



innovación para
transformar

¿UN SECTOR ELÉCTRICO SIN COMBUSTIBLES FÓSILES EN COLOMBIA A 2030?

Explorando escenarios y
estrategias de salida de los
combustibles fósiles en el
sector eléctrico colombiano

emergente
innovación para
transformar



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



EXPLORANDO ESTRATEGIAS Y ESCENARIOS DE ELIMINACIÓN DE GAS EN COLOMBIA

- Proyecto desarrollado por Emergente y el Grupo de Ciencias de la Decisión de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín.

Autores:

Emergente Energía Sostenible

Santiago Ortega Arango

Juanita Giraldo Quiroz

Juan Manuel España Forero

Universidad Nacional de Colombia

Santiago Arango Aramburo

Yris Olaya Morales

Juan Felipe Parra Rodas

Verónica Valencia Hernandez

Noviembre 2023

Emergente Energía Sostenible S.A.S. Cra 44A #35 sur – 63 Envigado,
Antioquia, Colombia. www.emergente.com.co



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

RESUMEN EJECUTIVO - PRINCIPALES SEÑALES PARA LOS TOMADORES DE DECISIONES

METODOLOGÍA

SEÑAL 1 - Según las políticas actuales, y suponiendo que no se produzcan más retrasos en los proyectos renovables en construcción, Colombia está en camino de eliminar gradualmente el gas en la generación de energía para 2030.

SEÑAL 2 - La energía solar distribuida es una herramienta clave para lograr la eliminación gradual de los combustibles fósiles para 2030.

SEÑAL 3 - El crecimiento de la demanda es la amenaza más relevante para lograr un sector eléctrico sin emisiones de carbono para 2030.

SEÑAL 4 - La finalización de la totalidad de Hidroituango (2400 MW) es necesaria para alcanzar la eliminación gradual de los combustibles fósiles en 2030.

SEÑAL 5 - Si el desarrollo de la energía eólica en Colombia se vuelve inviable, la energía solar y las pequeñas centrales hidroeléctricas reemplazarán la capacidad instalada faltante

SEÑAL 6 - En el peor de los casos, los combustibles fósiles representarán el 19% de la generación de energía en 2030.

SEÑAL 7 - Forzar una eliminación gradual de la capacidad fósil para 2030 requerirá el desarrollo de 11 a 15 GW de energía renovable para 2035.

SEÑAL 8 - En el escenario desfavorable, la implementación de un impuesto más alto al carbono eliminaría el carbón antes, pero podría extender la participación del gas más allá de 2030.

SEÑAL 9 - Los eventos de baja hidrología, como El Niño, aumentarán la proporción de generación con combustibles fósiles.

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL MARCO DE LA HOJA DE RUTA DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA JUSTA DE COLOMBIA

CONSIDERACIONES FINALES

REFