Biblioteca Fundación Universitaria del Área Andina (Bogotá)  
621.47 scdd22

## **Escenarios energéticos hipotéticos e improbables para la producción de electricidad en Colombia. Un contexto de todas las fuentes de energía en la transición energética**

© Fundación Universitaria del Área Andina. Bogotá, octubre de 2023

© Amat Zuluaga Guerra, Eusebio Orozco Cera, Marlon Bastidas Barranco, Arián Sarmiento Orjuela, Daniela Polo Padilla, Stefany Rodríguez Redondo, Gilbert Albino Serpa, Dubán Jaramillo Contreras, Dixon Sierra Beltrán, José Salazar Hernández, Raúl Ospino Carbonell, Brandon Álvarez Yépez, Camilo Daza Torres

ISBN (impreso): 978-958-5139-82-4

ISBN (digital): 978-958-5139-83-1

### **Fundación Universitaria del Área Andina**

Calle 71 No. 13-21, Bogotá, Colombia

Correo electrónico: publicaciones@areandina.edu.co

### **Proceso editorial**

**Dirección editorial:** Omar Eduardo Peña Reina

**Coordinación editorial:** Camilo Andrés Cuéllar Mejía

**Corrección de estilo, diseño gráfico editorial, armada electrónica e impresión:** Proceditor Ltda.

*Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra y su tratamiento o transmisión por cualquier medio o método sin autorización escrita de la Fundación Universitaria del Área Andina y sus autores.*

## **BANDERA INSTITUCIONAL**

Pablo Oliveros Marmolejo †  
Gustavo Eastman Vélez  
**Miembros Fundadores**

Carlos Patricio Eastman Barona  
**Presidente de la Asamblea General y Consejo Superior**

José Leonardo Valencia Molano  
**Rector Nacional y Representante Legal**

Martha Patricia Castellanos Saavedra  
**Vicerrectora Nacional Académica**

Karol Milena Pérez Calderón  
**Vicerrectora Nacional de Crecimiento y Desarrollo**

Erika Milena Ramírez Sánchez  
**Vicerrectora Nacional Administrativa y Financiera**

Mauricio Andrés Hernández Anzola  
**Vicerrector Nacional de Experiencia y Felicidad**

Felipe Baena Botero  
**Rector - Seccional Pereira**

Gelca Patricia Gutiérrez Barranco  
**Rectora - Sede Valledupar**

María Angélica Pacheco Chica  
**Secretaria General**

Omar Eduardo Peña Reina  
**Director Nacional de Investigaciones**

Carmen Victoria Meza Carrillo  
**Decana Facultad de Ingenierías y Ciencias Básicas**

Ober Adiel Romero Arias  
**Director programa de Ingeniería Geológica**

Camilo Andrés Cuéllar Mejía  
**Subdirector Nacional de Publicaciones**



## **Autores**

### **Amat Zuluaga Guerra**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

### **Eusebio Orozco Cera**

Consultor en Economía Energética-Estrategia. Contrato especial de trabajo para la docencia de la Facultad de Ingeniería, adscrito a la Vicerrectoría de Innovación Académica (Ingeniería Química), Universidad EAN.

### **Marlon Bastidas Barranco**

Grupo de Investigación DESTACAR, Programa de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira.

### **Arián Sarmiento Orjuela**

Grupo de Investigación Geotecnologías Energéticas, Semillero Recursos Energéticos, Departamento de Energías, Universidad de América.

### **Daniela Polo Padilla**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

### **Stefany Rodríguez Redondo**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

### **Gilbert Albino Serpa**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

### **Dubán Jaramillo Contreras**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

### **Dixon Sierra Beltrán**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

### **José Salazar Hernández**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

### **Raúl Ospino Carbonell**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

### **Brandon Álvarez Yépez**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

### **Camilo Daza Torres**

Grupo de Investigación GIINGEO, Programa de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar.

## **Agradecimientos**

A la Fundación Universitaria del Área Andina, sede Valledupar. A todo el equipo de trabajo de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, en especial al programa de Ingeniería Geológica y a la Dirección Nacional de Investigaciones por el apoyo y financiación de este libro. A los futuros ingenieros Juan José Chamat, Arnobis Badillo, Leisli Albarracín, Jhon Carlos Díaz, Carlos Mario García, Ibis Torres y Iam Daniel Vega, por todo el apoyo, el tiempo y la información valiosa que lograron recopilar. A Leonardo Redondo, de la Universidad de La Guajira, por toda su predisposición y apoyo en el capítulo sobre la biomasa.



# Tabla de contenidos

Introducción .....	15
<b>Energía solar fotovoltaica .....</b>	<b>17</b>
Generalidades de la energía solar fotovoltaica .....	20
Capacidad de generación de energía solar fotovoltaica.....	23
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía solar fotovoltaica .....	23
<b>Energía eólica.....</b>	<b>27</b>
Generalidades de la energía eólica .....	30
Capacidad de generación de la energía eólica .....	31
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía eólica .....	33
<b>Energía hidráulica .....</b>	<b>35</b>
Generalidades de la energía hidráulica .....	38
Capacidad de generación de energía hidráulica .....	40
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía hidráulica.....	42
<b>Energía geotérmica .....</b>	<b>45</b>
Generalidades de la energía geotérmica.....	48
Capacidad de generación de la energía geotérmica.....	50
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía geotérmica .....	51
<b>Energía a base de hidrógeno .....</b>	<b>53</b>
Generalidades del hidrógeno .....	55
Capacidad de generación de energía a partir del hidrógeno .....	60
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de hidrógeno.....	61

<b>Energía a base de gas natural .....</b>	<b>63</b>
Generalidades del gas natural .....	66
Capacidad de generación de energía a base de gas natural .....	68
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía a base de gas natural .....	68
<b>Energía a base de hidratos de gas .....</b>	<b>71</b>
Generalidades del gas a partir de hidratos .....	73
Capacidad de generación de energía del gas a partir de hidratos.....	75
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía del gas a partir de hidratos.....	76
<b>Energía mareomotriz .....</b>	<b>77</b>
Generalidades de la energía mareomotriz.....	80
Capacidad de generación de energía mareomotriz .....	82
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía mareomotriz.....	82
<b>Energía undimotriz.....</b>	<b>87</b>
Generalidades de la energía undimotriz.....	90
Capacidad de generación de energía undimotriz.....	92
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía undimotriz.....	94
<b>Energía a base de carbón .....</b>	<b>95</b>
Generalidades del carbón .....	98
Capacidad de generación de energía a partir del carbón .....	100
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % del carbón.....	100

<b>Energía a base de biomasa .....</b>	<b>103</b>
Generalidades de la biomasa .....	105
Capacidad de generación de energía a partir de la biomasa.....	108
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de biomasa.....	109
<b>Energía a partir de biogás.....</b>	<b>111</b>
Generalidades de la energía producida a partir del biogás.....	113
Capacidad de generación de energía a partir del biogás .....	115
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía a partir de biogás.....	117
<b>Energía a partir de biodiésel .....</b>	<b>119</b>
Generalidades de la energía basada en el biodiésel .....	121
Capacidad de generación de energía a partir de biodiésel .....	124
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía a partir de biodiésel .....	125
<b>Energía a partir de fisión nuclear .....</b>	<b>127</b>
Generalidades de la energía de fisión nuclear .....	130
Capacidad de generación de la energía de fisión nuclear.....	131
Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía nuclear .....	133
Potencial nuclear de Colombia.....	133
<b>Consideraciones finales .....</b>	<b>135</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>138</b>

# Índice de Tablas

Tabla 1. Cantidad de paneles necesarios del tipo Deep Blue 3.0 550 W para producir la energía eléctrica que demanda el país diariamente .....	25
Tabla 2. Capacidad de una turbina eólica WT10000dd/190 SeaTitan .....	32
Tabla 3. Capacidad de generación de energía eléctrica por m <sup>3</sup> de agua .....	41
Tabla 4. Datos de la central hidroeléctrica de Ituango para reemplazar en la ecuación .....	42
Tabla 5. Comparación de la demanda de energía eléctrica anual del país con la cantidad de energía eléctrica generada por la central de Ituango .....	43
Tabla 6. Comparación de la demanda de energía eléctrica anual con la cantidad de energía eléctrica generada por la central de Ituango en 2021 .....	44
Tabla 7. Capacidad de generación de energía geotérmica .....	51
Tabla 8. Resumen ventajas y desventajas de las tecnologías del hidrógeno .....	57
Tabla 9. Capacidad de generación de electricidad a partir del gas natural .....	69
Tabla 10. Capacidad de generación de electricidad por estado de turbina .....	83
Tabla 11. Demanda eléctrica del país .....	84
Tabla 12. Variación de las mareas .....	84
Tabla 13. Espacio requerido para una planta de energía mareomotriz ubicada en la bahía de Tumaco .....	85
Tabla 14. Datos de referencia para suplir la demanda energética eléctrica del país .....	94
Tabla 15. Consumo de carbón para abastecer la demanda eléctrica total del país según tipo de carbón .....	101
Tabla 16. Poder calorífico de diferentes tipos de biomasa según la tecnología de transformación energética .....	109
Tabla 17. Producción de energía a partir de biomasa para sustitución hipotética de la energía eléctrica del país con base en diferentes tecnologías .....	110
Tabla 18. Volumen de biogás necesario para suplir la demanda eléctrica nacional .....	117

## Introducción

La generación de energía es el pilar del desarrollo de la humanidad y del avanzar de la vida moderna. Un mundo incapaz de generar energía suficiente para abastecer la demanda nos conduce a la disminución de la capacidad industrial y tecnológica, y esto a su vez deriva en la deficiencia de todo aquello necesario para el transcurrir de la vida moderna. Por ejemplo, la producción de alimentos depende de un sector industrial robusto (mediante cultivos orgánicos no podríamos abastecer la demanda mundial); no podríamos potabilizar el agua ni tratar las aguas residuales a las tasas que nos exige la demanda, pues estos son procesos industriales; no podríamos desarrollar medicamentos o vacunas o complejos procedimientos médicos (todos dependen de tecnología de punta); no tendríamos facilidad en las comunicaciones (esto en su esencia ya atrasa toda la vida humana y sus procesos, y afecta absolutamente todo); dificultaría la globalización en la educación; frenaría el transporte; el mercado mundial; y un sinnúmero más de actividades diarias.

Colombia es un país con muy poco desarrollo industrial, no es muy diverso productivamente, por lo que depende en grandes proporciones de pocos renglones económicos. Su producción y consumo de energía son relativamente pequeños si los comparamos con países desarrollados teniendo en cuenta la población total. Colombia se abastece de energía principalmente por combustibles fósiles en un 74 %, cerca de un 14 % con leña y biomasa y cerca de un 12 % es renovable (hidráulica, principalmente, aunque con una muy pequeña participación de solar y eólica). El sector eléctrico del país es solo una proporción de esa energía consumida; por ejemplo, este sector corresponde al casi 17 % del total de energía del país, pero, como ya mencionamos, el 12 % corresponde a energía hidráulica, solar y eólica y un 5 % a carbón y gas. Estos datos a veces pueden sonar confusos, pues siempre escuchamos que la energía del país es 70 % proveniente de fuentes renovables y solo el 30 % de combustibles fósiles; pues bien, ese cálculo solo aplica para ese 17 % de la energía eléctrica, pues realmente se está refiriendo al 70 % pero del 17 % de toda la energía del país; así mismo, el 30 % de ese 17 % lo que correspondería al 12 % y 5 % de hidráulica y gas-carbón, respectivamente, que ya mencionamos en el consumo total.

Hoy la transición energética en Colombia ha iniciado con el sector eléctrico nacional (el 17 % de la demanda energética nacional). La entrada en funcionamiento de los nuevos proyectos eólicos y solares del país aumentaría la producción de este sector, además porque también aumentaría el consumo eléctrico. Sin embargo, la transición energética no se restringe al sol y al viento, sino que existen varios energéticos con la capacidad potencial de aportar significativamente a la matriz energética nacional. Por esta razón, cada energético debe ser evaluado desde su capacidad de generación, su confiabilidad, su sostenibilidad ambiental y sus costos.

Este libro está enfocado en dimensionar la capacidad de generación de diferentes energéticos que podrían utilizarse en el país, sean convencionales o no convencionales. Se analizó desde un escenario hipotético donde cada energético supliera (por sí solo) la necesidad energética eléctrica del país del año 2022 (el 17 % de la demanda energética total). Aunque es un escenario improbable, nos permite pensar de manera industrial cada energético y poder dimensionar la realidad de estos sistemas. Últimamente aparecen nuevas fuentes de energía que, solo por su capacidad de generar, las acogemos como una luz esperanzadora de solución a todos nuestros problemas energéticos, y no revisamos su capacidad de producir energía en masa. Eso le da sentido a la necesidad de libros como el que presentamos a continuación.

Por otra parte, la transición energética de Colombia se debe redefinir con el fin de enfocar todos aquellos sectores que conforman la matriz nacional, es decir, debemos pensar cómo vamos a electrificar el sector industria que consume cerca de un 28 % de la energía del país y está basado principalmente en petróleo, gas y carbón; cómo vamos a electrificar el transporte que consume el 44 % de la energía del país y se basa en petróleo y gas; y, finalmente, cómo vamos a electrificar el sector rural, del cual su principal energético es la leña (un energético poco eficiente y que tiene reconocidas problemáticas), que consume en términos energéticos por lo menos tres cuartos de lo que consume todo el sector eléctrico nacional por la deficiencia de la leña. Todos estos sectores en el país son aún más críticos que el sector eléctrico, puesto que todos tienen total dependencia de los combustibles fósiles o la leña, mientras que el sector eléctrico depende solo en un 30 %.





Los sistemas fotovoltaicos permiten la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar. Esta tecnología se basa en la transformación directa de la energía calórica del sol en electricidad mediante el uso de paneles. Estos están compuestos por células solares que convierten la luz del sol en electricidad mediante lo que conocemos como el efecto fotovoltaico (Salgado, 2014). Estas células captan los fotones de la luz solar y los convierten en corriente eléctrica que se puede utilizar para alimentar hogares y empresas (DW, 2012; Iberdrola, 2023).

La UN (2023) menciona que la energía solar constituye la fuente de energía de mayor crecimiento en el mundo. Los gobiernos apuestan a esta energía debido a su capacidad para producir electricidad limpia y renovable, sin emisiones directas de gases de efecto invernadero ni contaminación. Además, la reducción de los costos de la tecnología fotovoltaica ha permitido aumentar su viabilidad económica en comparación con otras fuentes de energía.

La energía fotovoltaica puede utilizarse para suministrar energía a pequeñas aplicaciones, como luces de jardín o dispositivos electrónicos portátiles, o puede ser integrada en grandes sistemas de generación de energía eléctrica para suministrar energía a hogares, empresas e incluso a la red eléctrica nacional. Los paneles solares fotovoltaicos son una tecnología clave para la transformación económica baja en carbono y para la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible a nivel global. La tecnología de energía solar está en constante evolución, lo que significa que la eficiencia de los paneles solares continúa mejorando, lo que hace que sea cada vez más económico para los hogares y las empresas utilizar energía solar (ENEL, 2020).

## Generalidades de la energía solar fotovoltaica

Para fabricar un panel solar fotovoltaico se requiere de tecnología avanzada y precisión en cada etapa del proceso. Como lo dio a conocer Alvarado (2017), se necesitan varias partes para la correcta fabricación de los paneles solares, entre ellas: la fabricación de las células solares generalmente construidas con sílice, el ensamblaje de las células solares para formar un módulo fotovoltaico en paralelo y poder generar voltaje y corriente adecuada, protección del panel solar añadiendo una capa de vidrio templado a la parte superior del panel para proteger las células de los agentes externos, como el agua, el polvo y los impactos mecánicos; por último, los paneles solares se someten a un riguroso proceso de control de calidad para garantizar su eficiencia y durabilidad. Sin embargo, la fabricación de estos paneles es intensiva en el consumo de minerales, lo que requiere unas proyecciones de aumento de consumo minero en el corto, mediano y largo plazo.

La fabricación de paneles solares es un proceso complejo y altamente especializado que requiere de tecnología avanzada y precisión en cada etapa del proceso. Sin embargo, el uso de paneles para producir electricidad limpia y renovable es cada vez más asequible y sostenible (La República, 2022). Gracias a su capacidad de generación de electricidad con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, los paneles solares son una herramienta clave para la reducción de las emisiones globales y la lucha contra el cambio climático (CELSIA, 2019). Aunque la energía solar no genera emisiones una vez estén instalados en su fase de producción de energía (no es una emisión directa), sí lo hace en su proceso de extracción de materia prima, refinación de esta misma, transformación de los productos, fabricación del panel, transporte y comercialización.

Dunlop (2012) menciona que la cantidad de energía que puede producir un panel solar depende de varios factores, como la intensidad de la luz solar, la temperatura ambiente y la calidad de los paneles solares. Explica que la intensidad de la luz solar es uno de los factores más importantes que inciden en la producción de energía en un panel solar. Los paneles solares producen más energía cuando están expuestos a la luz solar directa, y menos energía cuando están sombreados o ex-

puestos a la luz solar difusa. Además, la temperatura ambiente también puede afectar la producción de energía de los paneles solares, ya que estos pierden eficiencia a medida que la temperatura aumenta.

La ubicación geográfica determina la cantidad de energía que puede producir un panel solar. Por ejemplo, Pérez (2018) afirma que un panel solar ubicado en un lugar con alta radiación solar, como el desierto, producirá más energía que uno ubicado en un lugar con baja radiación solar, como una zona nublada. Además, la orientación y la inclinación del panel también son importantes, ya que un panel solar orientado hacia el sur y con una inclinación adecuada maximizará la cantidad de energía que puede producir. En cuanto a la eficiencia del panel, se refiere a la cantidad de energía solar que puede convertirse en electricidad. La eficiencia de los paneles solares ha mejorado significativamente en las últimas décadas, lo que significa que los modernos pueden producir más energía con menos superficie.

Según SunPower (2019), los paneles solares de alta calidad pueden producir entre 280 y 350 vatios de energía por hora en condiciones ideales. Esto significa que un solo panel solar puede producir entre 1.4 y 1.75 kilovatios de energía en un día, dependiendo de las condiciones climáticas.

Los sistemas solares tienen ventajas en algunos aspectos, pero también desventajas en otros. Fthenakis *et al.* (2011) destacan entre sus ventajas la sostenibilidad en el tiempo y la no emisión de gases de efecto invernadero de manera directa, mientras Hernández-López *et al.* (2022) ven con preocupación los desechos de paneles solares una vez termine su ciclo de vida. La energía fotovoltaica no requiere combustibles fósiles para producir electricidad y no emite gases tóxicos directamente. Además, tiene un bajo costo de mantenimiento, ya que los paneles solares no tienen partes móviles que se desgasten o necesiten reemplazo regular (Odeh *et al.*, 2018). También es importante destacar que la energía solar fotovoltaica se puede instalar en áreas remotas donde no hay acceso a la red eléctrica, lo que mejora significativamente la calidad de vida de las personas que viven en esas áreas (Khatib *et al.*, 2016). No obstante, una de las principales desventajas es que la fabricación de paneles solares genera emisiones de contaminantes atmosféricos en su proceso de fabricación. Además, algunos

tipos de paneles pueden contener materiales tóxicos como el plomo y el cadmio (Schubert *et al.*, 2015), lo que puede tener impactos ambientales negativos si no se manejan adecuadamente al final de su vida útil; adicionalmente, en la actualidad no son del todo reciclables y generan gran cantidad de residuos al final de su vida útil. Su proceso de instalación requiere una inversión muy alta en su inicio en comparación con otras fuentes de energía, como los combustibles fósiles o la energía hidroeléctrica (Worrell *et al.*, 2000). También tienen una vida útil limitada y eventualmente necesitarán ser reemplazados. Además, su funcionamiento es intermitente y depende de las condiciones climáticas; esto significa que la producción de energía puede variar significativamente a lo largo del día, lo que significaría un desafío para integrar en la red eléctrica (Lund *et al.*, 2015).

Producir paneles solares requiere de una variedad de materiales, algunos de los cuales pueden ser costosos y/o escasos. El silicio es el material más utilizado para fabricar paneles solares. Según Blakers *et al.* (2020), el silicio policristalino es el material más comúnmente utilizado en la fabricación de paneles solares debido a su alta eficiencia y bajo costo. Sin embargo, la producción de silicio requiere de grandes cantidades de energía y tiene un impacto ambiental significativo. Además, como señalan Sant *et al.* (2021), la producción de silicio policristalino puede generar desechos tóxicos, como el ácido fluorhídrico, que deben ser manejados cuidadosamente para minimizar su impacto ambiental.

Además del silicio, algunos metales también son utilizados en la fabricación de paneles solares, especialmente para los contactos eléctricos y los marcos de los paneles. Según Yang *et al.* (2020), los metales más comúnmente utilizados son el aluminio y el cobre. La extracción y la producción de estos metales también tienen un impacto ambiental significativo, ya que requieren grandes cantidades de energía y emiten gases de efecto invernadero.

Finalmente, en la fabricación de paneles solares también se utilizan materiales compuestos. Como mencionan Zhang *et al.* (2020), los materiales compuestos más utilizados son los polímeros y las cerámicas. Estos materiales se utilizan para la fabricación de los encapsulantes, las capas antirreflejo y los sustratos de los paneles solares. La producción

de estos materiales compuestos también tiene un impacto ambiental significativo, ya que requiere de grandes cantidades de energía y puede generar desechos tóxicos.

## Capacidad de generación de energía solar fotovoltaica

Es importante tener en cuenta que las estimaciones en la capacidad de generación son aproximadas y que la producción real de energía de los paneles solares puede variar considerablemente dependiendo de la ubicación geográfica, la radiación solar disponible, la eficiencia del panel, las condiciones ambientales y la configuración específica del sistema solar. Además, las dimensiones de los paneles solares también pueden variar; los paneles comerciales más comunes generalmente son de tamaños estándar, como 60 células (aproximadamente  $1\text{m}^2$  de área) o 72 células (aproximadamente  $1.7\text{m}^2$  de área), aunque existen paneles solares de otros tamaños y configuraciones en el mercado. Por lo tanto, es importante consultar información actualizada y específica de fabricantes y expertos en diseño solar para estimar con precisión la producción de energía y las dimensiones de los paneles solares en un caso particular.

En un estudio realizado por Kim *et al.* (2015), se calculó que, en un sitio de pruebas en Corea del Sur, un sistema fotovoltaico con una densidad de ocupación de paneles solares de 100 paneles por  $100\text{m}^2$  (equivalente a 1 panel por cada  $1\text{m}^2$  de área ocupada) podría generar aproximadamente  $110\text{ kWh/m}^2$  al año. Kazemi *et al.* (2019) calcularon que, en un clima mediterráneo, un sistema de paneles solares con una densidad de ocupación de alrededor del 20-25 % (aproximadamente  $2\text{-}2.5\text{m}^2$  de área ocupada por cada  $10\text{m}^2$  de superficie) podría generar alrededor de  $150\text{ kWh/m}^2$  al año.

## Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía solar fotovoltaica

En 2022, Colombia generó aproximadamente 76.000 GWh (gigavatios hora) de energía eléctrica (Enerdata, 2022). La generación de energía en Colombia proviene de diversas fuentes, incluyendo hidroeléctrica,

térmica y otras fuentes renovables como eólica y solar. La hidroeléctrica es la principal fuente de generación de energía en Colombia; representa una gran parte de la capacidad instalada del país.

Si toda la producción de energía del país se reemplazara por energía solar fotovoltaica, habría que calcular la cantidad de equipos necesarios para suplir la misma cantidad de energía. Para determinar la cantidad de paneles solares requeridos para suplir la demanda energética eléctrica en el país, tomamos una ficha técnica específica de un panel solar de buena capacidad que se vende hoy día en el mercado; además, convertimos la demanda eléctrica nacional anual a GWh-día.

- Demanda actual anual = 74.000 GWh-año
- Demanda actual promedio diaria= 208 GWh-día

Para el siguiente ejemplo se tomó en cuenta el siguiente panel solar:

- Deep Blue 3.0-Módulo de media célula Mbb de 550 W
- Dimensiones: 2279 mm × 1135 mm
- Potencia máxima nominal (Pmax) [W]: 550 W
- Irradiancia 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura de célula 25 °C, AM 1.5 G

Teniendo en cuenta la ficha técnica del panel solar de Deep Blue 3.0, podemos calcular la capacidad de generación del panel para conocer la cantidad necesaria para suplir la demanda energética de Colombia (tabla 1).

Se necesita una separación de más o menos 5 cm entre paneles y cada 10 paneles solares una separación de 30 cm.

**Tabla 1. Cantidad de paneles necesarios del tipo Deep Blue 3.0 550 W para producir la energía eléctrica que demanda el país diariamente**

Requerimiento energético para paneles solares fotovoltaicos Deep Blue 3.0 550 W	
Producción mensual de un panel	48,93 kWh-mes
Producción diaria de un panel	1,61 kWh-día o 0,00000161 GWh-día
Necesidad eléctrica en Colombia	208 GWh-día
Paneles requeridos en condiciones ideales	173.913.043,1
Área de ocupación en condiciones ideales	60.224,1 hectáreas

**Nota. Elaboración propia.**

Como referencia, el precio promedio de un panel solar de 1 m<sup>2</sup> puede oscilar entre 100 y 400 dólares estadounidenses (USD), o más, dependiendo de los factores mencionados. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos precios son estimaciones y pueden variar según el mercado y la ubicación geográfica.

Valor de los paneles aprox: 400 USD

Cantidad de paneles a instalar: 173.913.043 paneles

$$173.913.043 \text{ paneles} * 400 \text{ USD} = \$69.565.217.391 \text{ USD}$$

$$\$69.565.217.391 \text{ USD} * 4.000 \text{ COP/1 USD} = \$279 \text{ billones de COP}$$

A Colombia le costaría cerca de 279 billones de pesos adquirir este número de paneles solares para el sector eléctrico del país.







La energía eólica es un tipo de energía producida por la acción del viento, el cual se mueve desde una zona de alta presión a otra zona de baja presión, debido al calentamiento de la tierra causado por la radiación solar que provoca diferencias de temperatura y presión entre las masas de aire en distintos puntos del planeta (Iñesta y García, 2002), lo cual genera el movimiento. Como resultado, a medida que el viento caliente sube, el viento frío se mueve para llenar el vacío. El viento representa una fuente abundante de energía renovable, y su capacidad para generar energía eólica es de gran magnitud. A escala mundial, el viento se sitúa como la segunda fuente de energía renovable más importante, justo después de la energía hidráulica. Esta energía genera electricidad a partir de molinos de viento (U.S.E.I.A., 2021), o aerogeneradores, que están hechos de una torre de acero o de cemento, con un rotor de fibra de vidrio o de *composite*, que tiene una o varias aspas; el rotor está conectado a un generador eléctrico por medio de un eje central; el viento gira las aspas del rotor, lo que hace que el eje gire y, a su vez, que el generador eléctrico produzca energía. La electricidad generada puede ser empleada de forma inmediata o almacenada en baterías para ser utilizada en momentos posteriores (AWEA, 2021).

La generación de energía a partir del viento es muy prometedora en la actualidad. Durante siglos se ha utilizado la energía eólica; los molinos de viento son ejemplos comunes. En tiempos más recientes se han desarrollado turbinas eólicas que convierten la energía cinética (del viento) en energía mecánica, que luego se utiliza para generar electricidad. La energía eólica se considera una fuente de energía “verde”, ya que no emite gases de efecto invernadero ni contaminantes durante su funcionamiento de manera directa.

## Generalidades de la energía eólica

Esta energía se puede producir tanto en el continente (eólica *onshore*) como en el mar (eólica *offshore*). La energía eólica *onshore* se genera utilizando el aire de una región por medio de parques eólicos terrestres. Para ello se instalan varios aerogeneradores que convierten la energía cinética del aire en electricidad utilizable y alimentar la red. La energía eólica *offshore* se obtiene mediante el uso de la fuerza aérea generada en mar abierto y, debido a que no hay obstáculos, puede alcanzar una velocidad mayor y más constante. Para aprovechar al máximo este recurso, se construyeron en el fondo del mar megaestructuras dotadas de las últimas innovaciones tecnológicas (EPEC, 2020).

El proceso de trabajo de la producción de energía eólica se divide en las siguientes etapas (Castro, 2014):

- El viento mueve las palas del aerogenerador: los aerogeneradores son las estructuras que capturan el viento y lo transforman en energía eléctrica. Las palas del aerogenerador, que generalmente son tres, están unidas a un rotor y se mueven con el viento.
- El rotor hace girar un generador: el generador está vinculado al rotor, el cual transforma la energía cinética del viento en electricidad. A medida que las palas se mueven impulsadas por el viento, el rotor hace girar el generador de manera constante, proceso del cual resulta la electricidad.
- La energía eléctrica se almacena o se envía a la red: la electricidad generada por el generador es transferida a través de un transformador para aumentar su voltaje y luego se envía a la red eléctrica para ser distribuida a los usuarios. También es posible almacenarla en baterías para su uso futuro. El sistema está equipado con un sistema de control y monitoreo que supervisa la velocidad del viento y la cantidad de energía generada. Si la velocidad del viento es demasiado baja o alta, el sistema puede detener el aerogenerador para prevenir posibles daños.

En resumen, la energía eólica aprovecha la energía cinética del viento y la transforma en electricidad mediante procesos mecánicos

y eléctricos. La electricidad generada se almacena o se envía a la red eléctrica para su distribución a los consumidores finales (Giménez y Gómez, 2011).

La principal desventaja de la energía eólica es su carácter intermitente, lo que significa que no se puede confiar en una producción constante de electricidad. No obstante, esta limitación puede mitigarse al combinar turbinas eólicas con otras fuentes de energía, como la solar (ENEL, 2020).

La construcción de turbinas eólicas requiere de varios minerales y metales que se utilizan en diferentes partes de la turbina: hierro, aluminio, cobre, sílice, titanio, fibra de vidrio, plástico, aleaciones como el acero, materiales como el concreto y, muy importante en el contexto tecnológico de las turbinas, los minerales de tierras raras. En general, para la construcción de una sola turbina eólica de 150 m y 3 megavatios se necesitan cerca de 1.200 ton de concreto, 335 ton de acero, 4,7 ton de cobre, 3 ton de aluminio, 2 ton de tierras raras; además, se utilizan otros materiales como el zinc y el molibdeno (Green Washing Economy, 2020).

Estos minerales y metales pueden obtenerse de diversas partes del mundo, y su disponibilidad y costo varían según la región. Es importante señalar que la extracción y procesamiento de algunos de estos minerales y metales pueden tener impactos ambientales y sociales, por lo que se deben realizar de manera responsable y sostenible (Castro, 2014).

## **Capacidad de generación de la energía eólica**

El consumo energético mundial sigue creciendo de manera importante. Esto impulsa la generación con diversas fuentes, entre ellas, la de electricidad del viento. La energía eólica ha venido con tasas de crecimiento del 16 % y se esperaba un aumento de su capacidad instalada a nivel mundial hasta los 743 GW (Enerdata, 2022).

China es el país con mayor capacidad instalada de energía solar, con un total de 281 GW. Estados Unidos ocupa el segundo lugar, con 118 GW, seguido de Alemania, con 56 GW. Otros países con una importante capacidad instalada de energía solar son India, España, Reino Unido, Francia y Brasil (IEA, 2021).

Se calculaba que en 2021 la producción de energía eólica alcanzaría un nuevo pico de 273 TWh. Esto representa un aumento del 55 % desde 2020, el más alto de cualquier tecnología de energía renovable. Pero para lograr el escenario de cero emisiones netas de 2050 de alrededor de 7900 TWh de generación de electricidad, las adiciones anuales de nueva capacidad tendrían que aumentar a casi 250 GWp, más del doble del récord de 2020 (IEA, 2022).

En términos de producción de energía, se estimaba que la de energía eólica sería de alrededor de 1275 TWh de electricidad en todo el mundo en 2020, lo que corresponde a aproximadamente el 5 % de la producción mundial de electricidad. La importancia de las energías renovables seguirá creciendo en el futuro, y se estima que la capacidad instalada total de las energías renovables llegará a suplir las necesidades energéticas (U.S.E.I.A., 2021).

La producción de las turbinas eólicas varía mucho según su diseño, tamaño y tecnología. Son turbinas que varían en potencia desde unos pocos kilovatios (kW) hasta varios megavatios (MW). La tabla 2 muestra un ejemplo de un tipo particular de aerogenerador utilizado costa afuera.

**Tabla 2. Capacidad de una turbina eólica WT10000dd/190 SeaTitan**

Unidad de electricidad	Abreviatura	Capacidad de generación
Megavatios-hora	MW	10

*Nota.* The Wind Power (2022).

La capacidad de generación de electricidad de una turbina eólica está determinada por diversos factores, como la velocidad del viento, el tamaño y la eficiencia de la turbina y las condiciones ambientales específicas del lugar (The Wind Power, 2022).

## **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía eólica**

Para plantear el ejercicio de cubrir la demanda energética de Colombia con energía eólica, tomamos como referencia la turbina eólica (de uso marítimo) Windtec SeaTitan (The Wind Power, 2022); esta tiene una potencia de 10 MW. En condiciones ideales, si se considera cubrir la demanda energética en el país se debe tener en cuenta que el consumo de energía en Colombia es de 76.000 GWh (Enerdata, 2022). Para realizar este análisis planteamos la necesidad de turbinas eólicas con el fin de satisfacer la demanda colombiana; entonces, obtenemos que para cubrir la demanda energética en el país se necesitan alrededor de 2484 turbinas eólicas. Cabe resaltar que estos aerogeneradores son de los más grandes instalados en el mundo, que Colombia normalmente ha instalado aerogeneradores de 2 MW (80 % menos que el contemplado en el escenario) y que en los nuevos proyectos se plantean aerogeneradores de 5 MW (50 % menos que el contemplado en el escenario).

El enorme potencial eólico del país se estima en 32 GW, lo que supera la capacidad instalada actual de Colombia de 18,8 GW. De particular interés es la región de La Guajira con recursos de energía eólica importante con velocidad promedio del viento de 7 m/s (IDEAM, 2022). Sin embargo, este potencial sigue sin explotarse en gran medida: el país tiene 18,4 MW de capacidad eólica operativa en 2022, lo que representa menos del 0,1 % de la capacidad eléctrica (S.E.I., 2022).

Se deben considerar varios factores para determinar el requisito de espacio óptimo para una instalación de turbina eólica. Los parques eólicos son grandes conjuntos de turbinas diseñadas para la generación de electricidad a gran escala. Las grandes turbinas eólicas no se diferencian de las turbinas residenciales en un sentido: funcionan mejor con vientos suaves. Si algo interfiere con el flujo de aire, crea turbulencia, lo que reduce la eficiencia de la turbina. Cada aerogenerador crea turbulencia en el área detrás y alrededor de él, por lo que es necesario un buen espacio entre las turbinas. En este caso, la distancia se expresa en diámetros del rotor. La regla general para el espaciamiento de los parques eólicos es que las turbinas están separadas entre sí por apro-

ximadamente 7 diámetros de rotor. Por lo tanto, el rotor de 150 metros debe colocarse a 1050 metros del molino vecino, lo que quiere decir un área cuadrada de 1.102.500 m<sup>2</sup> o 110,25 hectáreas (Gaughan, 2021).

El área superficial necesaria para instalar una turbina eólica depende del tamaño y la capacidad de la turbina, así como de las regulaciones y restricciones locales. Con turbinas de gran tamaño como las usadas en este ejercicio, con palas de 200 metros, proyectamos 7 veces el diámetro de las palas para un total de 1400 metros de distancia entre una y otra, lo que significa 1.960.000 m<sup>2</sup> –o, mejor, 196 hectáreas– de ocupación por cada aerogenerador. Si queremos cubrir la demanda de energía en Colombia y los requerimientos con la instalación de 2484 turbinas eólicas, entonces, necesitaríamos un área de 486.864 hectáreas para la instalación de parques eólicos.

Es importante resaltar que en este ejercicio se contemplaron aerogeneradores gigantes de 10 MW, que normalmente se usan mar adentro. En Colombia, a la fecha los aerogeneradores más nuevos instalados son de 2 MW, por lo cual en un escenario con aerogeneradores más pequeños requeriríamos mayor cantidad de ellos para cumplir con la generación de electricidad requerida.





**L**a energía hidráulica consiste en una clase de energía renovable que usa la circulación del agua para conseguir electricidad (Guastay, 2020). En este tipo de energía limpia se usan generadores y turbinas de alta eficiencia para aprovechar la energía cinética y potencial del agua y luego convertirla en electricidad (Czitrom, Trelles y Hiriart, 2010).

El proceso de obtención de electricidad se presenta en las centrales hidroeléctricas; estas funcionan gracias a una turbina que gira cuando se presenta movimiento en el agua (Moreno, 2022). De forma más específica se puede decir que el sistema de la central consta de tres partes que son la base para que la turbina pueda generar esa electricidad: la primera es la central eléctrica que es de donde se genera la energía; la segunda consiste en una presa que controla el flujo del agua; y la tercera, un embalse donde se acumula toda el agua. El paso del agua hacia las palas de la turbina en la central eléctrica las empuja y hace girar al generador; como resultado, se obtiene la electricidad (Núñez, 2022).

## Generalidades de la energía hidráulica

La energía hidráulica contribuye con el 20 % de la electricidad producida a nivel mundial (Núñez, 2022). Este tipo de energía limpia brinda grandes cantidades de energía eléctrica en países de Latinoamérica, Europa y Asia (Ramos y Montenegro, 2012). Hay una distribución de centrales hidroeléctricas a escala global que varían según su capacidad. Existen las microcentrales hidráulicas que son las más pequeñas y alcanzan un máximo de 1 MW, las minicentrales hidráulicas que cuentan con una potencia de 1 MW hasta 10 MW y las centrales hidráulicas de gran potencia que superan los 10 MW de capacidad. Cabe aclarar que esta clasificación solo refleja la capacidad que pueden tener las centrales hidroeléctricas, mas no la cantidad de electricidad producida durante un periodo (Endesa, 2021).

Colombia es un país muy rico en recursos hídricos y con terrenos que permiten el desarrollo de proyectos para generar energía hidroeléctrica; estos se han hecho visibles desde los años 70 (Castaño y Feuillet, 2021). Las centrales hidráulicas hoy en día aportan un 68 % de la energía eléctrica en nuestro país y un gran índice de la energía hídrica del mundo (UPME, 2015). Las siete centrales más importantes de la nación son: la central hidroeléctrica de Guavio, que es la más grande de Colombia, cuenta con una capacidad instalada de 1250 MW y está ubicada en Cundinamarca; le siguen la de San Carlos, con una capacidad instalada de 1240 MW y se encuentra en Antioquia en el río Guatapé; Chivor, ubicada en Santa María, Boyacá, y con una capacidad instalada de 1000 MW; Hidrosogamoso, en el río Sogamoso, Santander, y con capacidad instalada de 820 MW; Porce III, en el río Porce, Antioquia, y con una capacidad instalada de 660 MW; Guatapé, al Oriente de Antioquia, cuenta con una capacidad instalada de 560 MW; y Betania, ubicada en Huila y con una capacidad instalada de 540 MW (Bacca, 2019).

En el año 2021 la producción mundial de energía hidroeléctrica se redujo en 15 TWh, es decir, un 0,4 %; bajó a 4327 TWh sin importar que el crecimiento de la capacidad tuviera un aumento gradual (IRENA, 2023). En varios lugares del mundo cerca de las centrales ocurrió una sequía que llevó a la reducción de la generación de este tipo de energía. Sin embargo, a pesar de esa problemática ambiental la energía hidráulica sigue siendo nuestra mayor fuente renovable de electricidad, incluso pasando por encima de todos los tipos de tecnologías limpias mezcla-

das (SELA, 2021). La tasa de crecimiento de energía producida anualmente en el Escenario de NetCero para 2050 tiene un promedio del 3 % de 2022 a 2030, para suministrar alrededor de 5700 TWh de electricidad en un año (Enerdata, 2022). Durante los últimos cinco años, el índice de crecimiento en la implementación de plantas hidroeléctricas ha sido insuficiente, ya que representa solamente un tercio de lo necesario para cumplir con las demandas de energía del futuro. Esta situación hace evidente la necesidad de intensificar significativamente los esfuerzos, especialmente en lo que respecta a simplificar los procedimientos de permisos y asegurar la sostenibilidad de los proyectos. Es importante destacar que las plantas hidroeléctricas representan una columna vertebral confiable de los sistemas de energía limpia del futuro y, por lo tanto, deben ser apoyadas adecuadamente para asegurar su éxito (IEA, 2022).

La energía hídrica utiliza el agua como insumo principal para producir electricidad. Esta forma de energía se produce a partir de la energía cinética del agua que fluye, la cual se convierte en energía eléctrica mediante un proceso mecánico. Es una fuente de energía limpia, ya que no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminación del aire (IHA, 2021) de manera directa. El agua es una fuente de energía abundante y ampliamente disponible en todo el mundo, lo que hace que la energía hidráulica sea una opción atractiva para muchos países que buscan reducir su dependencia de los combustibles fósiles y avanzar hacia un futuro más sostenible (Castro, 2006).

En resumen, la materia prima que utiliza la energía hidráulica para producir electricidad es el agua, la cual es almacenada en un embalse y liberada para hacer girar las turbinas de una central hidroeléctrica (Arango, 2012). Esta forma de energía es limpia, renovable y ampliamente disponible en todo el mundo, lo que la hace una opción atractiva para muchos países que buscan reducir la huella de carbono que tienen y avanzar hacia unos años más sostenibles.

Dentro de los países con mayor producción de energía hidráulica encontramos a China, Brasil, Canadá, Estados Unidos y Rusia (Arancibia, 2014). La central hidráulica con mayor capacidad instalada para la electricidad es la de las Tres Gargantas (Sanxia) en el río Yangtsé de China; esta central hidroeléctrica consta de 2,3 kilómetros de ancho y

185 m de altura (Ubierna *et al.*, 2020). En términos de electricidad generada anualmente, la principal a nivel mundial es la central de Itaipú localizada en el río Paraná, entre Brasil y Paraguay (PAVCO, 2019). En España, la energía hidroeléctrica está fuertemente relacionada con la época de la dictadura de Francisco Franco y su reputación como constructor de presas. La principal instalación de producción de electricidad a partir del agua en España es la Central de Aldeadávilas, situada en Salamanca, que cuenta con una capacidad de generación de 1243 MW (Marín y Marín, 2010).

Según la IEA (2022), los países en desarrollo de África, Asia y América Latina poseen la mayor parte del potencial hidroeléctrico aún no aprovechado. Además de generar electricidad, las instalaciones hidroeléctricas en estas economías ofrecen una opción rentable para ampliar el acceso a la electricidad, impulsar el crecimiento económico y suministrar agua para riego y consumo humano.

A pesar de lo mencionado anteriormente, el acceso a financiamiento asequible para proyectos hidroeléctricos a gran escala sigue siendo limitado debido a los riesgos macroeconómicos y políticos. Por lo tanto, es fundamental que instituciones financieras internacionales y los gobiernos apoyen las alianzas público-privadas y movilicen capital de bajo costo para reducir los riesgos asociados con los proyectos hidroeléctricos en los países en desarrollo (Oviedo, 2018).

## **Capacidad de generación de energía hidráulica**

La capacidad de generación de energía hidroeléctrica es muy variable (tabla 3) e inciden muchos factores, por ejemplo, las condiciones específicas del sitio, la altura de la caída de agua, el flujo de agua, el tamaño y eficiencia de la central hidroeléctrica. Además, la generación de energía hidroeléctrica puede ser afectada por condiciones climáticas como sequías o inundaciones.

**Tabla 3. Capacidad de generación de energía eléctrica por m<sup>3</sup> de agua**

Unidad de electricidad	Capacidad de generación por m <sup>3</sup> de agua
Kilovatios	Una hidroeléctrica bien diseñada y operada puede generar alrededor de 1 a 2 kilovatios por m <sup>3</sup> de agua que pasa por la turbina, que es lo mismo que decir 0,001-0,002 megavatios por m <sup>3</sup> de agua.

*Nota. AIE (2021).*

Según Minshall (2010), para calcular la cantidad de energía eléctrica que produce una central hidroeléctrica se usa la siguiente fórmula:

$$E = \rho * g * Q * h * \eta * 3600 * 24 * 365 / 10^9$$

Donde:

$E$  = energía eléctrica generada en GWh

$\rho$  = densidad del agua en kg/m<sup>3</sup>

$g$  = aceleración debido a la gravedad en m/s<sup>2</sup>

$Q$  = caudal del río en m<sup>3</sup>/s

$h$  = altura neta de caída en metros (la calcularemos a continuación)

$\eta$  = eficiencia de la central hidroeléctrica

3600 = número de segundos en una hora

24 = número de horas en un día

365 = número de días en un año

10<sup>9</sup> = factor de conversión de J/s a GWh

Supongamos que tenemos una central hidroeléctrica ubicada en una represa, con densidad del agua de aproximadamente 1000 kg/m<sup>3</sup>. Durante el año, la central hidroeléctrica opera continuamente, aprovechando el flujo de agua del río que alimenta la represa. Supongamos que el caudal del río es de 100 metros cúbicos por segundo y que la central hidroeléctrica es capaz de aprovechar el 90 % de la energía cinética del agua para generar electricidad. La altura de la represa es de 100 metros y la altura de la toma de agua de la central hidroeléctrica es de 50 metros.

Con estas condiciones, podemos estimar la cantidad de energía eléctrica que se puede producir en un año.

Primero calculamos la altura neta de caída en metros.

$$h=100 - 50= 50 \text{ m}$$

Calculamos la cantidad de energía eléctrica generada.

$$E = 1000 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * 100 \text{ m}^3/\text{s} * 50\text{m} * 0,9 * 3600 * 24 * 365 / 10^9$$
$$E = 1382,07 \text{ GWh.}$$

Para producir esta energía eléctrica se necesitan varios equipos y recursos, como turbinas, generadores, transformadores, líneas de transmisión, entre otros. Además, es necesario invertir en la construcción y mantenimiento de la central hidroeléctrica y la represa, así como en el control del caudal del río para optimizar la producción de energía (Endesa, 2021).

## Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía hidráulica

El ejercicio anterior se puede aplicar a una de las centrales hidroeléctricas más conocidas del país: la de Ituango. Para el caso de la central hidroeléctrica con mayor capacidad instalada de Colombia (2400 MW), la demanda de energía eléctrica producida al año depende de los valores que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4. Datos de la central hidroeléctrica de Ituango para reemplazar en la ecuación**

Caudal medio del río Cauca	1045 m <sup>3</sup> /s
Densidad del agua	Aproximadamente 1000 kg/m <sup>3</sup>
Eficiencia de la central hidroeléctrica	88,4 %
Aceleración de la gravedad	9,81 m/s <sup>2</sup>
Altura de la represa	225 m
Altura de la entrada de agua de la central	400 msnm

*Nota.* Empresas Públicas de Medellín (EPM, 2019).

Primero calculamos la altura neta de caída en metros.

$$h = 400 - 225 = 175\text{m}$$

Calculamos la cantidad de energía eléctrica generada.

$$E = 1000 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * 1045 \text{ m}^3/\text{s} * 175\text{m} * 0,884 * 3600 * 24 * 365 / 10^9$$

$$E = 50.012,92 \text{ GWh}$$

La cantidad de energía eléctrica que se puede generar teóricamente (bajo las condiciones ideales y según la fórmula de Minshall, 2010) durante el año en esta central hidroeléctrica sería de aproximadamente 50.012,92 GWh. La demanda de energía eléctrica anual para el año 2021 fue de 76 TWh/año (Enerdata, 2023). Para cubrir esta demanda de energía eléctrica en el país se necesitan 1,52 centrales como la de Ituango, bajo las condiciones anteriormente presentadas, que producirían 76,01 TWh/año (tabla 5). Es importante tener en cuenta que esta es solo una estimación y que otros factores, como la disponibilidad de agua y el caudal, la eficiencia del sistema y las turbinas y el mantenimiento de la central hidroeléctrica, también pueden afectar la cantidad de energía eléctrica que se genere.

**Tabla 5. Comparación de la demanda de energía eléctrica anual del país con la cantidad de energía eléctrica generada por la central de Ituango**

Demanda de energía eléctrica anual de Colombia (2021)	Cantidad de energía eléctrica anual que podría producir la central de Ituango	Centrales de Ituango necesarias para cubrir la demanda de energía eléctrica anual
76 TWh/Año.	50.012,92 GWh.	1,52 (76,01 TWh/año).

*Nota. Minshall (2010).*

La generación de energía hidroeléctrica real en la central de Ituango en 2021 fue de 12.940 GWh. Si comparamos con la que calculamos anteriormente, hay una gran diferencia y probablemente tiene que ver con cada uno de los factores que influyen en el funcionamiento de una central hidroeléctrica.

Para cubrir la demanda de energía eléctrica del país (76 TWh/año) se necesitan al menos 5,88 centrales como la de Ituango de acuerdo a la capacidad de generación actualmente reportada (tabla 6); así se producirían 76,08 TWh/año.

**Tabla 6. Comparación de la demanda de energía eléctrica anual con la cantidad de energía eléctrica generada por la central de Ituango en 2021**

Demanda de energía eléctrica anual de Colombia (2021)	Cantidad de energía eléctrica anual que produce la central de Ituango (2021)	Centrales de Ituango necesarias para cubrir la demanda de energía anual
76 TWh/año	12.940 GWh	5,88 (76,08 TWh/año)

*Nota. Empresas Públicas de Medellín (2022).*





**E**sta fuente de energía limpia se deriva del calor dentro de la Tierra llevado a la superficie a través de la corteza (Tester *et al.*, 2006; NTG, 2023). Esta energía se ha venido utilizando en algunos países como calefacción en los hogares y para cocinar desde hace miles de años. Para la producción de energía geotérmica el insumo principal es el agua en el subsuelo en forma de vapor y a altas temperaturas, lo que es aprovechado para mover turbinas y generar energía. En las centrales térmicas tradicionales, el calor se obtiene quemando combustibles fósiles, normalmente gas natural o carbón. En una central nuclear, el calor se consigue como resultado de la reacción de fisión nuclear de los átomos. En las plantas de energía geotérmica, el calor se recolecta de depósitos geotérmicos en la capa interna de la Tierra (EGS, 2023) y, dependiendo de cómo se captura el calor inicial, las plantas de energía generarán más o menos energía (GTC, 2023).

En comparación con los sistemas tradicionales, los sistemas geotérmicos pueden disminuir el gasto de energía entre un 70 % y un 30 % en el modo de calefacción y entre un 95 % y un 20 % en el modo de refrigeración. Los científicos han estimado que el calor contenido dentro de los primeros 5 kilómetros de profundidad desde la superficie terrestre es equivalente a unas 500.000 veces las necesidades actuales de electricidad del mundo, lo que hace que el desarrollo de la energía geotérmica sea más atractivo en comparación con los combustibles tradicionales fósiles (Twenergy, 2023).

## Generalidades de la energía geotérmica

Para obtener energía geotérmica, se perforan pozos en la corteza terrestre hasta llegar a zonas donde el calor es más intenso y permite la circulación de agua caliente y vapor de agua (IIGE, 2019). El vapor y el agua caliente que se hallan en el subsuelo pueden utilizarse para producir electricidad, calefacción y refrigeración mediante turbinas y generadores (Merkel *et al.*, 2013; DLE, 2023).

La energía geotérmica no emite CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) ni otros gases que contribuyen al cambio climático de manera directa; otra de sus ventajas se origina de ser una fuente de energía constante y predecible (FE, 2023). La energía geotérmica se puede producir todo el año, lo que la hace una fuente de energía confiable (IGI, 2023). Además, a diferencia de otras energías renovables como la solar o la eólica, esta no depende de factores climáticos como la luz solar o el viento para producir electricidad (Merkel *et al.*, 2013). Otra ventaja importante es que tiene un impacto mínimo en el suelo y la disponibilidad de agua subterránea no depende de los acuíferos adyacentes (GOM, 2023).

Sin embargo, la extracción de energía geotérmica también presenta algunas desventajas. Según algunos autores, la construcción de pozos geotérmicos puede tener un impacto significativo en el ambiente, ya que puede alterar los ecosistemas locales y causar gases de efecto invernadero si se liberan gases del subsuelo durante la extracción (Tester *et al.*, 2006).

Su principal desventaja puede ser el alto costo de la exploración subterránea y los pozos de exploración, dependiendo de la ubicación de los pozos (similares a los petroleros) y las centrales eléctricas (ISEG, 2023). Además, la extracción de energía geotérmica solo es posible en zonas específicas de la Tierra donde el calor en el subsuelo es suficientemente intenso, lo que limita su disponibilidad (Merkel *et al.*, 2013).

A pesar de sus desventajas, la energía geotérmica sigue siendo una de las fuentes de energía renovable más prometedoras para el futuro. Es una energía renovable porque es inagotable, se obtiene del calor que se renueva constantemente en el interior de la tierra (OVC, 2023) y tiene el potencial de proporcionar una fuente de energía limpia y

constante a nivel mundial. Además, la tecnología para la extracción de energía geotérmica está mejorando constantemente, lo que puede ayudar a reducir los impactos negativos en el ambiente y en las comunidades locales (GTO, 2023).

La extracción se realiza mediante la perforación de pozos con grandes profundidades para obtener vapor o agua caliente, que se bombea a través de tuberías a la superficie para su uso en la generación de electricidad o calor (DOE, 2020). En términos de su contribución a la matriz energética mundial, desde aproximadamente 2008 ha habido un incremento en la cantidad de proyectos que utilizan energía térmica para generar electricidad, pero ha habido un aumento sorprendente en la cantidad de plantas geotérmicas que calientan hogares y negocios (EGEC, 2023); por lo tanto, es un gran potencial, ya que podría proporcionar hasta el 10 % de la electricidad mundial para 2050 (BBC, 2023).

Además, la energía geotérmica puede complementar otras fuentes de energía, como la eólica y solar, para proporcionar una fuente de energía confiable y constante (World Bank, 2020). A pesar de su enorme potencial, la energía geotérmica sigue sin explotarse en todo el mundo y representa solo alrededor del 0,3 % de la generación de electricidad mundial. Uno de los mayores obstáculos para el desarrollo de la energía geotérmica es la falta de inversión y apoyo estatal (IEA, 2020).

Otro aspecto relevante de la energía geotérmica es su capacidad de generar empleos y fomentar el desarrollo económico. La mayor inversión, según Bloomberg NEF (2021), fue en Efeler (Turquía), con un estimado de 170 MW y USD\$717 millones. En términos de industria, la energía geotérmica emplea un número aproximado de 60.000 personas alrededor del mundo. Además, puede disminuir la dependencia de los combustibles tradicionales importados y promover la independencia energética de los países (IGA, 2020).

Un referente es Indonesia. En este país la segunda fuente de energía renovable es la geotérmica, justo detrás de la hidroeléctrica; en 2019, el 71 % de la energía eléctrica utilizada procedió de fuentes renovables, y un 28,3 % de esta producción total era geotérmica. No obstante, en este país la energía hidroeléctrica significa una parte muy importante: un 42 % de la producción total (Meier *et al.*, 2015).

## Capacidad de generación de la energía geotérmica

La energía eléctrica se puede generar a partir de calor geotérmico utilizando centrales diseñadas para convertir los ciclos de agua caliente y ciclos de vapor en electricidad. La cantidad de energía depende de varios factores, incluida la temperatura del fluido geotérmico y la eficiencia de los sistemas utilizados para convertir el calor en electricidad. En general, los yacimientos geotérmicos de alta entalpía (por encima de 150 °C) son los más adecuados para la generación de electricidad (UN, 2023).

Existen disparidades en los gradientes térmicos de distintas regiones terrestres, y esto se traduce en una eficiencia energética y generación de electricidad más elevada en algunos lugares y menos elevada en otros. En términos generales, la capacidad de producción de energía geotérmica es menor en comparación con la energía solar (60 MW/m<sup>2</sup> para la geotermia y 340 MW/m<sup>2</sup> para la energía solar) (GEO, 2023)). Sin embargo, donde los gradientes de temperatura antes mencionados son grandes (conocidos como reservorios geotérmicos), el potencial de producción de electricidad es mucho mayor (hasta 200 MW/m<sup>2</sup>). Este enorme potencial de producción de energía produce calor que se puede utilizar industrialmente en el acuífero (RNV, 2023).

La eficiencia de conversión de las turbinas en una central geotérmica puede variar desde el 10 % hasta el 25 %, dependiendo de varios factores, como la calidad y la temperatura del fluido geotérmico, la presión del vapor, el diseño y la tecnología de la turbina y la capacidad de generación de energía de la central (tabla 7). Una eficiencia de conversión del 10 % al 15 % se considera “mala”, una eficiencia del 15 % al 20 % se considera “regular” y una eficiencia del 20 % o más se considera “buena” (DOE, 2023).

**Tabla 7. Capacidad de generación de energía geotérmica**

<b>Centrales de ciclo de vapor</b>		
<b>Eficiencia de turbinas</b>	<b>Centrales de ciclo de vapor de alta entalpía (+150 °C)</b>	<b>Centrales de ciclo de vapor de baja entalpía (30 a 100 °C)</b>
Buena 22,5 %	Entre 900 y 1100 kWh	Entre 400 y 700 kWh
Regular 17,5 %	Entre 700 y 900 kWh	Entre 300 y 500 kWh
Mala 12,5 %	Menos de 700 kWh	Menos de 300 kWh

*Nota.* ConceptoABC (2023); GTO (2023).

Es importante tener en cuenta que los valores presentados en la tabla 7 son solo estimaciones generales y que varían dependiendo de las condiciones de cada central geotérmica. Además, la producción de energía también dependerá de la capacidad de generación de la planta y la cantidad de tiempo que la planta pueda funcionar a su capacidad máxima.

## **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía geotérmica**

Hasta agosto de 2022 la demanda energética en Colombia fue de 6240 GWh-mes (Bnamericas, 2022), lo que equivale a 208 GWh-día.

Para estimar el número de centrales geotérmicas necesarias para cubrir la demanda eléctrica diaria de Colombia necesitamos primero convertir la demanda en energía eléctrica a su equivalente en energía geotérmica.

La demanda eléctrica de Colombia es de 208 GWh-día, lo que equivale a 208.000 kWh por día. Si tomamos como referencia el proyecto Cerro Pabellón en Chile, una planta de energía geotérmica con una capacidad de generación de 50 MW (BID, 2023), y asumimos una eficiencia del 22,5 %, podemos estimar la producción diaria de energía geotérmica de la siguiente manera:

$$50 \text{ MW} * 24 \text{ horas} * 0,225 = 270 \text{ MWh-día}$$

Por lo tanto, una planta de energía geotérmica con esas características podría producir aproximadamente 270 MWh de energía geotérmica en un día.

Ahora, para calcular el número de centrales geotérmicas necesarias realizamos la siguiente operación:

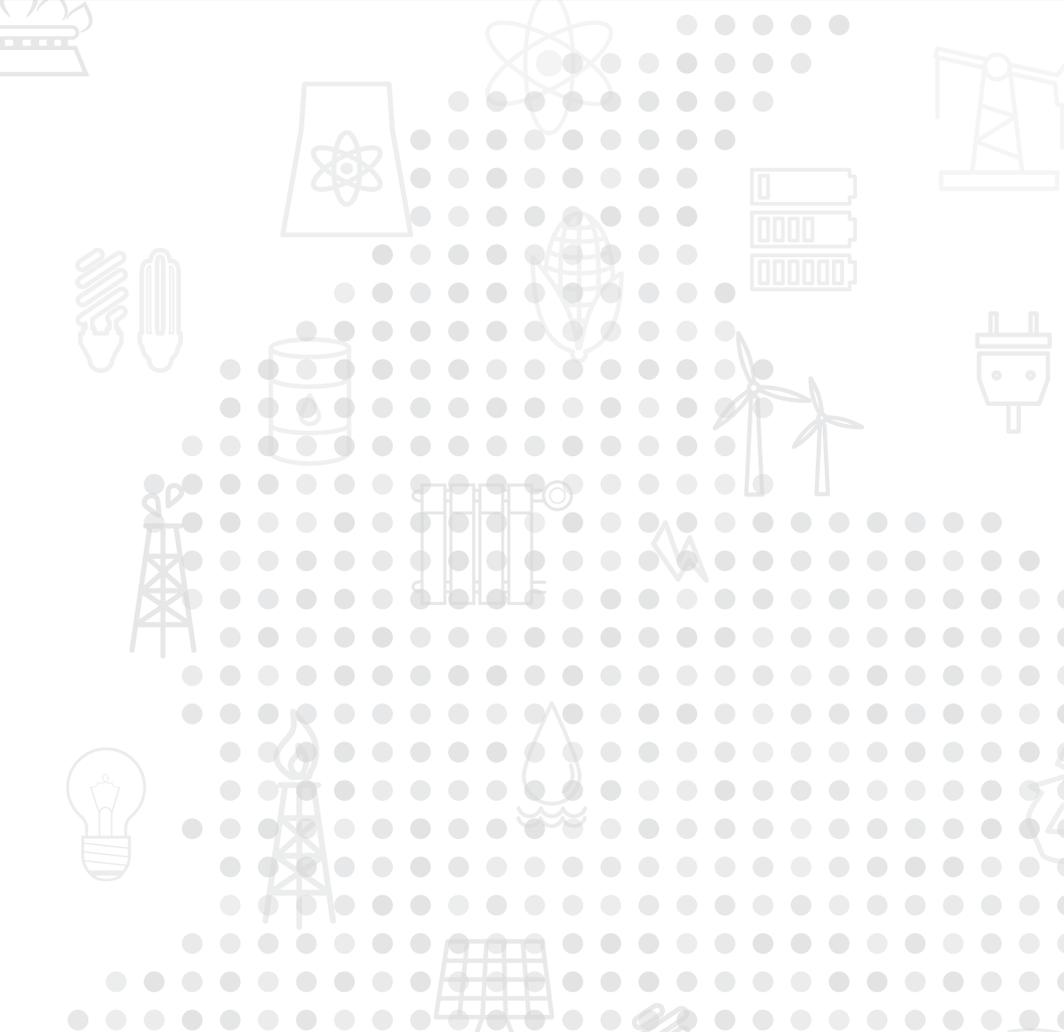
$$\text{Número de plantas} = 208.000 \text{ MWh} / (50 \text{ MW} * 24 \text{ horas} * 0,225)$$

$$\text{Número de plantas} \approx 770,3$$

Se requerirían aproximadamente 770 plantas de energía geotérmica, asumiendo plantas de 50 MW de capacidad, y una buena eficiencia de 22,5 % para cubrir la demanda energética diaria de 208 GWh-día en Colombia. Cabe resaltar que las 770 plantas necesarias deberían ser todas de alta entalpía y de alta eficiencia.



# Energía a base de hidrógeno





**E**l hidrógeno es el elemento primordial en la tabla periódica. En condiciones ambientales y normales, se presenta como un gas insípido, incoloro e inodoro, conformado por moléculas diatómicas de  $H_2$ . Representa uno de los componentes fundamentales del agua y de la totalidad de la materia orgánica y se extiende en multitud de compuestos que no solo abarcan nuestro planeta, sino también en el vasto universo. Es destacable que a presión atmosférica su punto de inflamabilidad es 255 K ( $-18\text{ }^\circ\text{C}$ ) y posee un Efecto Joule-Thomson negativo, es decir, la temperatura se incrementa con la expansión del gas que se calienta durante la expansión en condiciones normales. Solo el hidrógeno y el helio tienen esta propiedad, situación que complica su almacenamiento y uso dado que, como gas, el hidrógeno tiene una densidad baja, es decir, ocupa un volumen muy grande. Se necesita encontrar formas de compactarlo en volúmenes mucho más pequeños para su uso práctico y diario.

## Generalidades del hidrógeno

Existen varias tecnologías de generación de hidrógeno. Orozco (2023) destaca que entre las más comunes se encuentran:

- Reformado de gas natural: implica la producción de hidrógeno a partir del gas natural, y es actualmente el método más utilizado. El proceso involucra la combinación del gas natural y vapor de agua a alta temperatura y presión, lo que produce hidrógeno y dióxido de carbono.
- Electrólisis del agua: esta tecnología implica la utilización de electricidad para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. El proceso se realiza en una celda electrolítica, donde se aplica electricidad a una solución de agua y electrolito, lo que produce hidrógeno y oxígeno gaseosos.

- **Fotólisis:** utiliza la energía solar para separar el agua en hidrógeno y oxígeno. La fotólisis puede ser realizada directamente o mediante el uso de materiales semiconductores.
- **Gasificación de biomasa:** implica la producción de hidrógeno a partir de la gasificación de materiales orgánicos como residuos forestales, residuos agrícolas y residuos municipales.
- **Pirólisis:** es una tecnología que utiliza el calor para descomponer la materia orgánica en hidrógeno y otros productos químicos.
- **Reformado de etanol:** el proceso implica la producción de hidrógeno a partir del etanol. El etanol es calentado en presencia de vapor de agua y un catalizador, lo que produce hidrógeno y dióxido de carbono.

Comúnmente, la forma o tecnología asociada a la generación se considera un punto de partida para la clasificación más común por colores. Kilner (2022) lo resume de la siguiente forma: El hidrógeno verde proviene de la electrólisis del agua principalmente industrial, esta electrólisis se realiza con energía solar o eólica. El rosa, se genera a partir de electrólisis dada por energía nuclear. El hidrógeno gris se da a partir un reformado de gas metano con vapor en la refinación del hidrocarburo. El marrón proviene de la gasificación del carbón. Finalmente, el azul es generado tanto por un reformado de gas metano o por la gasificación del carbón.

Actualmente la mayor parte del hidrógeno (96 %) se produce por reformado y usando carbón, petróleo y gas natural (Chero, 2023), lo que implica que la mayor parte de la producción actual de hidrógeno es un emisor directo de gases de invernadero. En este escenario la introducción de tecnologías de electrólisis se está desarrollando rápidamente para satisfacer la necesidad de hidrógeno verde que sustituya la perjudicial forma general de producción de hidrógeno actual.

Las tecnologías de generación de hidrógeno tienen sus ventajas y desventajas; se recopilaron algunas en la tabla 8.

**Tabla 8. Resumen ventajas y desventajas de las tecnologías del hidrógeno**

Tecnología	Ventaja	Desventaja
<b>Electrólisis</b>	Utiliza electricidad renovable para producir hidrógeno, no emite gases de efecto invernadero, flexible para adaptarse a diferentes fuentes de electricidad, como paneles solares o turbinas eólicas.	Requiere mucha energía para separar el hidrógeno del oxígeno, lo que puede ser costoso y poco eficiente; necesita agua limpia y purificada como materia prima; puede ser sensible a la contaminación.
<b>Reformado de gas natural</b>	Relativamente económico; las infraestructuras de gas natural ya existentes se pueden utilizar; el proceso es eficiente y de alta capacidad.	Emite gases de efecto invernadero; no es una fuente de energía renovable; la disponibilidad de gas natural puede ser limitada y no siempre sostenible.
<b>Gasificación de biomasa</b>	Utiliza materiales orgánicos renovables; puede ayudar a reducir los residuos y emisiones de gases de efecto invernadero y a diversificar la oferta de combustibles.	Puede ser costoso, con baja eficiencia del proceso y requerir mucha agua y otros recursos naturales.
<b>Fotólisis</b>	No utiliza combustibles fósiles ni emite gases de efecto invernadero; la energía utilizada puede ser renovable.	El proceso es todavía experimental y no comercializado; la eficiencia es baja y puede requerir equipos costosos.
<b>Hidrólisis termoquímica</b>	No utiliza combustibles fósiles ni emite gases de efecto invernadero; puede ser eficiente y escalable; no requiere agua pura.	Todavía está en desarrollo y no está comercializado; puede ser costoso debido a los materiales y equipos especializados requeridos.

**Nota. Elaboración propia.**

En el contexto de la electrificación orientada hacia la producción de hidrógeno, la tecnología que destaca de manera prominente es la electrólisis. Esta técnica tiene sus raíces en los experimentos electroquímicos del siglo XIX y ha evolucionado a lo largo de los últimos cien años; se divide en tres categorías principales: electrólisis de agua alcalina (AWE), electrólisis de agua con membrana de polímero (PEMWE) y celda de electrólisis de óxido sólido de alta temperatura (SOEC) (Kilner, 2021). Entre estas, la AWE emerge como la más influyente, con

unidades comerciales de gran envergadura en funcionamiento, incluyendo demostraciones de unidades de hasta 100 MW. A pesar de su prominencia, esta tecnología enfrenta desafíos de eficiencia y una limitada flexibilidad en términos de arranque y detención, lo que complica su integración con fuentes de energía renovable.

Se destaca desde el punto de vista de la energía que la requerida para purificar agua es de órdenes de magnitud inferior (2-7/5000 kWh) a la necesaria para la electrólisis; luego de purificar se necesitan de 9 a 11 kg de agua ultrapura para generar 1 kg de hidrógeno, lo que implica que generar hidrógeno a partir de electrólisis podría tener efectos en el ciclo del agua, situación que escapa del alcance de este documento.

En otro aspecto relevante, el desafío del almacenamiento representa un obstáculo significativo en el camino a una economía y sociedad con alta dependencia energética del hidrógeno. De acuerdo con el Departamento de Energía de EE. UU. (2023), el almacenamiento de hidrógeno es una tecnología esencial que impulsa el progreso de las tecnologías de hidrógeno y las celdas de combustible en diversos campos, como energía estacionaria, portátil y transporte. Si bien el hidrógeno ostenta la mayor densidad de energía por masa entre todos los combustibles, su limitada densidad a temperatura ambiente resulta en una reducida capacidad energética por unidad de volumen que afecta también su transporte. Esta condición motiva la búsqueda de métodos de almacenamiento avanzados con el potencial de lograr una mayor densidad de energía y mejores formas de transportar el hidrógeno.

El Oxford Institute for Energy Studies (Patonia y Puodineh, 2023) concluyó que:

- Las alternativas de almacenamiento de hidrógeno tienen sus propias densidades de H<sub>2</sub> volumétricas y gravimétricas distintas y su combinación da como resultado diferencias significativas en el volumen y el peso que estas opciones ocuparían para conservar la misma cantidad de hidrógeno.

- Ninguna de las alternativas de almacenamiento de hidrógeno funciona mejor en todas las categorías que son importantes para crear un caso de negocio sólido para el almacenamiento de hidrógeno.
- Además, el costo es uno de los aspectos más importantes al elegir una opción específica de almacenamiento de hidrógeno para invertir, pero estimar los gastos específicos en los que incurriría un inversor al elegir una opción sobre otra es difícil debido a los diferentes TRL/MRL/CRL, así como a características específicas del proyecto.
- Esto sugiere que probablemente no habrá una sola opción preferida para todas las partes interesadas que se ocupan del hidrógeno.
- Es más probable que la solución de almacenamiento definitiva se elija en función de la combinación del uso final del hidrógeno y sus características. Además de abordar los riesgos de precio y demanda, los diseñadores de modelos de negocio para el almacenamiento de hidrógeno deberán enfrentar otras complejidades importantes, como la elección de las instalaciones de almacenamiento, su ubicación con relación a los centros de producción y demanda, el modelo de propiedad, la definición de las partes elegibles para el apoyo gubernamental, entre otros.

En definitiva, actualmente las alternativas de almacenamiento de hidrógeno a lo sumo entran en categorías de *low*, pues ninguna alternativa pasa un caso de estudio de negocio, los costos necesitan asociarse a TRL, MRL y CRL (Technology Readiness Level, Manufacturing Readiness Level y Commercial Readiness Level, por sus siglas en inglés), y finalmente es interesante ver que no se ha avanzado en varios frentes de investigación desde fechas tan lejanas como 1990-2006. Todos estos aspectos son aún retos para desarrollar una cadena de valor sólida y resistente en la economía del hidrógeno desde el punto de vista del almacenamiento.

Otro reto importante para la producción de energía a base de hidrógeno es su mecanismo de transporte. Aunque hay creciente interés por el hidrógeno y sus aplicaciones, realmente son pocos los estudios amplios sobre el ámbito del transporte de este en tuberías; se destaca

principalmente que los intentos actuales en este ámbito son la mezcla de hidrógeno con gas natural en infraestructura de gasoductos. Topolsky (2022) hizo un resumen del estado de las tecnologías y destaca:

- Después de una revisión exhaustiva de la literatura sobre las oportunidades y los desafíos asociados con la mezcla de hidrógeno en la infraestructura de gasoductos de gas natural, la idoneidad de los sistemas de tuberías de gas natural para hidrógeno, incluso en bajas concentraciones (p. ej., 1-10 % en volumen), depende de numerosos factores, uno de los cuales es la condición de infraestructura de gasoductos así como las condiciones de operación propuestas con hidrógeno mezclado.
- Las demostraciones técnicas han mostrado un progreso significativo en el desarrollo de la comprensión práctica para enfrentar los desafíos en la mezcla de hidrógeno y otros; cada prueba ha llenado los vacíos de conocimiento actuales y mejorado los tomadores de decisiones sobre futuros proyectos de mezcla.
- Los estudios operativos de tuberías también han demostrado impactos hidráulicos y termodinámicos consistentes en la mezcla de hidrógeno con gas natural, y han destacado que los compresores centrífugos requerirán aumentos en la velocidad para mantener el aumento de la presión a medida que aumenta la concentración de hidrógeno, debido al bajo peso molecular de este. Los estudios también han ilustrado que operar las redes de gas existentes con una caída de presión constante da como resultado una reducción en la capacidad de energía transmisible, y que operar con una caída de presión constante o una capacidad de transmisión de energía constante requeriría sustancialmente más trabajo de compresión para altas concentraciones de hidrógeno que para gas natural puro.

En general, aunque con retos vigentes, el transporte de hidrógeno en tuberías no posee una madurez tecnológica actual y aunque suene extraño este nivel no ha sido obtenido en el transporte marítimo de hidrógeno, lo que puede limitar la capacidad de exportarlo sin cambios o productos químicos intermedios.

## **Capacidad de generación de energía a partir del hidrógeno**

Merlin (2023) destaca que, dada la naturaleza irregular de la energía eólica, solar y otras energías renovables, la producción de electricidad a partir de energías renovables es estacional, y cualquier exceso de electricidad producido debe almacenarse para los días sin viento o con menos sol. Actualmente faltan sistemas de almacenamiento de energía que sean más efectivos que las baterías, lo que dificulta que cualquier país se convierta en un exportador mundial de energía limpia.

La solución a este problema es almacenar electricidad adicional en forma de hidrógeno porque es limpio y muy eficiente. El hidrógeno tiene una densidad de energía de 39 kWh/kg, lo que significa que 1 kg de hidrógeno contiene 130 veces más energía que 1 kg de baterías, por lo que se puede almacenar mucha energía con hidrógeno en solamente un pequeño volumen. Este ideal nos ha llevado a pensar en el hidrógeno como un energético que pueda reemplazar el poder energético de los combustibles fósiles.

### **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de hidrógeno**

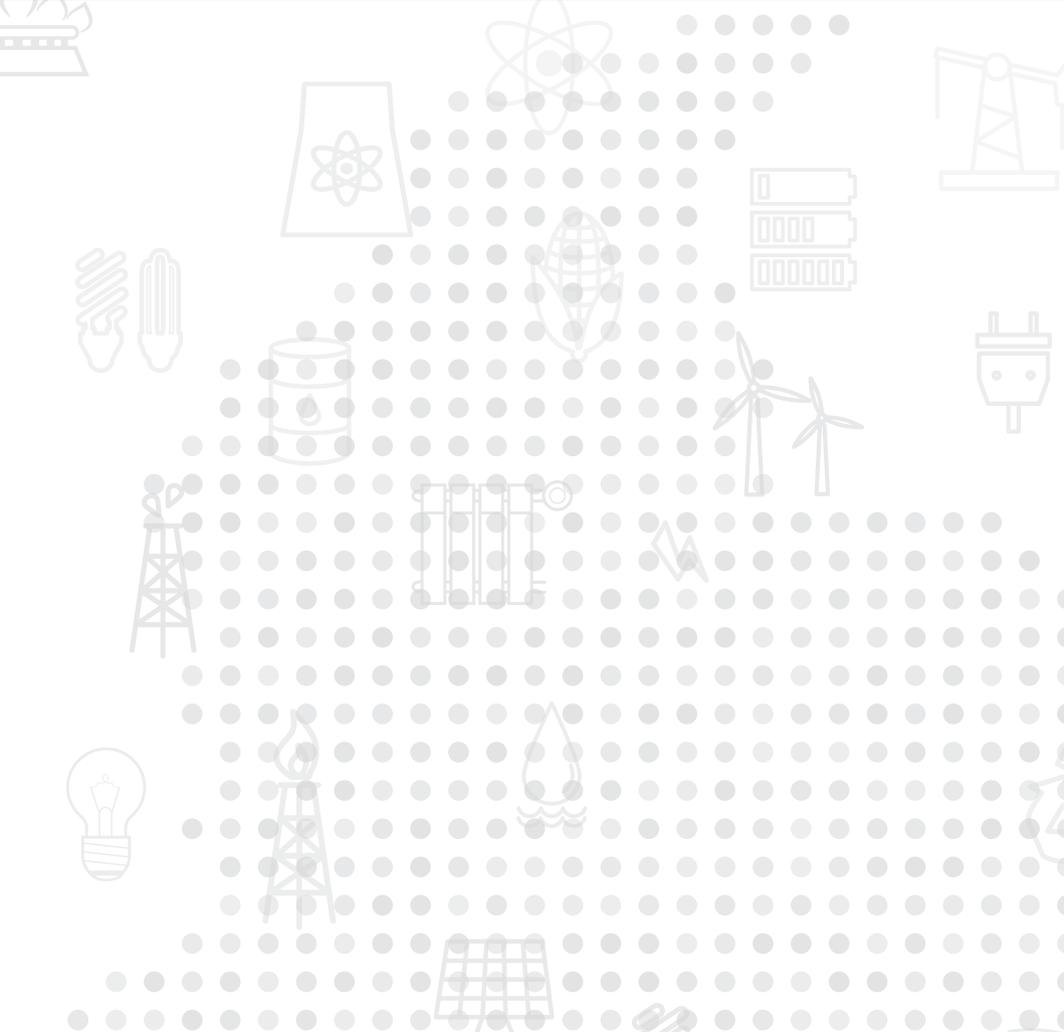
Evaluando la capacidad de generación de energía del hidrógeno, hemos una aproximación al consumo de nuestro sector eléctrico en Colombia. Este está en el orden de 76.000 GWh-año, por lo que debería producirse la cantidad de hidrógeno necesaria para que en su proceso de combustión permita generar esa misma cantidad de energía. Teniendo en cuenta la capacidad de generación del hidrógeno y la cantidad de energía que demanda el país, se necesitaría producir 1.948.718 toneladas de hidrógeno; esta cantidad no incluye la energía que consume el proceso de hidrólisis (para producción del hidrógeno), proceso que consume gran cantidad de energía.

La transición hacia una economía del hidrógeno aún enfrenta varios desafíos, incluyendo el alto costo de producción, el transporte y almacenamiento de hidrógeno, la necesidad de desarrollar una infraestructura adecuada para su uso y soluciones firmes para evitar su posible

impacto en aumento del efecto invernadero. Por lo tanto, es probable que la producción, y de paso cualquier exportación de hidrógeno, tome tiempo para alcanzar una escala suficiente para reemplazar completamente los usos de hidrocarburos actuales, pero es meritorio hacer inversiones en estas tecnologías e investigaciones pertinentes para lograr facultades tecnológicas y avances en su aplicación futura, a fin de crear capacidades locales que permitan su probable expansión en el futuro.



# Energía a base de gas natural





**E**l gas natural está llamado a ser el energético de la transición. Según la IEA (2022), la demanda global aumentará más de la mitad para el año 2040. Esta fuente de energía se utiliza en actividades residenciales, comerciales e industriales, y es especialmente importante en la producción industrial (acero, papel, fertilizantes, etc.), así como para calefacción. Según lo publicado en Foro Nuclear (2023), el gas natural funciona ampliamente como combustible tanto en entornos domésticos como industriales debido a su alto poder calorífico, su capacidad de regulación de la combustión y su baja contaminación. Su producción de  $\text{CO}_2$  es significativamente menor que la generada por otros combustibles fósiles. Además, es insumo esencial en la industria petroquímica, por cuanto permite la producción de amoníaco, metanol, etileno, butadieno y propileno.

Sin embargo, evaluar los posibles impactos climáticos de la generación de electricidad a partir de gas natural en comparación con el carbón es complicado, como indican Zhang, Myhrvold y Caldeira (2016), debido a la amplia gama de factores considerados en los estudios del ciclo de vida y a la variedad de métricas climáticas propuestas. A pesar de esto, la sustitución de nuevos sistemas de energía a base de carbón por sistemas de gas natural podría potencialmente reducir a corto plazo las emisiones de gases contaminantes y servir como un puente hacia futuros sistemas de energía con emisiones cercanas a cero.

Según la IEA (2020), si bien la quema de gas natural emite gases de efecto invernadero, emite considerablemente menos  $\text{CO}_2$  y contaminantes atmosféricos en comparación con muchos de los combustibles que reemplaza, especialmente el carbón. En la última década, el uso de gas natural ha experimentado un crecimiento rápido; representa cerca de un tercio del crecimiento total de la demanda de energía, más que cualquier otro combustible fósil. Se espera que su uso continúe aumentando en los próximos años en todos los escenarios estudiados, aunque con diferencias significativas.

## Generalidades del gas natural

El gas natural se descubrió en el año 2000 a. C., aproximadamente, aunque en ese momento no se comprendían completamente la magnitud y los beneficios de este hidrocarburo, cuyo componente principal en esta mezcla es el metano (Naturgy, 2019). Otros gases, como etanol, CO<sub>2</sub> y vapor de agua, también están presentes en pequeñas cantidades (Minenergía, 2022). El gas natural se puede utilizar directamente después de una pequeña separación o como subproducto del procesamiento del petróleo (BCN, 2021). El gas licuado de petróleo (GLP) es una combinación de gases propano y butano, que se puede obtener tanto como un subproducto de la refinación del gas natural como del petróleo. El GLP tiene mayores facilidades para transportarse y almacenarse en forma líquida; sin embargo, se usa como gas.

El gas natural se forma a partir de la descomposición de materia orgánica y sedimentos a lo largo de miles de años, mediante altas temperaturas y presiones en yacimientos a varios kilómetros de profundidad. Estas reservas se encuentran distribuidas en todo el mundo, con algunas áreas que poseen mayores acumulaciones que otras debido a sus condiciones geológicas (Ecopetrol, 2014). En estos yacimientos, el gas natural, el cual contiene metano, pero también otros hidrocarburos más pesados como etano, propano, butano y pentano, se puede encontrar, o no, disuelto en el petróleo. En caso de estar disuelto con el petróleo, durante la producción, cuando se reduce la presión desde las condiciones del yacimiento hasta la presión atmosférica, el gas natural se separa del petróleo formando una fase gaseosa (Soltanieh *et al.*, 2016).

Este recurso energético no es renovable y se caracteriza por ser inodoro, inodoro y no tóxico. Ofrece numerosos beneficios, ya que genera menos residuos y es más eficiente que otros combustibles fósiles. Además, desempeña un papel crucial al brindar confiabilidad a las fuentes de energía renovable al equilibrar la oferta y la demanda, lo que resulta especialmente importante para la energía eólica, solar e hidroeléctrica (Shell, 2023).

El gas natural se encuentra presente en varias regiones de Colombia, como Huila, Casanare y Magdalena Medio (Grupo Vanti, 2023). En otras áreas, como La Guajira, se localiza en el lecho marino. Las propiedades

del gas varían de un yacimiento a otro por condiciones propias de su formación. El gas puede tener presentes compuestos contaminantes como vapor de agua, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, helio y otros (Ecopetrol, 2014).

El gas natural de uso industrial presenta varias ventajas por ser un suministro continuo y confiable (Enagás, 2019). Además, genera menos emisiones en comparación con el petróleo y el gas, y es altamente competitivo. El gas natural se usa como fuente de calor, como insumo principal para la fabricación de plásticos y productos químicos, en la fabricación de caucho, en calderas industriales y sistemas de calentamiento en la industria metalúrgica, cemento, vidrio y cerámica, así como en la fabricación de ladrillos y en la industria alimentaria para procesos de cocción y secado.

Además de su uso como materia prima, mencionado anteriormente, el gas natural también tiene aplicaciones en deshumidificación, que están ganando popularidad en industrias como plásticos, farmacéutica, alimentos y reciclaje. La humedad en el aire durante la fabricación de estos causa daños en el producto final; de allí la importancia de los deshumidificadores con gas natural. Otra aplicación innovadora está en la producción de baterías de litio, en que la humedad puede reducir el rendimiento y la vida útil de las baterías.

Shell Energía (2023) destaca que el gas natural es una materia prima adecuada para la industrialización; es utilizado en la fabricación de amoníaco, un producto base en la industria de fertilizantes nitrogenados, y metanol, que se utiliza en la producción de plásticos y proteínas sintéticas. En muchos casos, el gas capturado puede ser fácilmente llevado al mercado, pero en otros, especialmente cuando el gas se produce conjuntamente con petróleo, puede no haber rutas o negocios establecidos para utilizar el gas de manera productiva. En tales casos, puede ser necesario construir nueva infraestructura, como compresores, tuberías de recolección y transmisión, o instalaciones de licuefacción para facilitar la utilización del gas natural (IEA, 2020).

En países de América Latina como Perú, Argentina, Brasil y Chile se ha implementado un tratamiento eficaz de transición energética mediante el uso del gas natural y la reducción de sus emisiones de gases,

incluido el metano, hasta en un 4 %, según la AIGLP (2020). En términos de consumo de GLP en el mercado, Brasil ocupa el primer lugar, seguido por Perú y Chile.

El uso del gas natural en Colombia se produjo mucho después del desarrollo del petróleo (Minenergía, 2023). Inicialmente, el gas natural encontrado en los campos petroleros era quemado, a pesar de ser un energético clave, debido a los desafíos que planteaban su almacenamiento y transporte.

La industria es el principal consumidor de gas natural, y tiene una demanda creciente en Europa por consideraciones geopolíticas (Enagás, 2019). Después del uso industrial, la generación de electricidad representa el 28 % de la demanda de gas, mientras que el consumo doméstico y comercial representa el 15 %. El resto se destina a la carga de cisternas de gas licuado para plantas satélites. El gas natural se aplica en casi todas las actividades industriales, en la mayoría de los casos con costos operativos más económicos que otras fuentes de energía (Minenergía, 2022).

## **Capacidad de generación de energía a base de gas natural**

Según la ANH (2023), la producción promedio de gas comercializado en abril de 2023 fue de cerca de 41.625.764 metros cúbicos, es decir, en promedio 1.378.525 metros cúbicos diarios. Teniendo en cuenta que el gas natural posee un poder calorífico de aproximadamente 11,98 kWh por metro cúbico (Gaspais, 2023), esto equivaldría a un escenario hipotético de generación de alrededor de 499 GWh-mes, es decir, 16,7 GWh-día, si se usara todo ese gas para generar energía.

### **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía a base de gas natural**

La tabla 9 muestra que de 1m<sup>3</sup> de gas natural es posible extraer 11,98 kW (Endesa, 2023). Para cubrir la necesidad energética en Colombia se necesitan 208 GWh por día; sin embargo, si la producción

de gas en Colombia se usara para producir electricidad, solo cubriría 16,7 GWh-día, y quedarían como faltante 191 GWh-día de energía por producir. En ese escenario, Colombia debería producir 17.362.270 m<sup>3</sup> de gas natural diario, o 520.868.115 m<sup>3</sup> mensuales, para cubrir esta necesidad. Hoy Colombia produce el 8 % de lo necesario en dicho escenario.

**Tabla 9. Capacidad de generación de electricidad a partir del gas natural**

Capacidad de producción de energía a partir de gas natural	
Volumen para suplir demanda diaria	Poder calorífico del gas /demanda diaria
1m <sup>3</sup>	11,98 Kwh/m <sup>3</sup> →0,00001198 GWh/m <sup>3</sup>
17.362.270 m <sup>3</sup> /día	Demanda diaria de Colombia: 208 GWh/día

*Nota. Endesa (2023).*







Los hidratos de gas son sustancias químicas de estructura cristalina formados por una red de moléculas de agua que confinan moléculas gaseosas, principalmente de metano, aunque pueden contener hidrocarburos más pesados (Kvenvolden, 1988). Pertenecen a la categoría “componentes de inclusión”, caracterizados por tener la capacidad de albergar un compuesto dentro de una cavidad química estructural a partir de las interacciones moleculares por medio de fuerzas de Van der Waals (Bonney y otros, 2005). Hay varios tipos de componentes de inclusión; en este caso hablaremos del clatrato, que aloja las moléculas anfitrionas a través de una expansión estructural por medio de espacios vacíos, relativamente esféricos (Sloan, 2007), y cuyos cristales poseen una estructura en la cual las moléculas de agua son las que forman un marco suelto que rodea la molécula de gas. Si las moléculas anfitrionas del clatrato están formadas por agua, entonces se le conoce como “clatrato hidratado”, al cual se resume llamándolo simplemente “hidrato”, pero si adicionalmente la molécula rodeada por las anfitrionas es un gas, entonces se le denomina “hidrato de gas”.

## Generalidades del gas a partir de hidratos

Las acumulaciones de hidratos de gas ocurren en cualquier ambiente geológico/tectónico, como ambientes compresionales (Turco y otros, 2020), diapirismo de lodo (Graul y otros, 1989), plataformas carbonáticas (Bohrmann y otros, 1998), depósitos deltaicos de alta sedimentación (Kvenvolden y McMenamin, 1980), márgenes pasivos (Collett y Riedel, 2008), entre otros. Dichas reservas se encuentran distribuidas en los sedimentos oceánicos a lo largo de los márgenes continentales y en el permafrost, donde existen las condiciones adecuadas para que los hidratos permanezcan en equilibrio; se estima que el 98 % de los yacimientos de hidratos de gas en el mundo se localizan en las regiones *offshore* mientras que tan solo el 2 % se hallan en las regiones polares (Olabisi y otros, 2022).

Así mismo, las ubicaciones mundiales de hidratos de gas se clasifican en conocidas e inferidas. Las reservas conocidas, también llamadas probadas o recuperadas, son aquellas en las cuales las muestras de hidratos fueron llevadas hasta superficie a partir de núcleos obtenidos en distintos proyectos de perforación; sin embargo, también existen pocas ubicaciones reconocidas a partir de material audiovisual tomado cerca al lecho marino. Las reservas inferidas se establecen teniendo en cuenta propiedades que coincidan o se relacionen con la presencia de hidratos de gas, como pueden ser los registros de pozos o las características geoquímicas del entorno. No obstante, el método más utilizado actualmente para inferir la presencia de hidratos de gas es el reflector de simulación de fondo o *bottom* acumulación (Waite, Ruppel y Boze, 1990).

Las reservas de hidratos de metano se calculan hasta en  $1 \times 10^5$  TCF y se encuentran almacenadas en depósitos de arcillas y arenas fracturadas alrededor del mundo (Stephenson, 2018). Desde la primera evaluación de este recurso por Trofmuk en 1973 hasta la actualidad se han realizado aproximadamente 29 estimaciones globales, de las cuales 24 resultan ser potencialmente favorables para que este recurso supere ampliamente las reservas totales de gas convencional de las que se dispone actualmente (Pang, 2021). Dimensionalmente, los hidratos de gas poseen una gran capacidad para almacenar gas metano; un metro cúbico de un hidrato típico contiene aproximadamente 164 metros cúbicos de metano a temperatura y presión estándar (Aregbe, 2017). Se estima que las reservas más grandes de metano almacenadas en hidratos inferidas a partir de un modelo de equilibrio termodinámico mundial se ubican en el mar Árabe, en la costa occidental de África y en el margen continental de Perú, Chile y Bangladesh. Solamente haciendo referencia a las cuencas *offshore* a nivel global, se estimó un valor aproximado de  $4,4 \times 10^{16} \text{m}^3$  de metano en condiciones estándar de presión y temperatura (Sandler, 2005). No obstante, el principal inconveniente para aprovechar los hidratos de gas como recurso energético es su compleja extracción, debido a los cambios en las condiciones de equilibrio en las que se encuentran dentro del entorno marino y que cambian al ascender hacia la superficie, volviéndose inestables y dejando escapar el metano a la atmósfera, lo cual representa un gran desafío técnico y ambiental (Rodrigo, Vera y González-Fernández, 2009).

Este recurso junto con los demás yacimientos no convencionales aumenta el interés en la exploración de áreas portadoras de grandes reservas energéticas que abastezcan al mundo en los próximos años. El gas atrapado en los hidratos a lo largo de los márgenes continentales representa un potencial recurso energético que debe ser estudiado y evaluado con el propósito de llevar a cabo una posible explotación comercial que encamine a una transición energética segura y sostenible con el gas natural como puente hacia las energías más limpias. En Colombia la existencia de hidratos de gas no está comprobada completamente; sin embargo, se infiere que están presentes en las cuencas *offshore* de los márgenes oceánicos del Caribe y el Pacífico, las cuales se encuentran clasificadas como zonas inexploradas prácticamente en su totalidad y cuentan con muy poca información que permita evaluar si poseen reservas potenciales de hidratos de gas. Particularmente en el margen del Pacífico colombiano los pozos perforados para adquirir información geológica son muy pocos y bastante antiguos; no obstante, a partir de las muestras de hidrocarburos recogidas se dedujo que la roca es lo suficientemente madura para la producción de petróleo y gas (Ortiz y Valencia, 2013). Adicionalmente, en los márgenes occidental y oriental del océano Pacífico se encuentran distribuidas y acumuladas grandes reservas probadas de hidratos de metano, principalmente por las características geológicas de la zona y los bordes de las placas tectónicas (Shakirov, 2011) que se extienden a lo largo de todo el litoral pacífico suramericano, lo que da indicio a la posibilidad de existencia de dicho recurso en esta costa de Colombia. Se estima que el potencial total del volumen prospectivo de hidratos de gas alcanzaría los 19 TCF en su cálculo medio (Vargas, 2012).

## **Capacidad de generación de energía del gas a partir de hidratos**

Teniendo en cuenta la capacidad de generación del gas, visto en el capítulo anterior, sabemos que su potencial es de 11,98 KWh/m<sup>3</sup>.

## **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía del gas a partir de hidratos**

Tomando los datos de producción de energía arriba mencionados en la tabla 9, hacemos un cálculo de la cantidad de energía que se podría producir si se explotan los hidratos de gas y cuánto sería el tiempo de autoabastecimiento de Colombia si el 100 % del gas se transforma en energía eléctrica. Se estima que Colombia tiene un potencial de gas en sus hidratos de  $57 \times 10^{10} \text{ m}^3$  de hidratos de gas, lo que significaría una capacidad de producir 6.828.600 GWh de electricidad; como Colombia consume 208 GWh-día, alcanzaría para 32.829 días, es decir, 89,9 años, manteniendo el consumo eléctrico actual.





La energía de las mareas ha sido ampliamente reconocida como una de las fuentes productoras de energía más eficientes, que puede ser aprovechada para amortizar las demandas anuales; sin embargo, desde su existencia, no ha sido ampliamente empleada (Budyanto *et al.*, 2019; Quintero y Quintero, 2023). La energía de las mareas se clasifica como fuente de energía no convencional y renovable y podría ofrecer beneficios significativos en el mercado energético si se usara de manera masiva e industrializada (Khare y Bhuiyan, 2022).

El concepto de utilizar la energía de las mareas está bien establecido. Los franceses fueron pioneros en este campo, con numerosas ideas y patentes que datan de 1890. Si bien la idea de aprovechar la energía oceánica para generar electricidad es más antigua, solo hasta 1950 Romanoski exploró por primera vez el concepto revolucionario de aprovechar la energía térmica de las mareas y las olas (Montero-Sousa y Calvo, 2013).

Las crecientes demandas de energía de nuestro mundo, la susceptibilidad a las fluctuaciones del mercado y los esfuerzos continuos para frenar las emisiones de CO<sub>2</sub> se han reflejado en acuerdos internacionales como los que se firmaron en Kioto, Copenhague y Durban. En respuesta, naciones como España y la Unión Europea han desarrollado estrategias energéticas de vanguardia que priorizan el uso de energías renovables. Para seguir siendo competitivos en este panorama en rápida evolución, para aprovechar plenamente los beneficios de las fuentes de energía renovable, es crucial que se canalicemos nuestros recursos hacia la investigación y el desarrollo destinados a desbloquear nuevas tecnologías (López y Núñez, 2014), y la energía mareomotriz significa una fuente importante de energía dentro de estos planes, pues los océanos con su inmensa área de superficie, gran volumen y capacidad calorífica son el máximo captador y almacenador de energía solar en la Tierra.

## Generalidades de la energía mareomotriz

Hay tres métodos para aprovechar la energía de las mareas: *los TSG*, o *generadores de corrientes de marea*, son dispositivos que aprovechan la potencia de las corrientes de marea para generar electricidad; esto vendría siendo comparable con lo que hacen las turbinas eólicas, mecanismos que aprovechan el movimiento del viento y lo convierten en energía eléctrica utilizable. Por otra parte, las represas construidas a lo largo de los cursos de agua de las mareas aprovechan la energía del agua retenida para impulsar turbinas que generan electricidad. Y la *dynamic tidal energy*, comúnmente conocida como *DTP*, es un enfoque revolucionario que combina los beneficios de las dos tecnologías anteriores. Al construir grandes barreras a través de cuerpos de agua, su objetivo es manipular las fases de las mareas del océano, generando así electricidad mediante las turbinas que activan estas presas (Energía Mareomotriz, 2023).

El ascenso y descenso provenientes de la naturaleza de las mareas y corrientes oceánicas es el principal medio para que esto sea posible. Este sistema logra un óptimo aprovechamiento del oleaje de las aguas oceánicas durante las fluctuaciones de las mareas para generar electricidad (Ahmed y Das, 2016). La elaboración de un dique es fundamental para lograr un óptimo control del movimiento que produce el agua; el dique (las compuertas) se abre cuando incrementa la marea y el agua procede a ingresar en el embalse; posterior a esto, al llegar a su punto máximo el nivel del agua que se encuentra dentro del embalse, se cierra el dique; durante la bajamar el nivel del mar va en descenso; en el momento en el cual esto sucede las compuertas del dique, o bien sea de las turbinas, se abren con el fin de que el agua pase a través de estas, y como resultado de esto se consigue que la fuerza que se produce por el paso del agua encienda la hélice que se encuentra dentro de la turbina y esta, al girar, mueve un generador, el cual produce la electricidad. Esto es posible cuando la disimilitud entre el nivel del agua que se encuentra en el embalse y el agua que se encuentra en el mar alcanza su máxima amplitud (Hernández y Jiménez, 2020).

Para generar electricidad con la energía mareomotriz, el componente esencial es el agua de mar. La energía mareomotriz se basa en la utilización y aprovechamiento del movimiento que tienen las mareas, la cual al mismo tiempo es generada principalmente por la atracción gra-

vitatoria del Sol y la Luna sobre la Tierra. Según el Department of Energy (2023), las mareas producen energía cinética, la cual más adelante pasa a convertirse en energía eléctrica gracias a la utilización de turbinas y generadores. La energía mareomotriz requiere del uso de diversos materiales tecnológicos para la construcción de turbinas y equipos y de infraestructura física como el acero y el hormigón. Además, se deben tener en cuenta los aspectos ambientales y sociales asociados a la construcción de infraestructuras en zonas costeras (BID, 2016).

Energías Renovables (2023) informa que la planta de Sihwa ubicada en Corea del Sur es la más grande del mundo, con una capacidad masiva de 254 MW. La segunda central de producción es la de La Rance, ubicada en Francia, que cuenta con una capacidad de 240 MW. Otros países con proyectos de energía mareomotriz en desarrollo incluyen el Reino Unido, Portugal, Canadá y China.

En Europa, la energía mareomotriz se ha estado generando durante décadas en Francia, en la planta de La Rance, que ha estado en operación desde 1966. La costa atlántica de Europa cuenta con un gran potencial para la generación de energía mareomotriz; su capacidad teórica es de hasta 70 GWp (Roca, 2023). En América Latina, la región que cuenta con mayor potencial para la generación de energía mareomotriz es la costa del Pacífico, especialmente en países como Chile y Perú. Esto está plasmado en informes publicados por el BID (2016). La energía mareomotriz podría ser una importante fuente de energía renovable en América Latina, especialmente en áreas remotas donde no hay acceso a la red eléctrica. En Chile, por ejemplo, se estima que la energía mareomotriz podría generar hasta 1,6 TWh al año (Vega, 2014).

Algunas de las ventajas y desventajas al hablar de la energía mareomotriz son: se trata una fuente que promete mucho con respecto a nuevos tipos de energía sostenible y además rentable y depende del poder de las mareas, lo que la hace inmune a las fluctuaciones de precios impredecibles que se observan en otras formas de energía como el petróleo. Sin embargo, cuenta con limitaciones como su ineficiencia. Si bien tiene el potencial de alimentar a cientos de miles de hogares en condiciones ideales, se requieren inversiones significativas que pueden generar impactos negativos tanto en el paisaje como en el medio ambiente. A menudo es necesaria una intervención directa en

el ecosistema marino, lo que puede provocar daños ecológicos. Se ha concluido que el impacto ecológico, es decir, la relación entre el costo de fabricación de la planta y la cantidad de energía producida, a menudo no es muy favorable (Energía Mareomotriz, 2023; UPME, 2023).

## **Capacidad de generación de energía mareomotriz**

El potencial energético en las mareas de todo el mundo es de alrededor de 800 TWh al año. Sin embargo, se indica que solo una pequeña parte de esta energía ha sido aprovechada hasta el momento y que el potencial real dependerá de diversos factores, como la topografía del fondo marino y las corrientes, según informes provenientes del Department of Energy (2023).

En América Latina, también existe un importante potencial de generación de energía mareomotriz. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2012) menciona que la región cuenta con un eventual progreso de generación de energía mareomotriz de aproximadamente 95 TWh al año. El estudio destaca que el mayor potencial se encuentra en las costas del Pacífico, en particular en Chile y Perú, así como en el mar Caribe y el golfo de México (Quintero y Quintero, 2016; Yépez-García *et al.*, 2018).

La capacidad instalada de la energía mareomotriz es comparativamente baja si la relacionamos con otras fuentes de energía renovable a nivel global. En el mundo se tiene una potencia total de 530 MW instalada de energía mareomotriz, lo que equivale a una producción anual de alrededor de 1,7 TWh (Energías Renovables, 2020). Se indica que la mayor parte de la capacidad instalada de energía mareomotriz se encuentra en Francia, Reino Unido, Corea del Sur y Canadá.

## **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía mareomotriz**

La utilización de la energía mareomotriz como fuente renovable tiene el potencial de satisfacer las necesidades de electricidad de un país.

Una turbina mareomotriz puede generar entre 500 y 1500 kWh si trabaja bien, entre 250 y 750 kWh si trabaja regularmente, y menos de 250 kWh si funciona mal.

Al estimar la cantidad necesaria de energía mareomotriz para suplir la demanda eléctrica del país de 76 TWh/año (208 GW día) (tabla 11), es necesario hacer algunas suposiciones. Si asumimos que una turbina mareomotriz puede generar un promedio de 1000 kWh y que trabaje 24 horas al día, entonces produciría 24000 kWh día (0,024 GWh-día), entonces se necesitarán 8.666 turbinas en estado óptimo para satisfacer la demanda eléctrica anual del país. Sin embargo, si las turbinas trabajan regularmente, se necesitarán más para generar la misma cantidad de energía. Y si las funcionan mal, se necesitarán aún más (tabla 10).

Es importante tener en cuenta que estas son estimaciones generales y que la cantidad real de turbinas necesarias para satisfacer la demanda eléctrica del país dependerá de muchos factores específicos, como la geografía, la altura de las mareas, la velocidad con la cual va el caudal del agua y la disponibilidad de tecnología de turbinas mareomotrices (IRENA, 2018).

Colombia tiene una amplia extensión de tierra costera que se extiende en el océano Pacífico y el mar Caribe. Debido a esto, existe un gran potencial para la generación de energía utilizando la de las mareas. Según un estudio realizado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), el potencial teórico de generación de energía mareomotriz en Colombia es de alrededor de 17.500 GWh al año. Sin embargo, se considera que el potencial real de producción de energía dependerá de ciertos factores (CREG, 2018).

**Tabla 10. Capacidad de generación de electricidad por estado de turbina**

Estado de la turbina	Producción de energía por hora (KWh)	Promedio
Bien	500-1500 kWh	1000 kWh
Regular	250-750 kWh	500 kWh
Mal	Menos de 250 kWh	125 kWh

*Nota.* Ordóñez-Sánchez *et al.* (2019); Nachtane *et al.* (2018); Cheng *et al.* (2014).

**Tabla 11. Demanda eléctrica del país**

Demanda eléctrica del país (TWh/año)	Demanda eléctrica del país (GW/día)	Generación promedio de una turbina en buen estado (kWh)	Generación promedio de una turbina en buen estado (GW)	N.º de turbinas
76 TWh	208 GW día	1000 kWh	0,024 GW	8.666

*Nota. Enerdata (2022).*

La variación de las mareas es un factor clave en la generación de la energía mareomotriz. En Colombia, la amplitud de las mareas es mayor en la costa del Pacífico que en la del Caribe, según un informe elaborado por la compañía británica Tidal Lagoon Power, dedicada a la generación de energía a partir de las mareas. En la bahía de Tumaco, ubicada en la costa del Pacífico, la variación de la altura de la marea entre el nivel alto y el nivel bajo puede alcanzar hasta 4,5 metros, mientras que en la bahía de Turbo, en la costa del Caribe, esta diferencia es menor, aproximadamente de 1,5 metros (tabla 12).

**Tabla 12. Variación de las mareas**

Costa del Pacífico	Costa Caribe
4,5 m	1,5 m

*Nota. Tidal Lagoon Power (2023).*

El espacio requerido para cada turbina mareomotriz dependerá de la tecnología utilizada y de la topografía de la costa. En general, se requiere un área relativamente grande para la instalación de plantas de energía mareomotriz. Por ejemplo, Tidal Lagoon Power ha propuesto la ejecución y construcción de una planta de energía mareomotriz ubicada en la bahía de Tumaco que cubriría un área de alrededor de 12 kilómetros cuadrados y tendría una capacidad de generación de energía de hasta 200 MW (tabla 13). En comparación, una planta de energía solar de la misma capacidad podría cubrir un área de alrededor de 2 kilómetros cuadrados (Ong *et al.*, 2013).

**Tabla 13. Espacio requerido para una planta de energía mareomotriz ubicada en la bahía de Tumaco**

Planta de energía mareomotriz	Capacidad de generación de energía	Planta de energía solar
12 km <sup>2</sup>	200 MW	2 km <sup>2</sup>

*Nota.* Tidal Lagoon Power (2023).







**E**s la energía cinética y mecánica del movimiento de las olas del mar. Estas se deben a la acción que el viento ejerce sobre la superficie del mar y crea ondulaciones en el agua misma. La secuencia de las ondulaciones puede sumarse para producir el movimiento superficial periódico característico de las olas (Mendoza y Viteri, 2013).

Los sistemas undimotrices o WEC (*wave energy convert*) aprovechan la energía de las olas haciendo uso de diferentes principios físicos (Mosquera *et al.*, 2021). Por ejemplo, los cuerpos activados por onda utilizan el movimiento de las olas, ceden energía a un cuerpo, y esta a su vez es transmitida a turbinas o convertidores eléctricos que son capaces de transformar esta energía mecánica en energía eléctrica. Por otro lado, el desbordamiento es un sistema que utiliza la energía generada por barreras rompeolas, donde el agua que entra en contacto con la barrera se recoge y se almacena en un depósito para luego ser canalizada a través de una turbina hidráulica. Así mismo, la columna de agua oscilante aprovecha la oscilación regular del nivel del agua en una cámara especial conectada al mar, generando así una presión que comprime una masa de aire y pone en movimiento un turbogenerador. El sistema de extracción de energía dependerá de la distancia a que se vayan a instalar de la costa, la posición relativa respecto a la ola, la posición en el agua, etc. (Piriz, 2017).

## Generalidades de la energía undimotriz

El potencial relativo de energía disponible en las olas oceánicas a nivel mundial se estima en alrededor de 2700 GW, mientras que la capacidad total aprovechable se sitúa en casi 500 GW. Frente a la costa caribe colombiana tenemos niveles de energía undimotriz entre 10 y 20 kW/m de frente de onda (Pérez y Becerra, 2017). Podemos medir el oleaje calculando la densidad de energía por metro frontal; este valor varía dependiendo de la localización; por ejemplo, Australia tiene zonas con mucho oleaje con capacidad de 100 kW y, así mismo, zonas más tranquilas con capacidad de 5 kW.

En la actualidad no existen grandes plantas de producción de este tipo de energías. El mayor establecimiento industrial del mundo que alimenta regularmente la red con energía eléctrica producida por las olas es la central undimotriz Mutriku (Energías Renovables, 2020). La planta está situada dentro del dique Abrigon del puerto de Mutriku. Una cámara de turbina con 16 unidades OWC (columna de agua oscilante) conforma el dispositivo. La planta de energía marina se construyó en España y tiene instalados 296 kW de potencia (Munguía, 2017). Otro proyecto en funcionamiento está ubicado en Escocia en la planta Limpet (basada en columna de agua oscilante); esta central fue inaugurada en 2011, es la más vieja del mundo y logró una generación de energía de 2 millones de kWh en febrero de 2022, lo que equivaldría al consumo de 600 viviendas de un municipio mediano de España (BBVA, 2022).

La energía undimotriz tiene varios mecanismos para captar energía. Uno de ellos es la columna de agua oscilante. Esta es utilizada donde el oleaje es fuerte. Funciona con unos postes (columnas) que conectan la boya en superficie con el pie en el suelo; a medida que las olas pasan el sistema hidráulico comprimen el agua alojada en la estructura, activando así el generador que produce energía eléctrica (Castellano *et al.*, 2022). Por otra parte, tenemos el atenuador de superficie, una tecnología comparable a la de las boyas de punto de absorción, donde los segmentos flotantes conectados se disponen perpendiculares a las olas entrantes. Las olas hacen que las bombas hidráulicas que producen electricidad giren. Finalmente, el columpio de olas de Arquímedes consiste en una estructura estacionaria y una estructura móvil. Se utiliza hormigón para anclar la estación al fondo marino que se encuentra

a una profundidad que varía entre 40 y 100 metros. La estructura flotante (móvil) se llena de aire y se balancea verticalmente con las olas, el aire del flotador se comprime y las presiones se equilibran como resultado del movimiento que se crea entre las partes fijas y móviles. La energía mecánica se convierte en energía eléctrica con la ayuda del sistema hidráulico y el motor-generador (Mendoza y Viteri, 2013).

Las olas no pierden energía por trasladarse largas distancias; son un recurso abundante y pueden ser una fuente importante en la producción de energía; pueden suministrar energía a zonas costeras remotas. Se trata de una energía constante y predecible y que cuida el medio ambiente, ya que no produce gases contaminantes de manera directa (Rodríguez y Campuzano, 2017). Los dispositivos existentes de generación de energía undimotriz pueden variar en tamaño y peso. Además, la maquinaria utilizada para la generación de energía undimotriz se compone de varios elementos, como sistemas de anclaje, flotadores, dispositivos de absorción de energía y generadores eléctricos. No obstante, esta infraestructura aún necesita mayor desarrollo tecnológico, ya que al ser sometidos a condiciones muy adversas, como huracanes, efecto corrosivo del agua salada, vegetación marina que crece sobre estos dispositivos, sufren daños en muy corto tiempo reduciendo el tiempo de vida y la producción de energía, lo cual puede hacer fracasar los proyectos (Peralta *et al.*, 2019).

Una evaluación del potencial undimotriz de una región debe considerar una serie de condiciones ambientales y parámetros. Por ejemplo, las características del oleaje permiten determinar si la zona cuenta con un régimen de oleaje constante y consistente; para eso se revisan características como la altura, la frecuencia y la dirección de las olas. La profundidad del agua es otro parámetro importante en la efectividad de la generación de energía undimotriz. En general, las aguas más profundas permiten la propagación de olas más grandes y consistentes, lo que mejora la capacidad de generación de energía. El diseño y ubicación de los dispositivos de generación de energía son determinantes para su efectividad, la resistencia al impacto de las olas, la eficiencia de conversión de energía y la instalación en áreas con buenas condiciones de oleaje. El mantenimiento y la resistencia a la corrosión permiten la durabilidad del proyecto y los cierres financieros a largo plazo. Puesto que las instalaciones de energía undimotriz están expuestas a un ambiente marino agresivo, tienden a salir de actividad antes de lo pre-

visto, lo que genera sobrecostos y disminución de la energía generada. La infraestructura de conexión a la red permite aprovechar al máximo la energía undimotriz y evitar desperdicio de energía; esto implica la instalación de cables submarinos y la integración eficiente con el sistema de distribución eléctrica existente (Perdomo *et al.*, 2018).

## Capacidad de generación de energía undimotriz

Colombia cuenta con una extensa línea costera, lo que brinda potencial para la generación de energía undimotriz. Como lo mencionan González *et al.* (2015), la energía undimotriz en Colombia está influenciada principalmente por el régimen de vientos alisios, que genera oleaje consistente y significativo a lo largo del año. Guerra *et al.* (2018) analizaron el potencial undimotriz en la región del Pacífico colombiano. Según sus resultados, esta zona presenta condiciones favorables para la generación de energía undimotriz, con una altura significativa de las olas y un alto potencial de energía. Se destaca también que las áreas más prometedoras se encuentran cerca de las desembocaduras de los ríos y en las zonas donde se produce el encuentro de corrientes marinas. Por otro lado, Salcedo *et al.* (2020) evaluaron el potencial undimotriz en la costa Caribe colombiana. Según sus hallazgos, esta región también presenta un potencial considerable para la generación de energía undimotriz, especialmente en las áreas donde se producen cambios abruptos en la profundidad del mar y en las cercanías de las islas.

La cantidad de energía eléctrica que puede producir un sistema undimotriz depende de varios factores, como la altura de las olas, el diámetro del flotador, la eficiencia de los equipos de conversión de energía y el tiempo de operación. Hagamos un ejemplo con las condiciones en Colombia para evaluar la capacidad de generación (véase la tabla 14).

Primero necesitamos determinar la potencia que un sistema undimotriz podría generar. La potencia ( $P$ ) se puede calcular por medio de la siguiente fórmula:

$$P = 0.5 * \rho * g * A * H^2 * C$$

Donde:

$\rho$  = densidad del agua 1000 kg/m<sup>3</sup> (aproximado)

$g$  = aceleración debida a la gravedad =  $9,81 \text{ m/s}^2$

$A$  = área efectiva de captura de las olas (área proyectada del flotador)  
 $= \pi * (r)^2$

$H$  = altura significativa de las olas

$C$  = coeficiente de eficiencia del sistema (generalmente en el rango de 0,1 a 0,4)

Planteemos los siguientes datos:

Un coeficiente de eficiencia del sistema ( $C$ ) del 30 %; un flotador con radio de 3 metros para calcular el área ( $A$ ), el cual es un equipo relativamente grande. La altura del oleaje en el Caribe colombiano varía entre 0,5 y 3 metros (Dagua, 2019), aunque en el Pacífico es más pequeño, hasta 1,5 metros. Para este ejercicio tomaremos el valor más alto para hacerlo más optimista (3 metros), y adicionalmente los valores ya estándar de la densidad del agua y la gravedad. Con esto tenemos:

$$A = \pi * (3)^2 = 28,27\text{m}^2$$

$$A = \pi * (3)^2 = 28,27\text{m}^2$$

$$P = 0,5 * 1000 * 9,81 * 28,27 * 3^2 * 0,3$$

$$P = 374393,7 \text{ w}$$

$$P = 374,4 \text{ Kw}$$

Ahora vamos a calcular su capacidad de generación de energía diaria ( $E$ ); para esto supondremos que el equipo funciona 24 horas al día. Entonces tenemos:

$$E = P * 24\text{hr}$$

$$E = 374,4 * 24\text{hr}$$

$$E = 8,9 \text{ MWh/día}$$

Por lo tanto, con los supuestos mencionados, un sistema undimotriz con una altura de ola de 3 metros, un diámetro de flotador de 3 metros y que trabaje durante las 24 horas de manera consecutiva podría producir aproximadamente 8,9 MWh/día. Es importante tener en cuenta

que esta cifra es solo una estimación optimista y que la producción real de energía podría variar significativamente en función de las condiciones reales del mar y la eficiencia del sistema.

## **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía undimotriz**

Colombia hoy día no produce energía undimotriz; sin embargo, es válido proponer escenarios hipotéticos. Para determinar la cantidad de sistemas undimotrices necesarios para suplir la demanda energética eléctrica en el país tomamos como referencia los datos calculados anteriormente; además, debemos proyectar el consumo eléctrico nacional que para el 2022 fue de 76.000 GWh-año, lo que es igual a 208 GWh-día. La tabla 14 muestra la cantidad de sistemas necesarios para abastecer el sector eléctrico del país mediante energía undimotriz.

**Tabla 14. Datos de referencia para suplir la demanda energética eléctrica del país**

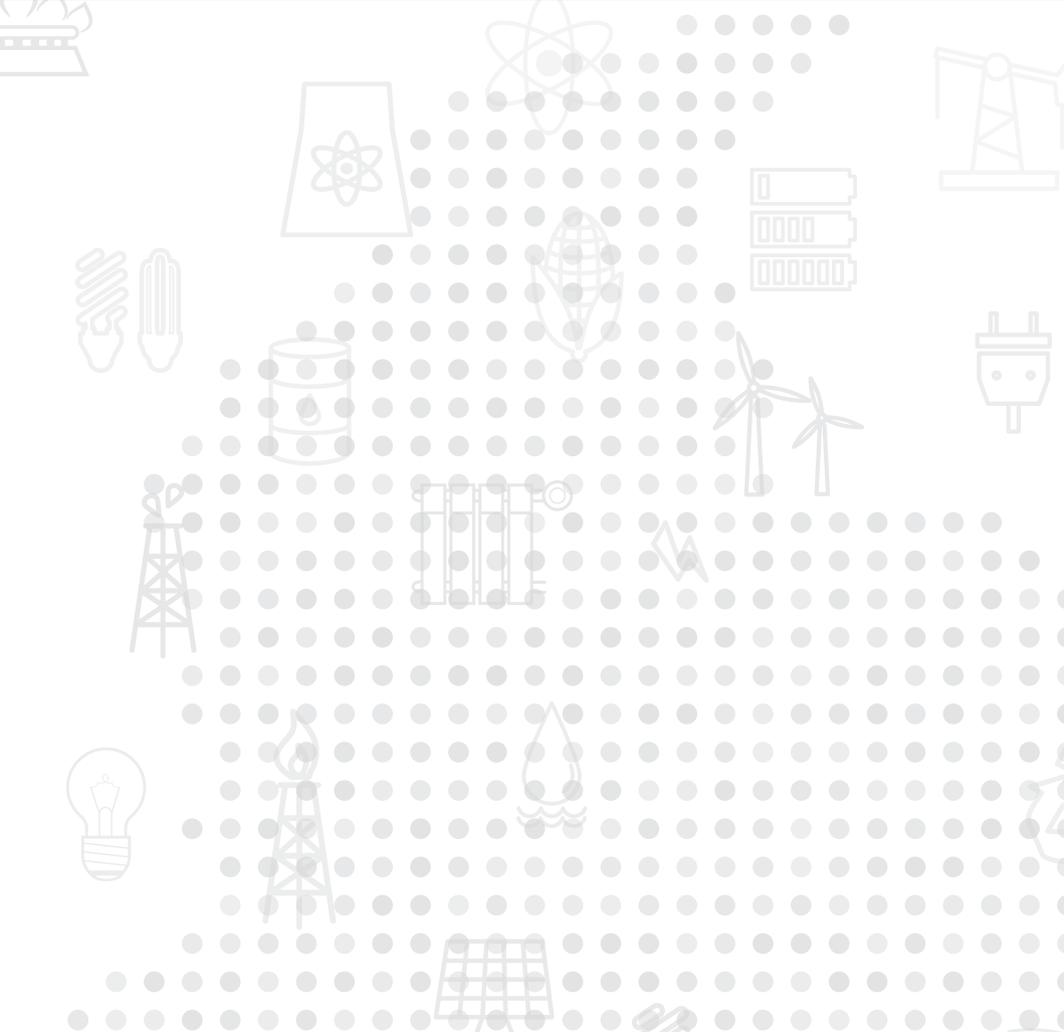
Tamaño del flotador (metros)	Altura de las olas (Metros)	Eficiencia %	Capacidad de generación (MWh-día)	Sistemas undimotrices para suplir la demanda energética en Colombia de 208 GWh-día
3	3	30 %	8,9	23.371

*Nota. Elaboración propia.*

Es importante tener en cuenta que la cantidad de sistemas necesarios para suplir la demanda energética de Colombia es solo una estimación y no tiene en cuenta otros factores importantes, como la capacidad de almacenamiento de energía y la capacidad de transporte y distribución de energía eléctrica en el país. Además, los datos utilizados son solo un estimado y pueden variar según las condiciones específicas de cada proyecto de generación de energía undimotriz; sin embargo, es una aproximación importante que nos permite empezar a evaluar nuevas posibilidades energéticas para Colombia.



# Energía a base de carbón





Una de las fuentes de energía más importantes en el desarrollo de la vida moderna es el carbón. Está anclado a nivel mundial en varios sectores productivos, como la generación de energía, la producción de acero, cemento, fertilizantes y la producción de combustibles líquidos. En 2022 se consumieron alrededor de 6.100 millones de toneladas de hulla y alrededor de 1 billón de toneladas de lignito en todo el mundo. Desde 2000, el consumo mundial de carbón ha aumentado de manera acelerada. Los principales consumidores de carbón son China, Estados Unidos, India, Rusia y Japón, con el 77 % del total mundial. El carbón se considera seguro, confiable, fácil de almacenar y disponible, y su disponibilidad en el futuro previsible está asegurada por las vastas reservas mundiales de petróleo y gas natural (Drummond Co., 2023).

El carbón se utiliza principalmente como un combustible doméstico e industrial, como agente reductor en la siderurgia y como combustible en la generación de energía en centrales termoeléctricas. También es usado para sintetizar aspirinas, producir cerveza, fabricar combustible, cultivo de algas como fuente renovable, apagar incendios, conservar las ensaladas, etc. El carbón se usa de manera predominante en las plantas termoeléctricas para la generación de energía eléctrica o como combustible directamente en industrias con altos consumos energéticos, como la fabricación de cemento y ladrillos, debido a su bajo costo y eficiencia (SGK-Planet, 2021). Por ejemplo, Estados Unidos utiliza aproximadamente el 91,8 % de su producción de carbón para generar energía eléctrica, lo que equivale a 540 mil millones de toneladas anuales (WET, 2021).

## Generalidades del carbón

La formación de carbón mineral requiere largos periodos debido a que los procesos de depositación, descomposición y preservación de la materia orgánica son sustancialmente lentos. Este proceso se da principalmente en zonas planas (de baja profundidad), zonas de inundación como complejos cenagosos, pantanos, lagos, donde el flujo de agua sea lento. Así, la materia orgánica sufre descomposición, al mismo tiempo que se va enterrando por más carga de sedimentos que se va depositando; esto genera un aumento en la presión y la temperatura en los sedimentos, que se transforman lentamente en una roca sedimentaria, la cual tiene características energéticas importantes y permite utilizarlo como combustible fósil (Álvarez, 2022).

Por otra parte, la extracción de carbón tiene importantes retos tecnológicos que dependen del tipo de minado. La minería a cielo abierto se utiliza preferiblemente cuando los mantos de carbón se encuentran generalmente a menos de 60 metros de profundidad, donde se retiran las capas de roca y suelo para exponer el carbón y así poder extraerlo. La minería subterránea se emplea cuando los depósitos de carbón se encuentran a cientos de metros debajo de la superficie. En este caso, se construyen túneles y se utilizan elevadores y cintas transportadoras para extraer el carbón, así como para el traslado del personal. Sin embargo, hacer minería a cielo abierto o subterránea también dependerá de criterios ambientales y de las regulaciones propias de cada país.

Un punto interesante de abordar en la producción de materias primas no renovables como el carbón es el análisis basado en la regla de Hotelling. Este modelo ha sido ampliamente utilizado como marco de referencia en numerosos estudios que exploran cómo la sociedad enfrentará los crecientes desafíos asociados con el agotamiento de los recursos no renovables (Franco, Gallo y Franco, 2010). Tal modelo intenta responder cómo se debería plantear la tasa de extracción de un recurso natural y la variación de los precios de este. No obstante, hoy constituye la piedra angular de la economía de los recursos naturales, puesto que los minerales, aunque sean no renovables, continúan variando sus precios de acuerdo a la oferta y la demanda mundiales.

La energía producida a partir de combustibles fósiles, especialmente el carbón, ha sido una fuente importante desde la revolución indus-

trial. Según la IEA (2021), en 2020 el 66 % de la electricidad mundial se produjo a partir de combustibles fósiles, como carbón, gas y petróleo. El carbón, en particular, sigue siendo la fuente principal de producción de electricidad en muchos países desarrollados o subdesarrollados, donde se utiliza para producir electricidad y calor para los hogares, las empresas y las industrias.

La importancia del carbón en la producción de energía no opaca algunos efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana. La quema de carbón emitió alrededor de 14,7 gigatoneladas de dióxido de carbono en 2016, lo que representa cerca del 40 % de las emisiones totales a escala mundial (Stoeckl y King, 2019). Además, la quema de carbón también libera otros contaminantes del aire, como el dióxido de azufre, el óxido de nitrógeno y material particulado, que pueden afectar la salud de la población.

A pesar de lo anterior, no todo es negativo para el carbón. El principal problema del uso de este son sus emisiones; de allí que se han evaluado tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) para hacer el proceso inverso a la extracción de petróleo y gas, es decir, no extraerlo sino inyectar CO<sub>2</sub> al subsuelo donde anteriormente se encontraban estos hidrocarburos. Esto puede ayudar a minimizar las emisiones de la producción de energía a partir de carbón, lo que permitiría, según la IEA (2018), reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera hasta en un 90 %.

El carbón es un combustible fósil abundante, geográficamente bien distribuido, es seguro, fiable en su suministro y económicamente competitivo, aunque su quema libera gases contaminantes. El carbón sigue siendo necesario para cubrir la demanda energética y, aunque existen otras fuentes de energía, seguirá siendo una opción viable durante las próximas décadas (Junta de Castilla y León, 2020).

También hay ventajas tecnológicas asociadas con la energía fósil basada en carbono. Jacobson (2011) hace referencia a la facilidad logística que dan las fuentes fósiles; por ejemplo, el transporte y almacenamiento, la versatilidad de usos, desde la generación de electricidad hasta el transporte y la calefacción; además, ha sido fundamental para el avance de la ciencia y la tecnología. Al respecto, Smil (2017) mencio-

na que, sin la energía fósil, la investigación científica y la innovación tecnológica que hemos visto en los últimos dos siglos no habría sido posible.

## **Capacidad de generación de energía a partir del carbón**

Rendimientos energéticos promedio de diferentes tipos de carbón en una planta de energía (IEA, 2019):

- Carbón antracita: alrededor de 7.500 kilovatios-hora (kWh) por tonelada.
- Carbón bituminoso: alrededor de 7.000 kilovatios-hora (kWh) por tonelada.
- Carbón sub-bituminoso: alrededor de 6.000 kWh por tonelada.
- Carbón lignito: alrededor de 4.500 kWh por tonelada.
- Turba: alrededor de 2.000 kWh por tonelada. (IEA, 2019)

## **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % del carbón**

La capacidad de energía eléctrica en Colombia varía en función de la demanda y la oferta energética en el país. En 2021 la capacidad instalada de generación de energía eléctrica en Colombia fue de aproximadamente 20.800 megavatios (Minenergía, 2021). Sin embargo, la cantidad de energía eléctrica que se genera diariamente en Colombia varía en función de la demanda y de la disponibilidad de los recursos energéticos en cada momento.

En el país, la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles como el carbón no es predominante y ocupa una porción pequeña de la matriz nacional. La capacidad de generación de electricidad de una tonelada de carbón en una central termoeléctrica en

Colombia depende de varios factores, como la eficiencia de la planta generadora, la calidad del carbón y las condiciones de operación. Según Enerdata (2023), la generación total de energía eléctrica en el país fue de 76.000 GWh-año. Ahora bien, revisemos el escenario en el cual toda la energía eléctrica del país sea suministrada a partir del carbón:

$$\text{Demanda eléctrica nacional} = 76.000 \text{ GWh} / 365 \text{ días} = 208 \text{ GWh-día}$$

Necesitaríamos producir 208 GWh diariamente para suministrar toda la energía eléctrica en Colombia mediante termoeléctricas a base de carbón. En ese sentido, calculamos la cantidad de carbón (dependiendo del tipo de carbón que usemos) necesario al día en toneladas para producir la electricidad que demanda el país (tabla 15).

**Tabla 15. Consumo de carbón para abastecer la demanda eléctrica total del país según tipo de carbón**

Demanda de energía eléctrica	Toneladas de carbón necesarias según el tipo de carbón				
	Turba	Lignito	Sub-bituminoso	Bituminoso	Antracítico
208	100.000	66.700	50.000	33.400	26.700

*Nota. Elaboración propia.*

El poder calorífico de la turba es mucho más bajo que el del carbón antracítico; de allí que se requiere mayor cantidad de turba para producir la misma cantidad de energía. Sin embargo, la cifra de consumo diario de carbón, sea antracítico o bituminoso, no es nada despreciable, ya que, comparada con la producción total de carbón del país, podría ser cercana al 15 %.







**D**esde finales del siglo XIX, la biomasa se ha convertido en la principal fuente de energía en todo el mundo y, aunque su consumo final ha disminuido, aun en la actualidad se emplea en un alto grado. Es así que las estadísticas actuales muestran un consumo de biomasa en todo el mundo de cerca de 1.112 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtpe) (Valverde *et al.*, 2020). En este sentido, la biomasa puede verse como una alternativa energética útil para la generación de calor, combustible y electricidad, la cual puede ser un producto directo o indirecto de los organismos vivos. La biomasa puede ser empleada para generar diferentes tipos de energía; se puede quemar directamente para generar calor o pueden usarse los gases de combustión generados durante la quema de biomasa para la generación de energía eléctrica, térmica o calor.

## Generalidades de la biomasa

La biomasa se puede catalogar en tres tipos principales, los cuales, según Bohórquez (2022), se denominan como biomasa natural, residual y energética. Las definiciones de los tipos de biomasa se explican a continuación.

**Biomasa natural:** este tipo abarca todo ser que adquiere y utiliza la energía proveniente del sol directa o indirectamente para subsistir en el planeta Tierra; se subdivide en biomasa primaria: conformada por la vegetación, o “seres autótrofos” tales como árboles, helechos, algas, etc.; biomasa secundaria: en concordancia con las especies consumidoras de primer orden que se alimentan de materia orgánica ya hecha, tales como animales carnívoros, organismos, carroñeros, etc., y biomasa terciaria: conformada por los animales en estado de putrefacción y de otros seres vivos que se alimentan de ellos.

**Biomasa residual:** conformada por todos y cada uno de los desechos degradables que produce la biomasa natural, cuya fuente puede ser de origen urbano (orina, cartón, residuos de comida, papel, etc.); forestal (residuos de industrias maderables y forestales, etc.); agrícola (cáscaras, semillas, bagazos, residuos leñosos, etc.), entre otros.

**Biomasa energética:** este grupo está basado en las siembras específicas para la generación de combustible y no para el empleo humano: entre estas se tienen cultivos de maíz, caña de azúcar, semillas ricas en aceites y plantas para la fermentación de etanol (Altamirano *et al.*, 2015).

En relación con lo anterior, Mackinson (2022) refiere que la biomasa como fuente de energía es factible, que escasamente contamina al medio ambiente, por lo que beneficia y mejora la propiedad del aire y ayuda a mitigar los efectos del cambio climático; aunque sí expone dióxido de carbono (C) a la atmósfera, los niveles de emisiones son mínimos. Además, es una fuente de energía renovable y muy cuantiosa.

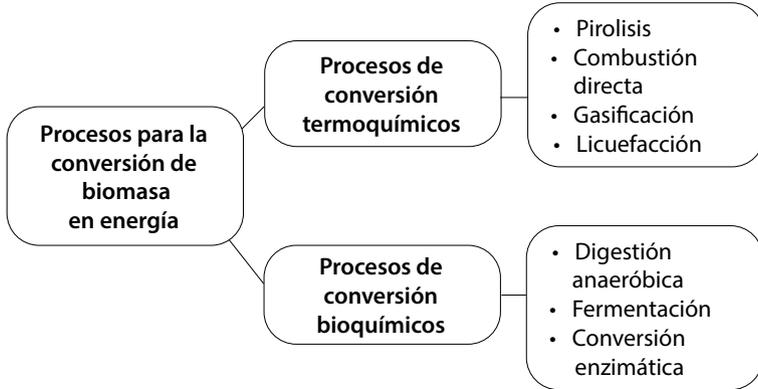
La biomasa como tal es muy baja en términos de densidad energética, pero es posible transformarla en combustibles como carbón vegetal, metanol, etanol, hidrógeno, metano, gas de síntesis, biogás, entre otros, con mayor densidad energética. Para esto es necesario someter el material bioenergético a distintos procesos fundamentados en disciplinas como termodinámica, química, biología, entre otras (Baskar *et al.*, 2012). En la figura 1 se ilustran algunos procesos termoquímicos y bioquímicos empleados para el proceso de generación de diferentes tipos de energía con biomasa.

Existen diferentes procesos demarcados para la generación de energía a partir de implementación de biomasa como fuente de energía; entre ellos tenemos:

- **Combustión directa:** la biomasa es quemada en un proceso de calderas de las que se beneficia el calor producido para generar energía eléctrica. Su capacidad energética no es esencial, pero sí es la más rentable económicamente (Freitas *et al.*, 2023).
- **Gasificación:** convierte la biomasa sólida en gaseosa para beneficiarse como biocombustible (Montiel-Bohórquez *et al.*, 2021).

- Digestión anaerobia: en este proceso se benefician las bacterias con el propósito de convertir el material vegetal en biocombustibles.
- Fermentación: se utilizan materias primas ricas en carbohidratos con el fin de producir bioetanol o biodiésel (Espino-García *et al.*, 2023).

**Figura 1. Procesos termoquímicos y bioquímicos para la transformación de biomasa en energía**



*Nota. Adaptado del trabajo de Baskar et al. (2012).*

La gran diversidad de biomasa incorporadas al incremento de varias tecnologías de transformación de aquellas en energía (combustión directa, pirolisis, gasificación, fermentación y digestión anaeróbica) plantean una gran diversidad de distintas aplicaciones posibles, entre ellas, la generación de energía térmica, eléctrica, biocombustibles y gases combustibles (Altamirano *et al.*, 2015). En este contexto, la biomasa supone un 10 % de suministro de energía primaria.

La biomasa (natural y residual) funciona como generador de energía térmica; así mismo, es posible quemar el biogás originario de la digestión anaerobia del residuo líquido o el gas de síntesis producido en el proceso de la gasificación. Todos estos sistemas de combustión directa son aplicaciones para la generación de calor (Herguedas *et al.*, 2012). Por otra parte, la biomasa residual (residuos de cosecha y poda) también es importante en la producción de electricidad, especialmente de cultivos energéticos leñosos. También es útil el biogás consecuencia de la fermentación de algunos residuos para la generación de elec-

tricidad. Esta generación precisa de sistemas no convencionales debido al bajo al poder calorífico de la biomasa que oscila entre 25.000 y 10.000 kcal/kg, según sea su tipo, debido al alto porcentaje de humedad y gran contenido de volátiles. Para esto se requieren centrales eléctricas especiales con grandes calderas. En relación con el tipo y la cantidad de biomasa utilizable, esto conllevaría modificar la tecnología que se emplea para este fin (Herguedas *et al.*, 2012).

La producción de biocombustibles es otro factor relevante en la biomasa. Se distingue entre la generación de biocarburantes predestinados a su utilización en vehículos de motor diésel y los destinados a los vehículos con motores de encendido provocado. Los primeros se derivan de cultivos o especies vegetales oleaginosas (girasol, colza y cacahuates) y remplazan al diésel tradicional, y los segundos se obtienen de cultivos o especies vegetales abundantes en azúcares (remolacha, caña de azúcar, maíz, trigo) y sustituyen a las gasolinas. Finalmente, también se pueden producir gases combustibles, aunque es un procedimiento mucho menos utilizado. Este proceso consiste en la descomposición de la biomasa en un digestor para alcanzar un gas, cuyo componente es fundamentalmente metano, pero también consta de nitrógeno, vapor de agua y compuestos orgánicos. El proceso es apropiado para tratar biomasa de excelso contenido de humedad; el gas derivado es de bajo poder calorífico y útil en aplicaciones térmicas, pues abastece de energía lumínica o calor (Herguedas *et al.*, 2012).

## **Capacidad de generación de energía a partir de la biomasa**

La biomasa puede ser aprovechada como combustible para la generación de energía; esta representa cerca del 17 % de las fuentes disponibles para generar energía en Colombia (Coelho-da-Costa *et al.*, 2022).

Según lo exponen Saxena *et al.* (2022), aprovechar la biomasa en Colombia para la generación de energía puede constituir una variedad de ventajas para el país, como:

- Poseer unas fuentes de energías renovables inagotables que mitiguen la contaminación y no afectan la capa de ozono.

- Cultivar tierras obsoletas para mitigar o prevenir la erosión y consecuentemente la degradación de los suelos.
- Acceder al aprovechamiento de residuos industriales.
- Promover nuevas fuentes de desarrollo y de trabajo en zonas rurales.
- Reducir el costo de la energía hasta 4 veces.
- Impulsar la transformación de las ciudades hacia la sostenibilidad.

En términos generales, los rendimientos energéticos de la biomasa sólida, líquida y gaseosa en una planta de energía serían los siguientes (tabla 16).

**Tabla 16. Poder calorífico de diferentes tipos de biomasa según la tecnología de transformación energética**

Biomasa	Tipo de tecnología	PCPromedio	Autores
Sólida	Combustión directa Leña/briqueta/ <i>pellet</i>	18.176 kJ/kg	(Fernández, 2003; Álvarez <i>et al.</i> , 2013)
	Gasificación SynGas	5.100 kJ/m <sup>3</sup> N	(Estrada y Meneses, 2004)
Líquida	Biodiésel	39.000 kJ/kg	(Pérez <i>et al.</i> , 2011; Díaz y Guerrero, 2018)
	Bioetanol	15.000 kJ/kg	(Ventura <i>et al.</i> , 2017)
Gas	Biogás	21.300 kJ/m <sup>3</sup> N	(Muñoz <i>et al.</i> , 2014)

*Nota.* Elaboración propia con base en los datos aportados por los autores referidos en la tabla.

## Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de biomasa

Con base en la información de la cantidad de energía que puede ofrecer cada tipo de combustible de origen biomásico, se determinan las cantidades requeridas para abastecer la demanda nacional, la cual ha

sido calculada en 208 GWh/día; se podrían estimar las cantidades de combustible proveniente de la biomasa para estos fines, tal como se muestra en la tabla 17.

**Tabla 17. Producción de energía a partir de biomasa para sustitución hipotética de la energía eléctrica del país con base en diferentes tecnologías**

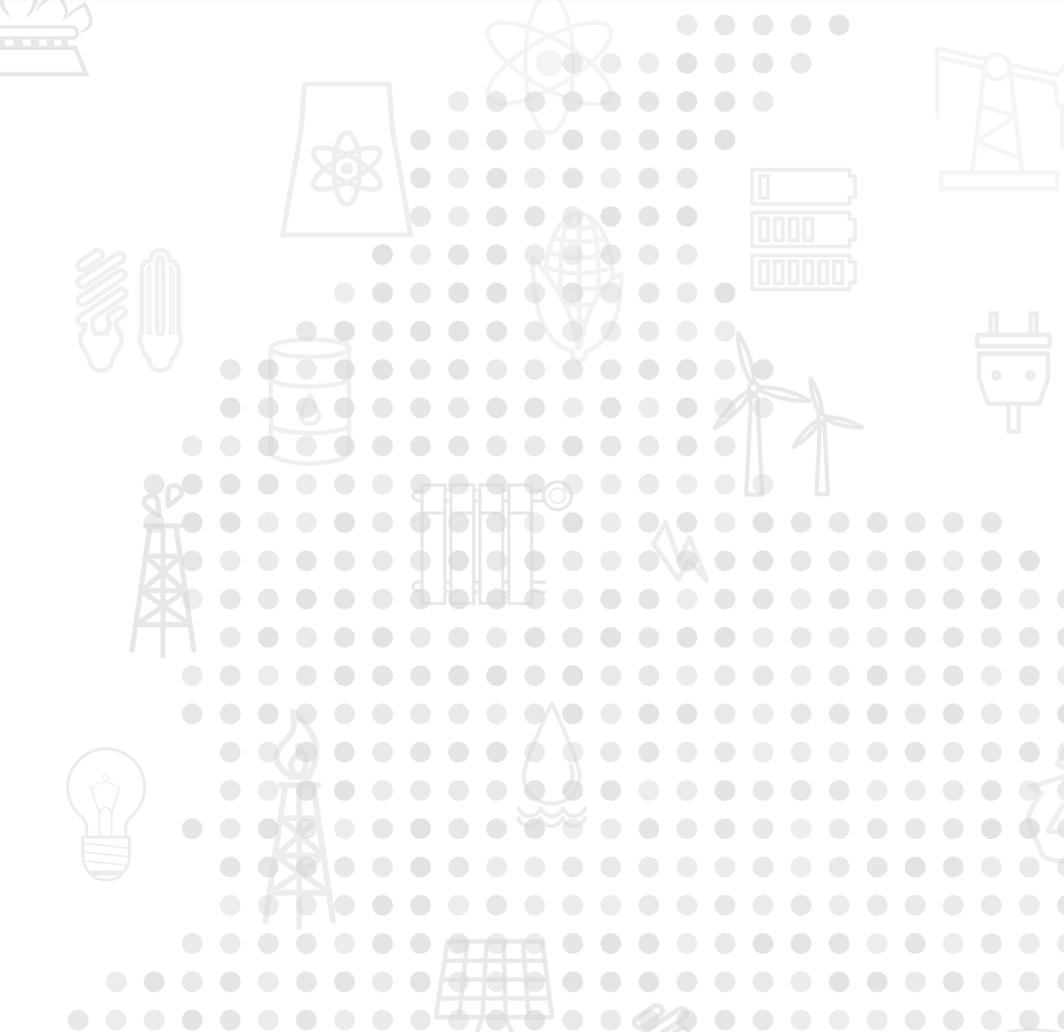
Biomasa	Tipo de tecnología	Producción diaria ( $\eta=100\%$ )	Producción diaria ( $\eta=40\%$ )
Sólida	Combustión directa Leña/briqueta/ <i>pellet</i>	41.197.183,1 kg	102.992.958 kg
	Gasificación SynGas	146.823.529,4 m <sup>3</sup> N	367.058.824 m <sup>3</sup> N
Líquida	Biodiésel	19.200.000 kg	48.000.000 kg
	Bioetanol	49.920.000 kg	124.800.000 kg
Gas	Biogás	35.154.929,58 m <sup>3</sup> N	87.887.324 m <sup>3</sup> N

*Nota. Elaboración propia.*

En la tabla 17 se muestran las necesidades diarias del combustible para abastecer el país, según dos opciones de eficiencia. En la del 100 % se asume que toda la energía del combustible es aprovechada, cosa que desde el punto de vista de las leyes de la termodinámica es imposible; por lo tanto, se relaciona una columna que establece una eficiencia del 40 %, que es una aproximación de la eficiencia de plantas térmicas para convertir el combustible en energía eléctrica o energía útil para las necesidades de un país. Con base en esta información se puede considerar que las necesidades de biomasa serían muy altas para convertir con la canasta energética del país, tal como se plantea actualmente.



# Energía a partir de biogás





**E**l biogás es un gas renovable procedente de diversos tipos de materias primas biológicas en descomposición, los cuales se integran en un mismo proceso para la producción de energía, lo que permite una economía circular: gestión de residuos y desarrollo sostenible (Secretaría de Estado de Energía, 2022).

Debido a lo anterior, el biogás es un combustible, caracterizado por ser de bajas emisiones en su producción, que puede ser utilizado para la generación de electricidad (Barasa y Akanni, 2022). Su producción por medio de la digestión anaerobia puede ser aplicada para el tratamiento de residuos biodegradables; es decir, sus aplicaciones pueden verse en generación de energía, refrigeración, transición energética sostenible, entre otros, a mediana y gran escala, cuyos principales beneficios son los bajos costos y el aprovechamiento de residuos que ya están en etapa de disposición final (Venegas, Raj y Pinto, 2019).

## **Generalidades de la energía producida a partir del biogás**

El biogás es producido mediante la fermentación de materia orgánica mediante un proceso denominado metanización, el cual, gracias a la ausencia de oxígeno y la función bacteriana o digestión anaerobia, produce biogás; su obtención se da por medio del almacenamiento de los residuos orgánicos (biomasa), los cuales pueden combinarse, es decir, se pueden utilizar residuos ganaderos y residuos orgánicos urbanos, para posteriormente dar paso a la fermentación, la cual se da al almacenar los residuos, al mantenerlos sin oxígeno y a una temperatura cerca de 40 °C, para finalmente transportar el gas obtenido e inyectar a una red de energía (Garrett, 2021). Además, tras constantes investigaciones, hoy en día el biogás tiene diferentes aplicaciones; sin embargo, suele utilizarse principalmente como gas natural para la producción de energía eléctrica y para la producción de abonos o fertilizantes naturales (Arriols, 2018).

El principal equipo usado en la producción de biogás son los biodigestores, los cuales traen consigo diversos beneficios para el desarrollo del biogás, debido a que, gracias a la ausencia de oxígeno, se llevan a cabo de una mejor forma las etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Suárez *et al.*, 2021). La hidrólisis es el proceso en el cual se liberan las moléculas provenientes del material orgánico (lípidos, proteínas y carbohidratos), para dar paso a la producción de biocombustibles; usualmente es utilizado para el tratamiento de aguas residuales y genera lodos residuales que pueden utilizarse como fertilizantes para el suelo (Hale, 2021). En el proceso de acidogénesis o fermentación las bacterias convierten las moléculas de materia orgánica en ácidos carboxílicos (ácidos acéticos, propanoico y butanoico) y así forman alcoholes, amoniaco, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico e hidrógeno (Bennardi, 2019). El proceso de acetogénesis consiste en que los microorganismos consumen los productos resultantes de la fase anterior; sin embargo, se puede dar el caso en que algunos productos no puedan ser convertidos directamente en metano; por ende, son convertidos en sustratos metanogénicos con el fin de que los microorganismos colaboren con el siguiente grupo formador de metano (Parra, 2015). Finalmente, la fase de metanogénesis es el proceso mediante el cual se da la descomposición de la materia orgánica, es decir, donde los microorganismos forman el metano a partir de átomos de carbono (Reyes, 2017).

La energía generada con biogás aporta a la economía circular y el desarrollo sostenible (Rotoplast, 2020), gracias a que el biogás es obtenido a partir de la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos, es decir, por la ausencia de oxígeno (Naturgas, 2021). Es un gas compuesto por metano, dióxido de carbono e impurezas como sulfuro de hidrógeno y amoniaco; sin embargo, para que sea considerado como combustible, debe contener mínimo 45 % de metano (Castro *et al.*, 2020).

El proceso de obtención de biogás se considera económico y eficiente, debido a que utiliza residuos orgánicos, sustratos, aguas residuales, entre otros desechos, lo cual permite que también sea una alternativa para la gestión ambiental por contribuir al tratamiento de residuos y a su vez a la producción de energía (Mamani *et al.*, 2021), teniendo en cuenta la creciente generación de residuos orgánicos provenientes de actividades urbanas, ganaderas, agrícolas e industriales, los cuales emiten gases de efecto invernadero como metano, óxido nitroso y

amoniaco, principalmente, y contribuyen al calentamiento global y el deterioro de ecosistemas (Huahualuque y Moya, 2020). Es indispensable, entonces, generar actividades o mecanismos de aprovechamiento para estos desechos de biomasa.

Por otra parte, la producción de biogás actúa como una alternativa para el tratamiento de residuos sólidos, con el fin de reducir cargas contaminantes en los rellenos sanitarios y, a su vez, los residuos líquidos pueden utilizarse como abono genérico para el suelo (Del Amo, 2021), debido a que el desarrollo tecnológico de los biodigestores es considerado como una forma para cerrar el ciclo de los desechos orgánicos y los dispone para otro fin: la generación de energía; no obstante, el rendimiento energético depende de la materia prima que se utilice y la operación que se realice para la producción de energía (Rincón y Castiblanco, 2021).

Así mismo, Barón y Contreras (2020) mencionan que la Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos estableció que uno de los tipos de bioenergía más usados y rentables es el biogás, obtenido mediante la digestión anaerobia que funciona al degradar desechos orgánicos en un ambiente con ausencia de oxígeno.

## **Capacidad de generación de energía a partir del biogás**

La generación de energía a partir de biogás cuenta con una gran ventaja, debido a que se puede obtener mediante la descomposición de cualquier tipo de materia orgánica, es decir, con desechos, residuos o basura urbana, agrícola, industrial, entre otros (Arriols, 2018). Así mismo, Barrero (2016) menciona que  $1\text{m}^3$  de biogás equivale aproximadamente a  $0,65\text{m}^3$  de gas natural y puede llegar a producir 2,1 kWh de electricidad. La producción de biogás se relaciona directamente con factores como la carga orgánica, el tiempo de retención hidráulica (TRH), relación carbono-nitrógeno, tasa de crecimiento de microorganismos, pH, amonio y temperatura (Suárez, López y Álvarez, 2019).

Para el año 2020, la producción mundial de energía a partir de biogás fue de 400 TWh (teravatio-hora), de los cuales el 22 %, equivalente a 87 TWh, son producidos en China y más del 50 % son de países europeos;

sin embargo, aproximadamente solo el 10 % es apto para usarse como gas natural y el restante es usualmente utilizado por comunidades cercanas al sitio de producción (Raso, 2021). No obstante, se afirma que el aprovechamiento del potencial de residuos orgánicos puede cubrir el 20 % de la demanda mundial de gas y que las regiones con mayor capacidad de producción son Asia, seguida de América del Norte y del Sur, Europa y África (Rico, 2020).

Venegas, Raj y Pinto (2019) aseguran que, a escala mundial, la capacidad de producción de energía por medio de biomasa y el aprovechamiento de desechos orgánicos es de 100.879 MW, con Estados Unidos, Brasil, China y Alemania como principales potenciales. Adicionalmente, para el año 2020, China contaba con 102 plantas de producción de biogás a base de biomasa, Países Bajos con 44, Alemania con 32, EEUU con 15 proyectos y 3 en construcción, Canadá con 279 proyectos, Brasil con 62 plantas de biogás, Malasia con 85 proyectos en funcionamiento, Dinamarca con 67 plantas de biometano y Corea del Sur con 15 proyectos y 11 en construcción (Raso, 2021).

En Colombia, el 93 % de los residuos sólidos son llevados a los rellenos sanitarios, pero solo algunos pocos cuentan con digestores o plantas donde utilizan el biogás para generar energía; no obstante, en algunas zonas rurales del país se implementan proyectos de producción de biogás para uso propio (Acosta y Pascualino, 2014). La producción de biogás en Colombia se da principalmente en el sector agroindustrial, en el cual se logró identificar que el potencial de biomasa proviene de la caña de azúcar, con el aprovechamiento del bagazo en la producción de combustible para el funcionamiento de las calderas, y también de la palma de aceite, ya que con sus residuos se produce biogás mediante una digestión anaerobia, para la posterior generación de energía térmica o eléctrica; así mismo, de la porcicultura o avicultura, con la instalación de biodigestores para el aprovechamiento de residuos orgánicos, que les permiten generar electricidad para ser utilizada en sus procesos (Minambiente, 2021).

## Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía a partir de biogás

La demanda energética nacional en Colombia para el año 2022 se encontró en 76.000 GWh/año o 208 GWh/día. Entonces estimamos el volumen necesario para producir electricidad a partir de la combustión del biogás, teniendo en cuenta una capacidad de generación de energía de 2,1 KWh por cada metro cúbico de biogás (tabla 18).

**Tabla 18. Volumen de biogás necesario para suplir la demanda eléctrica nacional**

Volumen	Generación de energía
1 m <sup>3</sup>	2,1 KWh → 2,1×
99.047.619 m <sup>3</sup>	208 GWh/día

*Nota. Elaboración propia.*

Si Colombia supliera con biogás su necesidad eléctrica actual, requeriría producir 99 millones de metros cúbicos diariamente. Cabe aclarar que estos resultados muestran datos muy optimistas que no incluyen variables como la eficiencia de equipos, pérdidas, tipo de biomasa, etc.







**D**urante muchos años, los biocombustibles han estado presentes, incluso antes de los automóviles, pero, debido a la disponibilidad de gasolina y diésel económicos, se han mantenido en un segundo plano. Sin embargo, con el aumento de los precios del petróleo y los esfuerzos globales para paliar los efectos del cambio climático, la búsqueda de combustibles limpios y renovables se ha vuelto más urgente (NTG, 2023).

Los biocombustibles son derivados de la biomasa; esta abarca tanto plantas como animales y sus desechos metabólicos (Salinas y Gasca, 2009). La biomasa es la materia orgánica usada como fuente de energía, originada a partir de un proceso biológico, espontáneo y provocado, y el biodiésel es un combustible derivado de esta misma, utilizado para el uso en motores de combustión interna con ignición por compresión, no es tóxico y es biodegradable; además, es una fuente de energía de bajas emisiones (Fedebiocombustibles, 2023).

Los biocombustibles han demostrado ser altamente beneficiosos y ampliamente utilizados debido a su similitud con el diésel. El biodiésel ha sido utilizado durante más de 20 años en Europa, con resultados eficientes. Se ha utilizado en mezclas de hasta el 40 % con diésel comercial, y también se emplea para generar calor en la calefacción urbana, procesos industriales, generación de electricidad y como combustible en motores térmicos (Álvarez, 2013).

## **Generalidades de la energía basada en el biodiésel**

Varios estudios han indicado que el biodiésel reduce significativamente las emisiones en la atmósfera en comparación con otras fuentes combustibles. Debido a su naturaleza oxigenada, el biodiésel tiene una combustión más completa en comparación con el diésel, lo que mejora la composición de las emisiones (Llanes *et al.*, 2017). El uso del biodiésel en vehículos reduce las emisiones, y como tal ayuda a que se minimice la dependencia que hay hacia los combustibles fósiles. Una de las propiedades del biodiésel que lo diferencia de los combustibles

basados en hidrocarburos es que posee lubricantes en sus componentes, por lo que también ayuda a que el motor sufra menor desgaste y aumenta la vida útil de los automotores y demás maquinarias (Gil, 2017; Steinberg, 2023).

El biodiésel comparte muchas propiedades similares con el diésel de origen fósil, como la densidad, el número de cetanos y la eficiencia y rendimiento en motores diésel. Sin embargo, una característica destacada del biodiésel es que tiene un punto de inflamación superior al del diésel convencional (Steinberg, 2023). El número de cetanos es una propiedad de gran importancia para los combustibles diésel. Es un número que mide el punto en que el combustible se enciende bajo compresión, y esto es lo que queremos para un motor diésel. Cuanto mayor sea el número de cetanos, mayor será la facilidad de ignición (Toraman, 2022).

El biodiésel es una fuente potencial de energía alternativa que cumple los criterios de sostenibilidad o sustentabilidad porque es renovable y se produce a partir de recursos nacionales; además de ser biodegradable y no tóxico, también tiene un bajo impacto ambiental (Demirbas, 2008). Es un biocombustible líquido, propuesto como una alternativa para disminuir el uso del diésel de petróleo convencional (Castro, Beltrán y Ortiz, 2012).

El impacto ambiental y social de la producción y comercialización está relacionado con el aumento de deforestación de bosques nativos y la expansión indiscriminada de la frontera agrícola; estos impactos son más visibles en países subdesarrollados debido a su bajo control ambiental (Vargas *et al.*, 2021).

El principal desafío que enfrenta el biodiésel es su costo, el cual está influenciado por los elevados precios de las materias primas y los procesos requeridos para la extracción, pretratamiento y transesterificación de los aceites. Estos procesos varían según las características del tipo de aceite utilizado y la ubicación geográfica de la planta oleaginosa de la cual se obtiene (Díaz, 2012).

El biodiésel puede provenir tanto de aceites vegetales como animales. Las fuentes vegetales como el girasol, la colza, la jatrofa, el ricino

y el maní son conocidas por tener un alto contenido de aceite en sus granos, que puede variar entre el 40 % y el 64 %. Esta variación en el contenido de aceite es importante al considerar la eficiencia y el rendimiento por hectárea de estas materias primas para la producción de biodiésel (Moreira, 2012). Por otro lado, el sebo de vaca puede ser utilizado como materia prima en el proceso de transesterificación para producir biodiésel. Sin embargo, es importante destacar que ese sebo puede tener diferentes niveles de calidad, y los de baja calidad a menudo se utilizan en la formulación de alimentos para animales. La utilización de grasas animales en la producción de biodiésel surgió como una alternativa después de que se prohibiera su uso en la fabricación de piensos, lo que permitió su aprovechamiento como subproducto (Biodisol, 2008).

El biodiésel también se puede extraer de algas; por ejemplo, las microalgas cultivadas han demostrado ser una fuente prometedora para la producción de biodiésel, debido a su alto rendimiento en la acumulación de lípidos. La mayoría de las especies de microalgas conocidas almacenan ácidos grasos, triglicéridos y glicolípidos dentro de sus células. Sin embargo, el proceso de extracción de lípidos de las microalgas implica costos adicionales que afectan la rentabilidad de la producción de biodiésel a partir de este recurso (Castillo *et al.*, 2017). Otra forma interesante de producir biodiésel es a base de hongos; esta forma de producción facilita la obtención de biocombustibles. A diferencia del proceso convencional que requiere el procesamiento de cultivos mediante microorganismos, este hongo tiene la capacidad de aprovechar directamente la celulosa, que es el componente principal de las plantas y el papel, así como el azúcar. Esta característica es especialmente relevante, ya que los árboles, que son ricos en celulosa, contienen componentes de glucosa que son difíciles de obtener para la producción del alcohol, que es la base del combustible (Fernández, 2009).

En el año 2021, Estados Unidos se convirtió en el líder mundial en la producción de biocombustibles, con una producción diaria de alrededor de 645.000 barriles equivalentes de petróleo. Brasil ocupó el segundo lugar, seguido de Indonesia (Statista, 2023). Según CEPAL (2011), Brasil, Argentina y Colombia son los principales productores de bioetanol y biodiésel en América Latina. Sin embargo, antes de que los países inicien la producción de biocombustibles, es necesario que

los gobiernos realicen análisis exhaustivos para evaluar su potencial, así como identificar posibles impactos ambientales, sociales y su relación con la seguridad alimentaria.

## Capacidad de generación de energía a partir de biodiésel

En 2008 se implementó en Colombia el programa de mezcla de biodiésel con ACPM y se estimó una demanda diaria de biodiésel de aproximadamente 5.282 barriles (221.844 galones). Para el año 2011 se proyectó un aumento en la demanda diaria de biodiésel a 12.787 barriles (Chaverra y Mercado, 2011). Desde entonces, la producción de biodiésel en Colombia ha experimentado un incremento significativo, pasando de 23.000 toneladas a un total de 518.000 toneladas en 2014, lo que representa una producción anual de aproximadamente 160 millones de galones. La mayoría del territorio colombiano utiliza una mezcla de biodiésel y diésel convencional en proporción B10, mientras que en algunas áreas se emplea una mezcla B8 y en el departamento de La Guajira se utiliza una mezcla de biodiésel B0. Es importante destacar que en las zonas de frontera no se realiza la mezcla de biodiésel, según datos correspondientes a mayo de 2014 (Salcedo y Ruiz, 2016).

En el año 2022, Colombia consumió alrededor de 207 millones de galones de biodiésel producido a partir de aceite de palma. Esta adición en el mercado tuvo un reemplazo 1 a 1 con el diésel convencional producido por refinación del petróleo. El sector del transporte ha sido el más beneficiado, experimentó un incremento en el consumo, con un crecimiento cercano al 8 % en comparación con el año 2021. Esta tendencia muestra un firme compromiso hacia la transición energética justa en el país (Fedebiocombustibles, 2023).

La capacidad de generación de energía a partir de biodiésel varía dependiendo de la materia prima utilizada, el tipo de reactor y la tecnología de producción utilizada. Se encontró que la capacidad de generación de energía oscila entre 3,2 y 5,5 kWh por litro de biodiésel producido (Rojas, Chaparro y Ospina, 2011). En cuanto al tamaño y peso de los reactores utilizados, la mayoría de estos tienen un peso que oscila entre 25 y 150 kg, y una capacidad de producción que varía entre 10 y 200 litros de biodiésel por lote.

## **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía a partir de biodiésel**

Para realizar un análisis del número de reactores de procesamiento de biodiésel necesarios para satisfacer toda la demanda de energía eléctrica de Colombia, se deben considerar varios factores importantes, como la capacidad de generación de energía de un reactor de biodiésel, la cantidad de biodiésel que se puede producir a partir de una determinada cantidad de materia prima y el espacio que se requiere para la instalación de los reactores (Carreño, 2022).

Según la literatura científica, un reactor de procesamiento de biodiésel típico tiene una capacidad de producción de energía de alrededor de 1 MW. Para producir biodiésel a partir de aceite de palma, se necesitan aproximadamente 1,7 hectáreas de tierra por MW de capacidad de producción (Carreño, 2022). Colombia tiene una necesidad eléctrica de 208 GWh-día; por lo tanto, para producir esa cantidad de energía eléctrica a partir de biodiésel, se necesitan aproximadamente 353.600 hectáreas de tierra para la producción de este. Suponiendo, además, que se construyen reactores de biodiésel con una capacidad de producción de 1 MW cada uno, se necesitarán 208.000 reactores para producir 208 GW-día de energía eléctrica.

Es importante tener en cuenta que este cálculo es solo una estimación aproximada y se basa en supuestos simplificados. La capacidad de producción de energía y la cantidad de tierra requerida para la producción de biodiésel pueden variar dependiendo de la materia prima utilizada y las prácticas de producción empleadas (Carreño, 2022).







La fisión nuclear es una reacción en la que el núcleo de un átomo pesado se divide en dos o más núcleos de átomos más ligeros después de capturar un neutrón (CSN, 2023). Estos son los llamados productos de fisión, que emiten rayos gamma y grandes cantidades de energía cuando se producen los neutrones; es decir, tiene muchos protones en su núcleo, cuando choca con un neutrón se parte en otros dos núcleos, liberando una gran cantidad de energía y con dos o tres emisiones neutras. La reacción de fisión tiene tres consecuencias: la creación de productos radiactivos que aumentan la radiactividad natural, la liberación de una cantidad muy importante de energía, la liberación de neutrones, lo que permite conectar la reacción de fisión con otra, es decir, sucede una reacción en cadena.

La fisión nuclear fue descubierta en 1938 por Otto Hahn y Fritz Strassmann; también Lise Meitner y Otto Frisch contribuyeron a la comprensión de este fenómeno (Núñez, 2018). Este descubrimiento ha tenido importantes aplicaciones en la generación de energía, aunque también ha sido objeto de controversia debido a su potencial peligro. La fisión nuclear fue uno de los grandes acontecimientos del siglo XX, junto a avances como los computadores y la exploración del espacio exterior (Goldschmidt, 1987).

## Generalidades de la energía de fisión nuclear

La energía de fisión nuclear es una forma de producir electricidad por fisión de núcleos atómicos pesados como el uranio-235 o el plutonio-239. Durante este proceso se libera una gran cantidad de energía en forma de calor, que puede utilizarse para generar electricidad (Carreté, 2013). Este proceso tiene lugar en un reactor nuclear, donde los núcleos atómicos se dividen en dos fragmentos más pequeños mediante el bombardeo con neutrones. Estos neutrones liberados pueden chocar con otros núcleos y desencadenar nuevas reacciones de fisión, lo que crea una reacción en cadena. Para controlar esta reacción, se utilizan barras de control para absorber neutrones y ralentizar la reacción (CNEA, 2023).

La energía generada por la fisión nuclear es enorme. Por ejemplo, una tonelada de uranio-235 puede producir tanta energía como 3 millones de toneladas de carbón. Además, la energía nuclear no produce dióxido de carbono ni otros gases de efecto invernadero, por lo que es una fuente de energía limpia. La base para la producción de energía nuclear es el uranio-235, que se encuentra como mineral de uranio. Este mineral se extrae y enriquece para producir mayores cantidades de uranio-235, utilizado en los reactores para producir energía (MTERD, 2023). También se puede utilizar plutonio-239, que se produce a partir de uranio-238 en un reactor nuclear mediante el proceso de irradiación (Ambientum, 2022).

La mayor fuente de productos de fisión son los reactores nucleares. En los reactores nucleares actuales, los 3 litros de uranio contenidos en el combustible se convierten en productos de fisión como subproducto de la producción de electricidad. El uranio natural se utiliza como material para la fisión y el agua pesada para moderar neutrones y como refrigerante. Además, el material en el que tienen lugar las reacciones de fisión suele utilizar dióxido de uranio enriquecido, que también se utiliza como fuente de energía para apoyar la reacción en cadena (Foro Nuclear, 2010; Planas, 2009).

La fisión puede liberar hasta 200 millones de eV (electronvoltios), en comparación con la quema de carbón que produce solo unos pocos

eV. Este número permite entender por qué se usa la fisión nuclear para generar electricidad. La cantidad de energía liberada por masa también es mucho más eficiente que el carbón (CSN, 2023; Energyeducation, 2023).

Actualmente se encuentran operando 442 reactores en alrededor de 33 países, los cuales producen el 10,5 % de la electricidad mundial (IAEA, 2021). No obstante, esta parece ser una energía muy eficaz; es por ello por lo que se encuentran en construcción alrededor de 58 unidades en 20 países, todos conscientes de los desafíos energéticos y ambientales, porque consideran a esta fuente de energía esencial para el futuro energético (Foro Nuclear, 2023).

Finalmente, la fisión nuclear es una importante fuente de electricidad en todo el mundo. Su proceso de generación de energía es seguro y limpio y puede ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y los gases de efecto invernadero. Sin embargo, también presenta riesgos y desventajas, como la posibilidad de accidentes nucleares y la generación de residuos radiactivos. Por lo tanto, su uso debe ser cuidadosamente controlado y regulado. La energía nuclear por fisión es una tecnología que utiliza la fisión nuclear para generar energía eléctrica. En un reactor nuclear se utilizan elementos combustibles, como el uranio, para producir reacciones de fisión nuclear que generan calor. Este calor se utiliza para producir vapor, que a su vez hace girar las turbinas de una central eléctrica y genera electricidad. La energía nuclear por fisión es una fuente de energía de gran importancia en la actualidad, ya que tiene la capacidad de generar grandes cantidades de electricidad de manera continua y confiable, y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

## **Capacidad de generación de la energía de fisión nuclear**

Uno de los aspectos más importantes de los reactores nucleares es su tamaño y peso. Los reactores nucleares pueden ser clasificados en diferentes categorías según su capacidad de generación de energía. Los reactores de pequeña escala, también conocidos como pequeños reactores modulares (PRM), tienen una capacidad de generación de energía de hasta 300 MW. Los reactores de mediana escala tienen una

capacidad de generación de energía de entre 300 y 1000 MW, mientras que los reactores de gran escala tienen una capacidad de generación de energía de más de 1000 MW.

Los reactores modulares pequeños (SRM) tienen un peso y tamaño más reducido que los reactores de mediana y gran escala. Estos son generalmente alimentados por isótopos de uranio y plutonio, ya que son átomos muy pesados y contienen importantes cantidades de protones con carga positiva en el núcleo (Planas, 2009). Los SRM por ser modulares pueden ser diseñados para ser transportados por carretera, lo que facilita su instalación y movilidad.

La capacidad de generación de energía de un reactor nuclear es un aspecto crucial. Según OIEA (2021), los SRM tienen una capacidad de generación de energía de hasta 300 MW, lo que es suficiente para suministrar electricidad a comunidades pequeñas o medianas. Por otro lado, los reactores de mediana y gran escala tienen una capacidad de generación de energía más elevada, lo que los hace ideales para suministrar electricidad a grandes ciudades o industrias.

En términos de producción de energía eléctrica, los reactores nucleares pueden producir grandes cantidades de electricidad de manera continua. Según Foro Nuclear (2023), un reactor nuclear de 1000 MW puede producir alrededor de 8,7 millones de kWh de electricidad por día, lo que es suficiente para suministrar electricidad a más de 2 millones de hogares durante un año. Esta capacidad de generación de energía hace que los reactores nucleares sean una fuente de energía muy eficiente y rentable.

Otro aspecto importante de la energía nuclear por fisión es su densidad de energía. Según Smil (2008), la densidad de energía de la energía nuclear es muy alta en comparación con otras fuentes de energía. Por ejemplo, un kilogramo de uranio enriquecido puede producir una cantidad de energía equivalente a la que se produce quemando 100 toneladas de carbón. La alta densidad de energía de la energía nuclear por fisión significa que se requiere una cantidad relativamente pequeña de combustible para producir grandes cantidades de energía. Esto reduce la cantidad de residuos radiactivos que se generan y hace que la energía nuclear por fisión sea una fuente de energía muy eficiente.

La energía nuclear por fisión también requiere una cierta cantidad de área de terreno para su instalación y funcionamiento. Un reactor nuclear de 1000 MW requiere alrededor de 2,5 a 3,3 km<sup>2</sup> de área de terreno para su instalación y funcionamiento. Esto incluye el área necesaria para el reactor, la central eléctrica y otros edificios auxiliares (Quiroz, 2021). Aunque la energía nuclear por fisión requiere una cierta cantidad de área de terreno, es importante tener en cuenta que la densidad de energía de la energía nuclear es muy alta. Esto significa que se puede producir una gran cantidad de energía utilizando una cantidad relativamente pequeña en área.

### **Escenario energético hipotético e irrealizable: el sector eléctrico de Colombia se abastece 100 % de energía nuclear**

Según la información proporcionada anteriormente, un reactor nuclear de 1000 MW puede generar alrededor de 8.760 GWh de energía eléctrica en un año, lo que equivale a 24 GWh-día. Entonces, se necesitarán aproximadamente 12 reactores nucleares de 1000 MW para cubrir la capacidad eléctrica instalada de Colombia que es de 76000 MW año o 208GW-día

Para calcular el espacio requerido para estos reactores nucleares, podemos utilizar la información proporcionada en Quiroz (2021), la cual indica que un reactor nuclear de 1000 MW requiere alrededor de 2,5 a 3,3 km<sup>2</sup> de área de terreno para su instalación y funcionamiento. Entonces, los 12 reactores nucleares de 1000 MW necesitarán un total de 30 a 39,6 km<sup>2</sup> de terreno para su instalación y funcionamiento.

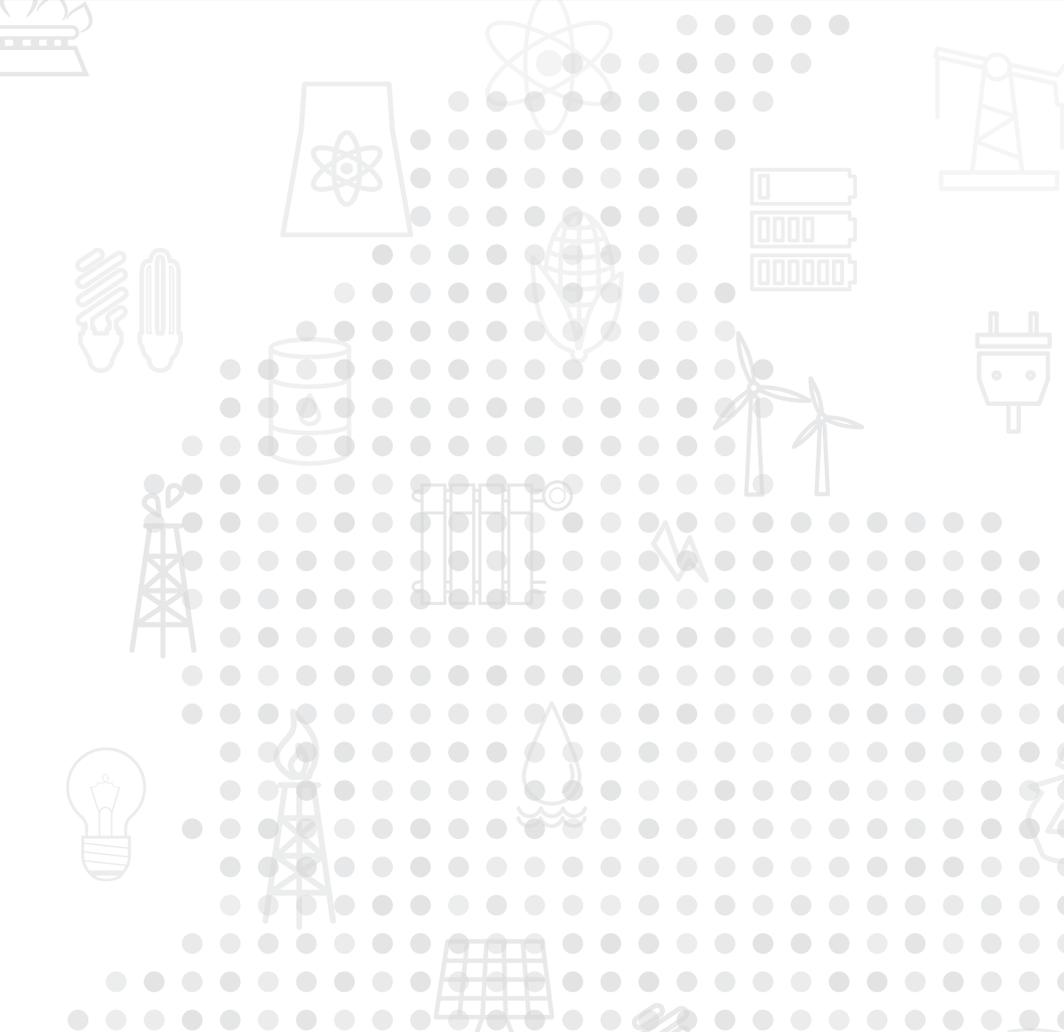
Es importante tener en cuenta que este es solo un análisis teórico y que hay muchos otros factores a considerar antes de tomar una decisión sobre la construcción de reactores nucleares en Colombia. Por ejemplo, es necesario considerar los riesgos y los costos asociados con la energía nuclear, así como la disponibilidad y la accesibilidad del combustible nuclear.

## Potencial nuclear de Colombia

El potencial de energía nuclear por fisión en Colombia se basa en la disponibilidad de uranio y otros recursos necesarios para la generación de energía nuclear. Si bien Colombia cuenta con manifestaciones de uranio en su territorio, su explotación y desarrollo aún no se ha llevado a cabo (ANM, 2023). Para determinar el potencial, se requiere un análisis más detallado de la cantidad y calidad de los recursos de uranio disponibles, así como de otros factores, por ejemplo, la infraestructura necesaria y las consideraciones ambientales y de seguridad. Colombia no cuenta con plantas de energía nuclear en funcionamiento. Sin embargo, ha habido discusiones y propuestas en el pasado para implementar proyectos nucleares en el país.



## Consideraciones finales





La información presente en este libro es de gran interés para el sector energético y el público en general; puede generar reflexiones de las diferentes fuentes de energía y una mirada crítica para la esperada transición energética. Sin embargo, debemos ser claros en que son aproximaciones que, aunque han sido evaluadas de manera rigurosa, no son camisa de fuerza, puesto que cada energético tiene muchos factores que hacen que su capacidad de generación de energía pueda variar; por ejemplo, factores climáticos para el caso de la energía solar, eólica, mareomotriz, undimotriz; factores de calidad del energético como variación del tipo de carbón, poder calorífico del gas, de la biomasa, etc. Para todos los energéticos aquí planteados existen muchas variables que pueden cambiar los valores calculados.

Es importante resaltar que los escenarios están planteados solamente sobre la capacidad de generación de cada uno de los energéticos. No se contemplaron factores supremamente importantes y detonantes del trilema energético, como su impacto sobre el medio ambiente, la confiabilidad del sistema y los costos de la energía para cada uno de ellos. Este primer avance puede permitir a otros investigadores calcular estas variables, partiendo de los resultados aquí publicados.

Finalmente, no existe un energético infalible; de allí la importancia de mantener una matriz energética diversa, que la transformación energética vaya de la mano con las características y potencialidades de cada región; es decir, un futuro energético quizás más competitivo y que pueda generar desarrollo debe ir de la mano con matrices energéticas diferenciales para cada región del país, con fuentes de generación cerca de las zonas de consumo.

# Referencias

- Acosta, M. y Pascualino, J. (2014). *Potencial de Uso de Biogás en Colombia*, 14(2). <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6382641.pdf>
- Ahmed, N. y Das, S. M. (2016). Oscillatory MHD mass transfer channel flow in a rotating system with Hall current. *International Journal of Heat and Technology*, 34(1), 115-123.
- AIGLP. (2020). Asociación Internacional de Gas Licuado de Petróleo. Benchmark del mercado de GLP envasado en América Latina. [https://aiglp.org/src/uploads/2020/11/aiglp\\_espanhol\\_site.pdf](https://aiglp.org/src/uploads/2020/11/aiglp_espanhol_site.pdf)
- Altamirano, A., Schlegel, B., Thiers, Ó., Miranda, A., Pilquinao, B., Orrego, R. y Rocha, C. (2015). Biomass stock and potential energy for the dendroenergy development based on native forests of south-central Chile. *Bosque*, 36(2), 223-237. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000200008>
- Alvarado, J. (2017). *Diseño y cálculo de una instalación fotovoltaica aislada*. Archivo Digital UPM. [https://oa.upm.es/52204/1/PFC\\_JORGE\\_ALVARADO\\_LADRON\\_DE\\_GUEVARA.pdf](https://oa.upm.es/52204/1/PFC_JORGE_ALVARADO_LADRON_DE_GUEVARA.pdf)
- Álvarez, D. (2022). De dónde se obtiene el carbón. <https://www.ejemplos.co/de-donde-se-obtiene-el-carbon/>
- Álvarez, A. (2013). Obtención de biodiésel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio. [Postgrado]. Centro de investigación en materiales avanzados, obtención de biodiésel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. Scielo.Org. <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n36/n36a02.pdf>
- Álvarez Rodríguez, A. (2013). *Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico*. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo.
- Ambientum. (2022). La energía nuclear. Ambientum Portal Líder Medioambiente.
- ANH. (2023). Estadísticas de producción. Agencia Nacional de Hidrocarburos. <https://www.anh.gov.co/es/operaciones-y-regal%C3%ADAs/sistemas-integrados-operaciones/estad%C3%ADsticas-de-producci%C3%B3n/>
- ANM. (2023). Lineamientos para el establecimiento de Minerales Estratégicos en Colombia. Agencia Nacional de Minería. [https://acmineria.com.co/sitio/wp-content/uploads/2023/05/27-03-2023\\_Documento\\_Lineamientos\\_minerales.pdf](https://acmineria.com.co/sitio/wp-content/uploads/2023/05/27-03-2023_Documento_Lineamientos_minerales.pdf)

- Arancibia, F. (2014). Mayores centrales eléctricas de China. Ingeniería y construcción. <https://facingyconst.blogspot.com/2014/08/mayores-centrales-electricas-de-china.html>
- Arango Miranda, A. (2012). Energía hidráulica, industria y electrificación: el caso de las fábricas de papel de San Rafael y Anexas, México. Red Geocrítica Internacional/Universidad de Barcelona, Universidad Humboldt de Berlín.
- Aregbe, A. G. (2017). Gas hydrate—properties, formation and benefits. *Open Journal of Yangtze Oil and Gas*, 2(1), 27-44.
- Arriols, E. (2018). Qué es el biogás y sus usos. [ecologiaverde.com. https://www.ecologiaverde.com/que-es-el-biogas-y-sus-usos-1568.html](https://www.ecologiaverde.com/que-es-el-biogas-y-sus-usos-1568.html)
- AWEA. (2021). Safe and efficient wind turbines for the future. American Wind Energy Association.
- Ayhan Demirbas. (2008). Biodiesel. A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines. Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2008. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84628-995-8#book-header>
- Bacca García, J. O. (2019). *Análisis de la viabilidad de la hidroelectricidad en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Barasa Kabeyi, M. J. y Akanni Olanrewaju, O. (2022). Technologies for biogas to electricity conversion. *Energy Reports*, 8, 774-786. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.007>
- Barón Moreno, A. C. y Contreras García, L. I. (2020). *Biogás: importancia y beneficios de energías alternativas en el mundo*, 14(2), 91-98.
- Barrero, A. (2016). Bioenergía, otra energía renovable que se puede almacenar. *Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias. Bioenergía*. <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/otra-renovable-que-se-puede-almacenar-20161010>
- Baskar, C., Baskar, S. y Dhillon, R. S. (2012). Biomass conversion: The interface of biotechnology, chemistry and materials science. In *Biomass Conversion: The Interface of Biotechnology, Chemistry and Materials Science* (Vol. 9783642284). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28418-2>
- BBC. (2023) Aumento de plantas geotérmicas. *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56149419>
- BBVA. (2022). Qué es la energía undimotriz y descubre sus características. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-undimotriz-descubre-sus-caracteristicas/>

- BCN. (2021). Mercado del gas en América Latina. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repository/10221/32763/1/BCN\\_\\_\\_Mercado\\_del\\_gas\\_en\\_Ame\\_\\_rica\\_Latina.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repository/10221/32763/1/BCN___Mercado_del_gas_en_Ame__rica_Latina.pdf)
- Bennardi, D. (2019). Digestión Aneróbica. Obtención de Biogás. [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/95628/mod\\_resource/content/1/Apunte%20sobre%20digesti%C3%B3n%20anaer%C3%B3bica%20y%20biog%C3%A1s%20\\_Edici%C3%B3n%202021\\_.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/95628/mod_resource/content/1/Apunte%20sobre%20digesti%C3%B3n%20anaer%C3%B3bica%20y%20biog%C3%A1s%20_Edici%C3%B3n%202021_.pdf)
- BID. (2016). Ocean Energy in Latin America and the Caribbean: Overview and Potential. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Ocean-Energy-in-Latin-America-and-the-Caribbean-Overview-and-Potential.pdf>
- Biodisol. (2008). Biodiésel: materias primas para su producción. Energía alternativas y renovables, medio ambiente. <https://www.biodisol.com/biodiesel-que-es-el-biodiesel-definicion-de-biodiesel-materias-primas-comunes/biodiesel-materias-primas-con-que-se-fabrica-biodiesel-aceites-y-grasas-produccion/>
- Blakers, A., Stocks, M. y Lu, B. (2020). The future of silicon photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 13(5), 1502-1512.
- BloombergNEF. (2023). Energía geotérmica: un camino hacia la descarbonización. <https://www.bloomberg.com/latam/blog/energias-limpias-desafian-la-caida-del-precio-del-petroleo-y-atraen-un-record-de-329-mil-millones-de-dolares-en-inversion-global-en-el-2015/>
- Bnamericas. (2022). Aumenta la demanda de energía en Colombia. <https://www.bnamericas.com/es/noticias/aumenta-la-demanda-de-energia-en-colombia>
- Bohrmann, G., Greinert, J., Suess, E. y Torres, M. (1998). Authigenic carbonates from the Cascadia subduction zone and their relation to gas hydrate stability. *Geology*, 26(7), 647-650.
- Bonnefoy, O., Gruy, F. y Herri, J. M. (2005). Van der Waals interactions in systems involving gas hydrates. *Fluid Phase Equilibria*, 231(2), 176-187.
- Budyanto, M. A., Novri, J., Alhamid, M. I. y Ardiyansyah. (2019). Analysis of convergent and divergent-convergent nozzle of waterjet propulsion by CFD simulation. *AIP Conference Proceedings*, 2062. <https://doi.org/10.1063/1.5086613>
- Carreño, S. (2022). *Análisis del proceso de producción de biodiésel a partir de la borra de café*. Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8819/4/6171248-2022-1-IQ.pdf>

- Carreté, M. P. (2013). ¿Qué es la fisión nuclear? Universidad Nacional de Educación a Distancia. <http://contenidosdigitales.uned.es/fez/view/intecca:VideoCMAV-5a6f4857b1111f510e8b4dd4>
- Castaña Contreras, N. y Feuillet Guerrero, M. (2021). Congreso internacional de Acodal: agua, saneamiento, ambiente y energías renovables. Acodal.
- Castellano, A., Lago, R. y Bory, H. (2022). Programa para determinar los parámetros que caracterizan el oleaje marino y su comportamiento. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(2), 29-43. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382022000200029&lang=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382022000200029&lang=es)
- Castillo, O., Torres, S., Núñez, C., Peña, V., Herrera, C. y Rodríguez, J. (2017). Producción de biodiésel a partir de microalgas: avances y perspectivas biotecnológicas. *Hidrobiológica*, 27(3). Ciudad de México, sep./dic. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-88972017000300337](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972017000300337)
- Castro Rivera, R., Solís Oba, M. M., Chicatto Gasperín, V. y Solís Oba, A. (2020). Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(3), 529-539. <https://doi.org/10.20937/rica.53545>
- Castro, A. (2006). Minicentrales hidroeléctricas. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Castro, C., Beltrán, L. y Ortiz, J. (2012). Producción de biodiésel y bioetanol: ¿una alternativa sustentable a la crisis energética? <http://uaim.edu.mx/webraximhai/Ej-25barticulosPDF/9%20CASTRO-MARTINEZ.pdf>
- Castro, M. S. (2014). *Diseño y construcción de una turbina eólica*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.
- CELSIA. (2019). Todo lo que debes saber sobre energía solar en Colombia - Celsia. Celsia - Eficiencia energética. <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>
- CEPAL. (2011). Brasil, Argentina y Colombia lideran producción de biocombustibles en la región. <https://www.cepal.org/es/comunicados/brasil-argentina-colombia-lideran-produccion-biocombustibles-la-region>
- CEPAL. (2012). Potencial de energías renovables en América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3583/S1200173\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3583/S1200173_es.pdf)

- Chaverra, D. y Mercado, J. (2011). *Evaluación financiera de una planta productora de biodiésel a partir de aceites usados de cocina*. Universidad de Cartagena. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/502/EVALUACI%C3%93N%20FINANCIERA%20DE%20UNA%20PLANTA%20PRODUCTORA%20DE%20%20BIODIESEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cheng, X. Q., Zhang, X. y Yi, L. X. (2014). A Review on the Development of Tidal Energy in China. *Advanced Materials Research*, 953-954, 637-649. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.953-954.637>
- Chero, P. (2023). El hidrógeno verde, la clave para un futuro energético limpio. Centro de Ingeniería y Tecnología. <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno>
- CNEA. (2023). Etapas de la producción del combustible nuclear. Comisión Nacional de Energía Atómica. <https://www.argentina.gob.ar/cnea/tecnologia-nuclear/ciclo-del-combustible-nuclear/etapas>
- Coelho-da-Costa, A. P., Zuniga-Linan, L., Mendonça-Cidreira, A. C., Hatami, T., Cabral-Júnior, A. A., Cutrim-Gomes, R. y Cardoso-Rocha, J. J. (2022). Oxidação com Persulfato de Amônio da Biomassa Lignocelulósica e da Biomassa de açaí para a Extração da Nanocristais de Celulose: estado da arte. *Revista ION*, 35(1), 67-93. <https://doi.org/10.18273/revion.v35n1-2022005>
- Collett, T., Riedel, M., Cochran, J. R., Boswell, R., Kumar, P. y Sathe. A. (2008). Indian continental margin gas hydrate prospects: results of the Indian National Gas Hydrate Program (NGHP) expedition 01.
- ConceptoABC. (2023). Energía geotérmica. Concepto, características, tipos y ejemplos. [conceptoabc.com](https://conceptoabc.com)
- CREG. (2018). Estudio del potencial de energías renovables no convencionales en Colombia. Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- CSN. (2023). Fisión nuclear. Consejo de seguridad nuclear. <https://www.csn.es/fision-nuclear#:~:text=La%20fisi%C3%B3n%20nuclear%20es%20la,y%20grandes%20cantidades%20de%20energ%C3%ADa>
- Czitrom, S. P. R., Trelles, S. A. y Hiriart, G. (2010). Generación de energía renovable con grandes y pequeñas centrales hidroeléctricas. *Energía del agua*, 1.
- Dagua, C. (2019). Caracterización del clima marítimo en el mar Caribe colombiano: optimización de redes de medida. Dimar. [https://cecolodigital.dimar.mil.co/2662/1/dimar\\_2019\\_Paismares\\_08\\_49-51.pdf](https://cecolodigital.dimar.mil.co/2662/1/dimar_2019_Paismares_08_49-51.pdf)
- Del Amo, E. (2021). Biogás: qué es, para qué se utiliza y su papel en la descarbonización. <https://e-ficiencia.com/biogas-que-es-para-que-se-utiliza-y-papel-en-la-descarbonizacion/>

- Department of Energy. (2023). Water power tidal. <https://www.energy.gov/eere/waterpower/tidal-energy>
- Díaz Álvarez, M. C. y Guerrero Arrelucea, S. M. (2018). Influencia del índice de acidez en el poder calorífico del biodiésel, obtenido a partir de aceites reciclados de cocina.
- Díaz, Y. (2012). *Impacto ambiental generado a partir de biodiesel de aceite de palma*. Universidad Libre. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7141/DiazGonzalezYeniCarolina2012.pdf?sequence=1>
- DLE. (2023). Energía geotérmica. Descubre La Energía. <https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/sobre-la-energia/fuentes-de-energia/energias-renovables/energia-geotermica/>
- DOE. (2019). Geothermal Energy Technologies Office - Enhanced Geothermal Systems. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/enhanced-geothermal-systems>
- DOE. (2020). Geothermal Energy. Departamento de Energía de los Estados Unidos. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics>
- Drummond Co. (2023). ¿Por qué carbón? <https://www.drummondco.com/por-que-carbon/?lang=es>
- Dunlop, J. P. (2012). *Photovoltaic systems*. CRC Press.
- DW. (2012). Generando electricidad con el cristal de la ventana. <https://www.dw.com/es/generando-electricidad-con-el-cristal-de-la-ventana/a-15672144>
- Ecopetrol. (2014). Gas natural. [https://nuevoportal.ecopetrol.com.co/wps/portal/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/Informaci%F3n%20General/que-es-el-gas-natural!/ut/p/z0/04\\_Sj-9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8ziLQIMHd09DQy9DZwt3QwcjTwsQxw-9g4I8nlz0C7IdFQEONbdQ/](https://nuevoportal.ecopetrol.com.co/wps/portal/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/Informaci%F3n%20General/que-es-el-gas-natural!/ut/p/z0/04_Sj-9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8ziLQIMHd09DQy9DZwt3QwcjTwsQxw-9g4I8nlz0C7IdFQEONbdQ/)
- EGEC. (2023). The voice of geothermal in Europa. European Geothermal Energy Council. <https://www.egec.org/>
- EGS. (2023) ¿Cómo funciona una planta geotérmica? Energía Solar. <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-geotermica/central-geotermica>
- Enagás. 2019. Innovación para la transición energética. Informe anual 2019. <https://www.enagas.es/content/dam/enagas/es/ficheros/sala-de-comunicacion/publicaciones/informe-anual/historico/Informe-anual-2019.pdf>
- Endesa. (2021). Energía hidráulica: qué es, cómo funciona y sus ventajas.

- Endesa. (2023). Precio del Gas Natural en Endesa. Naturalmente atractivo. <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/climatizacion/precio-gas-natural>
- ENEL. (2020). Beneficios de la energía solar. Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-solar/ventajas-energia-solar>
- ENEL. (2020). Todas las ventajas de la energía eólica. Enel Green Power.
- Enerdata. (2022). Consumo energético mundial | Consumo eléctrico. <https://datos.enerdata.net/electricidad/datos-consumo-electricidad-hogar.html>
- Enerdata. (2022). Consumo nacional de electricidad. <https://datos.enerdata.net/electricidad/datos-consumo-electricidad-hogar.html>.
- Enerdata. (2022). Energía y clima mundial, anuario estadístico 2022.
- Enerdata. (2023). Consumo de energía eléctrica - Colombia.
- Energía Mareomotriz (E.M.) (2023). Concepto, ventajas y desventajas. <https://concepto.de/energia-mareomotriz/>
- Energías Renovables. (2020). Europa lidera las patentes de energía oceánica en el mundo. Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias. [https://www.energias-renovables.com/energias\\_del\\_mar/europa-lidera-las-patentes-de-energia-oceanica-20200907](https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/europa-lidera-las-patentes-de-energia-oceanica-20200907)
- Energías Renovables. (2020). La planta de energía de las olas de Mutriku bate un nuevo récord de producción. Energías del mar. Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias.
- Energías Renovables. (2023). Corea del Sur inaugura la planta mareomotriz más grande del mundo - Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias. [https://www.energias-renovables.com/energias\\_del\\_mar/corea-del-sur-inaugura-la-planta-mareomotriz](https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/corea-del-sur-inaugura-la-planta-mareomotriz)
- Energyeducation. (2023). Fisión nuclear. Enciclopedia de la energía. Universidad de Calgary. [https://energyeducation.ca/Enciclopedia\\_de\\_Energia/index.php/Fisi%C3%B3n\\_nuclear](https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Fisi%C3%B3n_nuclear)
- EPEC. (2020). La energía eólica. Córdoba, Argentina. Archivo digital de División.
- EPM. (2019). Informe de sostenibilidad 2019.
- Espejo Marín, C. y García Marín, R. (2010). *Agua y energía: producción hidroeléctrica en España*. Investigaciones Geográficas (Esp), Universidad de Alicante.

- Espino-García, J. J., Almaraz-Buendía, I., Peralta-Ortiz, J. J. G., Reyes-Munguía, A., Hernández-Soto, I., González-Montiel, L. y Campos-Montiel, R. G. (2023). Effect of Xocnostle (*Opuntia matudae* Scheinvar) on methane concentration and ruminal variables during in vitro fermentation of corn stover. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(2), 309-325. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i2.6093>
- Estrada, C. A. y Meneses, A. Z. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica*, 2(25).
- FE. (2023) Ventajas y desventajas de la energía geotérmica. Futuro Eléctrico. <https://futuroelectrico.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-geotermica-cuales-son-sus-pros-y-contras/>
- Fedebiocombustibles (2023). Demanda de biocombustibles en Colombia cierra el 2022 en positivo y augura un 2023 para el sector consolidado. <https://fedebiocombustibles.com/2023/02/02/demanda-de-biocombustibles-en-colombia-cierra-el-2022-en-positivo-y-augura-un-2023-para-el-sector-consolidado/>
- Fedebiocombustibles. (2023). Sector de biocombustibles aporta para reducir el calentamiento global. <https://fedebiocombustibles.com/2022/01/03/sector-de-biocombustibles-aporta-para-reducir-el-calentamiento-global/>
- Fernández, A. (2009). Hongos para producir biocombustibles. <https://www.consumer.es/medio-ambiente/hongos-para-producir-biocombustibles.html>
- Fernández, J. (2003). Energía de la biomasa. Energías renovables para el desarrollo. Thomson-Paraninfo, 2-20.
- Foro Nuclear. (2023). ¿Cuánta energía en kWh se extrae de un kilo de uranio y qué rendimiento tiene cada kilo? <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-combustible-nuclear/cuanta-energia-en-kwh-se-extrae-de-un-kilo-de-uranio-y-que-rendimiento-tiene-cada-kilo/>
- Foro Nuclear. (2023). Energía nuclear en el mundo. <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/energia-nuclear-en-el-mundo/>
- Foro Nuclear. (2010). ¿Qué es una reacción de fisión nuclear en cadena? <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-fisica-nuclear/que-es-una-reaccion-de-fision-nuclear-en-cadena/#:~:text=Seg%C3%BAn%20esta%20definici%C3%B3n%2C%20una%20reacci%C3%B3n,nuevas%20fisiones%2C%20y%20as%C3%AD%20sucesivamente.>

- Foro nuclear. (2023). ¿Qué es el gas natural? Y qué usos tiene. <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-el-gas-natural-y-que-usos-tiene/>
- Franco, G., Gallo, A. y Franco, E. (2010). El carbón colombiano y el modelo de Hotelling. *Rev.EIA.Esc.Ing.Antioq*, 14. Envigado.
- Freitas, C. P. M., Marangon, B. B., Pereira, E. G. y Renato, N. S. (2023). Special Issue: Energy in Agriculture Exploring Spent Coffee Grounds Energy Potential In The Brazilian Scenario. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 43.
- Fthenakis, V., Kim, H. C. y Alsema, E. (2011). Emissions from photovoltaic life cycles. *Environmental Science & Technology*, 45(10), 4554-4560.
- Garrett, C. (2021, febrero 11). ¿Qué tipo de energía es el biogás? Selectra. <https://climate.selectra.com/es/que-es/biogas>
- Gas País. (2023). Cuál es el poder calorífico del GLP. <https://gaspais.com.co/poder-calorifico-del-glp/>
- Gaughan, R. (2021). ¿Cuánto terreno se necesita para aerogeneradores? <https://sciencing.com/much-land-needed-wind-turbines-12304634.html>
- GEO. (2023) Energy Savings. Geoexchange. <https://www.geoexchange.org/>
- Gil, R. (2017). Producción de biodiésel a partir de aceite de girasol en una planta piloto de reacción por cavitación. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/25737/TFG-ljjsessionid=B27D9120AD423FB44DA5E39694632136?sequence=1>
- Giménez Álvarez, J. M. y Gómez Targarona, J. C. (2011). Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia. *Dyna rev. fac. nac. Minas*, 78(169). Medellín.
- GOB. (2023). Geotermia: fuente de energía renovable. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/geotermia-fuente-de-energia-renovable>
- Goldschmidt, B. (1987). *Pionniersdet' Atom*. Stock. París.
- González-Correa, J. M., Velasco-Hernández, J. X. y Rincón-Mejía, M. R. (2015). Análisis preliminar del recurso undimotriz en la costa Caribe colombiana. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 135-147.
- González-Fernández, R. y Vera, E. (2009). Variability of the bottom-simulating reflector (BSR) and its association with tectonic structures in the Chilean margin between Arauco Gulf (37 S) and Valdivia (40 S). *Marine Geophysical Researches*, 30, 1-19.

- Graul, M., Bronston, M. y Williams, C. (1989). Gas hydrates and their association with mud diapir/mud volcanoes on the Louisiana continental slope, in Offshore Technology Conference, OnePetro.
- Green Washing Economy. (2020). Green Washing Economy. <https://greenwashingeconomy.com/definicion-energie-eolienne/>
- GTC. (2023). Canadá Geotérmica. Geothermal Canada. <https://www.geothermalcanada.org/>
- GTO. (2023) Datos, modelado y análisis. Oficina de Tecnologías Geotérmicas <https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-technologies-office>
- Guastay, W. (2020). *El uso de la energía hidráulica para la generación de energía eléctrica como estrategia para el desarrollo industrial en el Ecuador*. (Tesis de licenciatura). Universidad Internacional SEK, Ecuador.
- Guerra, J., Carvajal, G. y Ortega, H. (2018). Evaluación del potencial energético de las olas en la costa del Pacífico colombiano. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 79-87.
- GVI. (2023). ¿Qué es la energía geotérmica de baja entalpía? Geotermia Vertical instalaciones. <https://www.geotermiavertical.es/energia-geotermica-baja-entalpia/>
- Hale, M. (2021). La hidrólisis térmica impulsa la producción de biogás. HRS Heat Exchangers. <https://www.hrs-heatexchangers.com/es/noticias/la-hidrolisis-termica-impulsa-la-produccion-de-biogas/>
- Herguedas, A., Taranco, C., Rodríguez, E. y Paniagua, P. (2012). Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. *Transbioma*, 13(2), 105-109.
- Hernández, P. y Jiménez, S. (2020). Diseño de una turbina para una central de energía mareomotriz. Facultat de Nàutica de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/328658>
- Hernández-López, D.-A., Rasikh Tariq, A., Bassam, M., Vega De Lille, L. y Riech, I. (2022). Does recycling solar panels make this renewable resource sustainable? Evidence supported by environmental, economic, and social dimensions. *Sustainable Cities and Society*, 77. [https://www.naturgy.com/Primeros\\_yacimientos\\_de\\_gas\\_natural\\_en\\_el\\_mundo](https://www.naturgy.com/Primeros_yacimientos_de_gas_natural_en_el_mundo) o <https://www.shell.com.co/energia-e-innovacion/gas-natural.html>
- Huaraya Huahualuque, M. Y. y Sancho Moya, T. C. (2020). Estado del arte sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria. [https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3415/Mery\\_Trabajo\\_Bachiller\\_2020.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3415/Mery_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=5&isAllowed=y)

- IAEA. (2021). Qué son los reactores modulares pequeños (SMR). <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>
- IAEA. (2021). Situación y perspectivas internacionales de la energía nucleoelectrónica. Organismo Internacional de Energía Atómica. [https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc65-inf6\\_sp.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc65-inf6_sp.pdf)
- Iberdrola. (2023). Qué es la energía solar fotovoltaica. ¿Cómo funcionan las plantas fotovoltaicas? <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica#:~:text=Se%20trata%20de%20un%20tipo,funcionan%20estos%20enormes%20campos%20solares>.
- IDREAM. (2022). Atlas de viento y energía eólica de Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia.
- IEA. (2019). Coal report. <https://www.iea.org/reports/coal-2019>
- IEA. (2021). Hydropower. Agencia Internacional de Energía. <https://www.iea.org/energy-system/renewables/hydropower>
- IEA. (2022). World Energy Outlook 2022, Agencia Internacional de Energía IEA, París. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022?language=es>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).
- IEA. (2022). Reporte del uso del metano para uso doméstico y extracción de petróleo. Agencia internacional de Energía. <https://www.iea.org/>
- IEA. (2018). Energy technology perspectives. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2018>
- IEA. (2020). Geothermal. Agencia Internacional de Energía. <https://www.iea.org/reports/geothermal-energy>
- IEA. (2020). Natural gas. Agencia internacional de energía. <https://www.iea.org/reports/driving-down-methane-leaks-from-the-oil-and-gas-industry>
- IEA. (2021). Electricity. International Energy Agency. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity>
- IEA. (2021). Renewables. International Energy Agency.
- IEA. (2022). Wind Electricity. Informe de Seguimiento. París.
- IGA. (2020). Employment in the Geothermal Industry. Asociación Internacional de Energía Geotérmica. [https://www.geothermal-energy.org/what\\_is\\_geothermal\\_energy/employment\\_in\\_the\\_geothermal\\_industry.html](https://www.geothermal-energy.org/what_is_geothermal_energy/employment_in_the_geothermal_industry.html)
- IGI. (2023). Geothermal energy consulting from explorations to operations. Instituto Geotérmico de Islandia. <https://geothermal.is/>

- IHA. (2021). La declaración de San José sobre energía hidroeléctrica. International Hydropower Association.
- Iñesta Burgos, J. y García Fernández, P. A. (2002). *Energía eólica, el recorrido de la energía*. Madrid: Madridinnova.
- IRENA. (2018). Renewable Power Generation Costs in 2019. International Renewable Energy Agency, 160. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA\\_2017\\_Power\\_Costs\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf)
- ISEG. (2023). Ventajas de la energía extraída gracias a la geotermia. Geinor Ingeniería Servicios Energéticos. <https://www.geinor.com/pozos-geotermicos/>
- Jacobson, M. Z. (2011). Review of Solutions to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security. *Energy and Environmental Science*, 4(3), 335-365.
- Junta de Castilla y León. (2020). Importancia del Carbón. Energía y Minería. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/importancia-carbon.html>
- Kazemi, K., Javaheri, F. y Mehrabian, M. A. (2019). Estimation of solar energy potential on building rooftops based on GIS: A case study of a Mediterranean city. *Solar Energy*, 191, 366-375.
- Khare, V. y Bhuiyan, M. A. (2022). Tidal energy-path towards sustainable energy: A technical review. *Cleaner Energy Systems*, 3, 100041.
- Khatib, H., Ramli, M. A. M. y Kassim, A. H. M. (2016). Rural electrification in Malaysia: A review of remote area power supply (RAPS) system using solar photovoltaic (PV) technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1331-1342.
- Kilner, J. (2021). La electrólisis del agua: una forma sostenible de producir hidrógeno verde. <https://cicenergigune.com/es/blog/electrolisis-agua-sostenible-producir-hidrogeno-verde>
- Kilner, J. (2022). Métodos de producción de hidrógeno y sus colores. <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>
- Kim, J. H., Lee, J. H. y Kim, G. W. (2015). Annual electricity generation potential of solar photovoltaic panels in South Korea. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(6), 063111.
- Kvenvolden, K. A. y McMenamin, M. A. (1980). Hydrates of natural gas: a review of their geologic occurrence.
- La República*. (2022). Las ventajas y costos de la energía solar para la transición energética de las empresas. <https://www.larepublica.co/especiales/transicion-energetica/las-ventajas-y-costos-de-la-energia-solar-para-la-transicion-energetica-de-las-empresas-3448437>

- Li, Q., Stoeckl, N. y King, D. (2019). Using the life-satisfaction approach to quantify the complex inter-related impacts of coal mining on host communities: A case study in Shanxi, China. *Resources Policy*, 62, 305-316. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.03.021>
- Llanes, E., Rocha, J., Salazar, P. y Medrano, J. (2017). Producción e impacto del biodiésel: una revisión. *Innova Research Journal*, 2(7), 59-76. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6069992>
- Lund, H., Mathiesen, B. V. y Connolly, D. (2015). From fossil fuels to renewable energy: guiding transitions to a sustainable energy future. *Energy*, 80, 361-370.
- Mackinson, O. (2022). Caracterización de la biomasa residual de genotipos de alcauil para su potencial aplicación en alimentos. 531, 253-260.
- Mamani, J., Llumipanta, F., Ramos, S., Rea, J., Alucho, J., Saltos, D., Llanos, F. y Jácome Pilco, C. (2021). Sistemas de producción de biogás: fundamento, técnicas de mejora, ventajas y desventajas. *Agroindustrial Science*, 11(2), 239-247.
- Maroneze, M. M., Zepka, L. Q., Vieira, J. G., Queiroz, M. I. y Jacob-Lopes, E. (2014). A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445-458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Meier, P. M., Rodríguez, A. A. y Bethmann, F. (2015). Lessons learned from Basel: New EGS projects in Switzerland using multistage stimulation and a probabilistic traffic light system for the reduction of seismic risk. World Geothermal Congress. Melbourne, Australia. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-02832020000100101#B63](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832020000100101#B63)
- Mendoza, R. y Viteri. (2013). Energía undimotriz, alternativa para producción de energía eléctrica en las provincias de Santa Elena. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- Merkel, B., Planer-Friedrich, B. y Würdemann, H. (2013). *Geothermal energy systems: Exploration, development, and utilization*. John Wiley & Sons.
- Merlin. (2023). About Hydrogen Energy. Material Energy Research Laboratory in Nanoscale. <https://merlin-h2.com/energyh/about-hydrogen-energy/>
- Minambiente. (2021). Proyecto De la práctica a la política: análisis de las barreras a la inversión en biogás en Colombia y las medidas para abordarlas, a partir de la experiencia de los desarrolladores y otros actores relevantes. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://ledslac.org/wp-content/uploads/2021/08/Informe-final-biogas-Colombia-v.06082021-final.pdf>

- Minenergía. (2021). Reporte integrado de sostenibilidad. [https://www.minenergia.gov.co/documents/7235/Informe\\_GRI\\_2021\\_VF.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/7235/Informe_GRI_2021_VF.pdf)
- Minenergía. (2022). Funcionamiento del sector del gas natural. <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/gas-natural/>
- Minenergía. (2023). Hidrocarburos y su funcionamiento en el sector del gas natural. <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/gas-natural/>
- Minshall, W. (2010). *Energy production in hydroelectric power plants*. New York: Springer.
- Mohammad Soltanieh, Angineh Zohrabian, Mohammad Javad Gholipour, Eugenia Kalnay. (2016). A review of global gas flaring and venting and impact on the environment: Case study of Iran. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 49, 488-509.
- Montero-Sousa, J.-A. y Calvo Rolle, J. L. (2013). Energía maremotriz: perspectiva histórica y estado actual. *Técnica Industrial*, 301, 54-60. ISSN 0040-1838.
- Montiel-Bohórquez, N. D., Saldarriaga-Loaiza, J. D. y Pérez, J. F. (2021). Effect of the colombian renewable energy law on the levelized cost of a substitute gaseous fuel produced from msw gasification. *Ingeniería e Investigación*, 42(2). <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n2.92410>
- Moreira, E. (2012). Principales características de las materias primas utilizadas en la producción de biodiésel: la influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. <https://es.scribd.com/document/351423347/Dialnet-PrincipalesCaracteristicasDeLasMateriasPrimasUtili-5038487-pdf#>
- Moreno Jiménez, D. (2022). Identificación de impactos ambientales producidos por centrales hidroeléctricas. (Tesis de licenciatura). Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia.
- Mosquera, F., Evangelista, A., Paleston, C. y Paul, F. (2021). Generación de energía a partir de las olas. Buenos Aires: Instituto en Investigación Electrónica, Control y Procesamiento de Señales.
- MTERD. (2023). Energía nuclear. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://energia.gob.es/Nuclear/Paginas/IndexEnergiaNuclear.aspx>
- Munguía, S. (2017). Analizamos los datos de la Central Undimotriz de Mutriku. Producción, factor de capacidad. *Diario Renovables*. <https://www.diariorenovables.com/2017/12/central-undimotriz-de-mutriku-analisis-datos-produccion-problemas.html>

- Muñoz-Muñoz, D., Pantoja-Matta, A. J. y Cuatin-Guarín, M. F. (2014). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y biorefinería. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 12(2), 10-19.
- Nachtane, M., Tarfaoui, M., Hilmi, K., Saifaoui, D. y El Moumen, A. (2018). Assessment of Energy Production Potential from Tidal Stream Currents in Morocco. *Energies*, 11(5), 1065.
- Naturgas. (2021). ¿Qué es el biogás? <https://naturgas.com.co/que-es-el-biogas/>
- Naturgy. (2019). Primeros yacimientos de gas natural en el mundo.
- NTG. (2023). ¿Qué es la energía geotérmica? *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-la-energia-geotermica>
- NTG. (2023). ¿Qué son los biocombustibles? *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-son-los-biocombustibles>
- Núñez, C. (2022). Qué es la energía hidroeléctrica. *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/energia-hidroelectrica#:~:text=Es%20una%20fuente%20de%20combustible,a%20trav%C3%A9s%20de%20las%20turbinas.>
- Núñez, R. (2018). 1938: se descubre la fisión nuclear. <https://www.muyinteresante.es/curiosidades/27408.html>
- Ocaña, E. R. (2018). Las hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental. Scielo, Universidad Industrial de Santander.
- Odeh, I. N., Akinyele, D. O. y Bakare, O. M. (2018). Comparative analysis of life cycle cost of solar photovoltaic (PV) and diesel generator (DG) systems for powering rural communities in Nigeria. *Renewable Energy*, 123, 1-11.
- Odutola, T. O., Bassey, I., Igbine, A. y Monday, C. U. (2022). Hydrate Risk Management and Evaluation for Gas-Dominated Systems Using Machine Learning. In SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition (p. D021S006R005). SPE.
- OIEA. (2021). Reactores modulares pequeños. Organismo Internacional de Energía Atómica. <https://www.iaea.org/es/temas/reactores-modulares-pequenos>
- Ong, S., Campbell, C., Denholm, P., Margolis, R. y Heath, G. (2013). Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States. National Renewable Energy Laboratory (NREL). <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56290.pdf>

- Ordóñez-Sánchez, S., Allmark, M., Porter, K., Ellis, R., Lloyd, C., Santic, I., O'Doherty, T. y Johnstone, C. (2019). Analysis of a Horizontal-Axis Tidal Turbine Performance in the Presence of Regular and Irregular Waves Using Two Control Strategies. *Energies*, 12(3), 367.
- Orozco, E. (2023). Hydrogen: current concepts and challenges. <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7077718059410452480/Oviedo>
- Ortiz, A. y Valencia, J. (2013). Geología de la cuenca Tumaco norte: revisión previa de información petrolera para perforación de un pozo estratigráfico profundo. *Boletín de Geología*. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/3231>
- OVC. (2023). Qué aplicaciones tiene la energía geotérmica. OVANCE. <https://ovacen.com/energias-renovables/geotermica/>
- Pang, X.-Q. (2021). Evaluation and re-understanding of the global natural gas hydrate resources. *Petroleum Science*, 323-338.
- Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159.
- Patonia, A. y Poudineh, R. (2023). Hydrogen storage for a net-zero carbon future. The Oxford Institute for Energy Studies. OIES Paper: ET23. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2023/04/ET23-Hydrogen-storage-for-a-net-zero-carbon-future.pdf>
- PAVCO. (2019). Las 5 centrales hidroeléctricas más sorprendentes del mundo. <https://pavcowavin.com.co/blog/5-centrales-hidroelectricas-sorprendentes>
- Peralta, J., Delgado, E., Rodríguez, C. y Caicedo, F. (2019). Diseño de un prototipo para pruebas de conversión de energía undimotriz. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/48511>
- Perdomo, A. J., Díaz, H. y Palacios, J. (2018). Viabilidad técnica de tecnologías para aprovechamiento de la energía undimotriz en la costa del Pacífico colombiano. *Avances: investigación en ingeniería*, 15(1), 286-301. DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4740>
- Pérez, D. E. A., Ramírez, C. A. T. y Plazas, J. P. (2011). Caracterización de las propiedades del biodiésel de girasol bajo la Norma NTC de 100/04 y medición de poder calorífico. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 8(2), 73-80.
- Pérez, J. y Becerra, W. (2017). Cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del Caribe colombiano. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 5(2), 68.

- Pérez, R. (2018). Solar Energy. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, pp. 157-170. Elsevier.
- Piriz, G. (2017). *Cálculo y diseño de una central de energía undimotriz*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Planas, O. (2009). Fisión nuclear, qué es, reacciones en cadena y ejemplos. *Energía Nuclear*. <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/fision-nuclear>
- Quintero, R. y Quintero, E. (2023). Energía mareomotriz: potencial energético y medio ambiente. *Tidal energy: potential energy and environment*, 18(2), 121-134.
- Quintero-González, J. R. y Quintero-González, L. E. (2016). Sistemas de producción y potencial energético de la energía mareomotriz. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(1), 39-45.
- Quiroz, J. (2021). Dimensionamiento de una central nuclear en Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Ramos-Gutiérrez, L. J. y Montenegro-Fragoso, M. (2012). Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro. Scielo. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n2/v3n2a7.pdf>
- Raso, C. (2021). Europa produce la mitad del biometano y el biogás del mundo. <https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/11547537/12/21/Europa-produce-la-mitad-del-biometano-y-el-biogas-del-mundo.html>
- REW. (2023) Tecnología de energía geotérmica. *Renewable Energy World*. <https://www.renewableenergyworld.com/types-of-renewable-energy/tech-3/>
- Reyes, E. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. <https://www.lamjol.info/index.php/FAREM/article/download/5552/5248>
- Rico, J. (2020, abril 9). Bioenergía - Agencia Internacional de la Energía: Biogás y biometano podrían cubrir el 20% de la demanda mundial de gas. *Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias*. <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/agencia-internacional-de-la-energia-biogas-y-20200409>
- Rincón, N. y Castiblanco, C. (2021). Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión. DOI: <https://doi.org/10.15446/ga.v24n1.98868>
- RNV. (2023). Yacimientos geotérmicos. *Renovables Verde*. <https://www.renovablesverdes.com/como-funciona-la-energia-geotermica/>

- Roca, J. (2023). La energía oceánica tiene un potencial de 70 GW en aguas de Gran Bretaña, Irlanda y Portugal. *El periódico de la Energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/la-energia-oceanica-tiene-un-potencial-de-70-gw-en-aguas-de-gran-bretana-irlanda-y-portugal/>
- Rodríguez, R. y Campuzano, M. (2017). Aprovechamiento de la energía undimotriz en el ecuador. *Ingenius. Revista de ciencia y tecnología*, (2), 23-28. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n17.2017.03>
- Rojas, A., Chaparro, O. y Ospina, C. (2011). Evaluación de mezclas biodiésel-diésel en la generación de energía eléctrica. *Ing. Univ.*, 15(2). [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-21262011000200002](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262011000200002)
- Rotoplast. (2020). Biodigestor. <https://www.rotoplast.com.co/es/producto/biodigestor>
- Ruppel, W. F., Lorenson, L. G., McMullen, B. J. y Kvenvolden, K. A. (2020). Preliminary global database of known and inferred gas hydrate locations. <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5eb413a282ce25b5135a9f2a>
- S.E.I. (2022). Energía solar y eólica en Colombia: panorama y resumen de políticas 2022. Natural Resource Governance Institute.
- Salgado, R. (2014). Paneles solares: generadores de energía eléctrica. *Revista Saber Más*. <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/133-numero-1755/268-paneles-solares-generadores-de-energia-electrica.html>
- Salinas, E. y Gasca, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, 157, 75-82 <https://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>
- Sandler, J. B. (2005). Global Distribution of Methane Hydrate in Ocean Sediment. *Energy Fuels*, 459-470.
- Sant, R., Koehl, M. y Kelnhofer, E. (2021). Environmental impacts of photovoltaics. *Encyclopedia of Sustainable Science and Technology*, 1-27. Springer.
- Saxena, V., Kumar, N. y Nangia, U. (2022). Recent Trends in the Optimization of Renewable Distributed Generation: A Review. *Ingeniería e Investigación*, 42(3), 1-13. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.97702>
- Schubert, F., Hacke, P. y Mishra, K. (2015). Lead, cadmium and sulphur in thin-film photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 8(3), 810-812.
- Secretaría de Estado de Energía. (2022). Hoja de Ruta del Biogás. [https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/00HR\\_Biogas\\_V6.pdf](https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf)
- SELA. (2021). Las sequías amenazan el impulso global de la hidroelectricidad como energía limpia. <https://www.sela.org/es/prensa/servicio-informativo>

- SGK-Planet. (2021). Principales usos del carbón. <https://sgkplanet.com/cuales-son-los-principales-usos-del-carbon/>
- Shakirov, R. (2011). Western Pacific Gas Hydrate Belt. Workshop International Cooperation on Investigation and Research of Marine Natural Resource and Environment.
- Shell. (2023). Gas natural. <https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/liquefied-natural-gas-lng/lng-outlook-2023.html>
- Sloan, E. D. y Koh, C. A. (2008). Clathrate hydrates of natural gases third edition. Chemical Industries-New York Then Boca Raton-Marcel Dekker Then CRC Press, vol. 119.
- Smil, V. (2008). *Energy in nature and society: general energetics of complex systems*. MIT Press.
- Smil, V. (2017). *Energy and Civilization: A History*. MIT Press.
- Soltanieh *et al.* (2016). Una revisión de la quema y ventilación global de gas y el impacto en el medio ambiente: estudio de caso de Irán. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583616300603>
- Statista. (2023). Países con mayor producción de biocombustible a nivel mundial en 2021. <https://es.statista.com/estadisticas/635730/paises-lideres-en-la-produccion-de-biocarburante/>
- Steinberg, R. (2023). Biodiésel. Universidad de Palermo. [https://www.palermo.edu/economicas/pdf\\_economicas/Presentacion\\_biocom\\_Steinberg.pdf](https://www.palermo.edu/economicas/pdf_economicas/Presentacion_biocom_Steinberg.pdf)
- Stephenson, M. (2018). The Carbon Cycle, Fossil Fuels and Climate Change. *Energy Clim. Chang*, pp. 1-26.
- Suárez Chernov, V. D., López Díaz, I. y Álvarez González, M. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Centro Azúcar*, 46(1), 73-85.
- Suárez Chernov, V. D., Morales Zamora, M., Díaz López, I. y Álvarez González, M. (2021). Modelo integrador para el diseño de una planta de producción de biogás a partir del residual porcino. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 78(593), Art. 593. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/390018>
- SunPower. (2019). Solar panel output: How much electricity do solar panels produce? <https://us.sunpower.com/solar-panel-output/>
- Tester, J. W., Anderson, B. J., Batchelor, A. S., Blackwell, D. D., DiPippo, R., Drake, E. M., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M. C., Nichols, K., Petty, S., Toksoz, M. N., Veatch, R. W. y Baria, R. (2006). *The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century*. Massachusetts Institute of Technology.

- The Wind Power. (2022). The Wind Power. Wind Energy Market intelligence: [https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_425\\_windtec\\_wt10000dd-190-seatitan.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_425_windtec_wt10000dd-190-seatitan.php)
- Tidal Lagoon Power. (2023). Aprovechando el poder de nuestras mareas. <http://www.tidallagoonpower.com/>
- Topolski, K., Reznicek, E., Cakir, B., San Marchi, C., Ronevich, J., Fring, L., Simmons, K. Guerra, O., Hodge, B. y Chung, M. (2022). Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf>.
- Toraman, H. (2022). *Propiedades y especificaciones del biodiésel*. Pennsylvania State university. [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa\\_Biol%C3%B3gica/Combustibles\\_alternativos\\_a\\_partir\\_de\\_fuentes\\_de\\_biomasa\\_\(Toraman\)/09%3A\\_Producci%C3%B3n\\_de\\_Biodiesel/9.04%3A\\_Propiedades\\_y\\_especificaciones\\_del\\_biodiesel](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Biol%C3%B3gica/Combustibles_alternativos_a_partir_de_fuentes_de_biomasa_(Toraman)/09%3A_Producci%C3%B3n_de_Biodiesel/9.04%3A_Propiedades_y_especificaciones_del_biodiesel)
- Turco, F., Crutchley, G. J., Gorman, A. R., Mountjoy, J. J., Hillman, J. I. y Woelz, S. (2020). Seismic velocity and reflectivity analysis of concentrated gas hydrate deposits on the southern Hikurangi Margin (New Zealand). *Marine and Petroleum Geology*, 120, 104572.
- Twenergy. (2023). Energía geotérmica: el futuro de la energía. <https://twenergy.com/energia/energias-renovables/tipos-de-geotermita-y-porque-es-la-energia-de-futuro-1847/>
- Ubierna, M., Alberti, J., Rodríguez, A. y Arturo, D. (2020). Modernización de centrales hidroeléctricas en América Latina y el Caribe: identificación y priorización de necesidades de inversión. BID.
- UNAM. (2023). Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos. <https://biblat.unam.mx/es/revista/dyna-medellin/articulo/analisis-parametrico-de-las-centrales-geotermoelectricas-vapor-seco-camara-flash-y-ciclos-hibridos>
- UN. (2023). La promesa de la energía solar: estrategia energética para reducir las emisiones de carbono en el siglo XXI. Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-promesa-de-la-energia-solar-estrategia-energetica-para-reducir-las-emisiones-de-carbono-en-el>
- UPME. (2015). Potencial hidroeléctrico de Colombia. <https://www1.upme.gov.co/>
- UPME. (2023). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. <http://www1.upme.gov.co/sgic/>
- US Energy Department. (2023). Hydrogen Storage <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

- US Geological Survey. (2022). Mineral Commodity. Science for a changing world. <https://www.usgs.gov/international-programs/science/minerals-science-a-changing-world>
- USEIA. (2021). Independent Statistics and Analyst U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/>
- USGS. (2023). The Geysers: An Overview of the World's Largest Geothermal Field. <https://www.usgs.gov/volcanoes/clear-lake-volcanic-field/geysers-geothermal-field>
- USGS. <https://www.usgs.gov/energy-and-minerals/energy-and-minerals-topics/geothermal-energy/geothermal-field-overviews-0>
- Valverde, J. C., Arias, D., Campos, R., Jiménez, M. F. y Brenes, L. (2020). Perceptual analysis of energy market based on woody biomass of trees originated in Costa Rica. *Madera y Bosques*, 26(3), 1-16. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632066>
- Vanti. (2023). ¿Qué es el gas natural? <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>
- Vargas Calderón, D. F., López Duque, S. Y. y Rojas Muñoz, A. L. (2021). El biocombustible, factor de desarrollo. En: Vargas Calderón, D. F., Gómez Racines, L. y Rojas Muñoz, A. L. (Eds. científicos). *El consumidor y la agricultura sostenible para el siglo XXI* (pp. 91-121). Cali: Editorial Universidad Santiago de Cali.
- Vargas, C. (2012). Evaluating total Yet-to-Find hydrocarbon volume in Colombia. *Earth Sci. Res. J.*, 16(Special Issue), 1-246.
- Vega Salinas, D. (2014). Desarrollo de la energía mareomotriz en Chile. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 2(3), 16-29.
- Venegas Venegas, J. A., Raj Aryal, D. y Pinto Ruiz, R. (2019). Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas. *Análisis Económico*, 34(85), 169-187.
- Ventura Ríos, J., Honorato Salazar, J. A., Hernández Garay, A., Aburto Anell, J. A., Vaquera Huerta, H. y Enríquez Quiroz, J. F. (2017). Composición química y rendimiento de biomasa de maralfalfa para producción de bioetanol de segunda generación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 215-221.
- Waite, W., Ruppel, C. y Boze, L.-G. (1990). Preliminary global database of known and inferred gas hydrate locations. U.S. Geological Survey data release. <https://www.usgs.gov/data/preliminary-global-database-known-and-inferred-gas-hydrate-locations>

- WET. (2020). Casi toda la producción de carbón de los Estados Unidos se consume para energía eléctrica. World Energy Trade. <https://www.worldenergytrade.com/metales/mineria/casi-toda-la-produccion-de-carbon-de-los-estados-unidos-se-consume-para-energia-electrica>.
- World Bank. (2020). Geothermal Energy. Banco Mundial. <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/brief/geothermal-energy>
- Worrell, E., Bernstein, L., Roy, J., Price, L. y Harnisch, J. (2000). Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy*, 25(12), 1085-1098.
- Yang, H., Li, J., Li, C. y Zhang, Y. (2020). A review of materials science challenges in photovoltaic module recycling. *Joule*, 4(12), 2467-2491.
- Yépez-García, A., Ji, Y., Hallack, M. C. M. y Soto, D. D. L. (2018). The Energy Path of Latin America and the Caribbean. *The Energy Path of Latin America and the Caribbean*. <https://doi.org/10.18235/0001508>
- Zhang, X., Myhrvold, N., Hausfather, Z. y Caldeira, K. (2016). Climate benefits of natural gas as a bridge fuel and potential delay of near-zero energy systems. *Applied Energy*, 167, 317-322.
- Zhang, X., Wang, J., Yu, L. y Zhou, Y. (2020). Advanced materials for photovoltaics. *Advanced Materials*, 32(48), 2001833.

Este libro busca contextualizar las diferentes fuentes de energía, teniendo en cuenta su capacidad de generación, lo que nos permitiría entender los consumos e instalación de infraestructura, cantidad de equipos y áreas de ocupación. La necesidad climática nos ha puesto contra la pared y nos encontramos en una carrera para tratar de solventar la crisis. Sin embargo, si no se evalúa correctamente la transición y los sistemas energéticos, podríamos caer no solo en una crisis climática sino también energética en el país. Por esta razón, hemos evaluado 14 diferentes energéticos, donde se contextualiza el tipo de fuente de energía, cómo funciona y sus generalidades. Posteriormente, se proponen escenarios hipotéticos en los cuales cada energético podría suplir la totalidad de la energía eléctrica del país. Entre los resultados se encuentra el cálculo de cantidad de equipos e infraestructura requerida para cada fuente de energía; esto permite tener una idea más aterrizada de lo que significa implementar cada energético en una matriz más diversificada.

**AREANDINA**  
Fundación Universitaria del Área Andina

ISBN 978-958-5139-82-4

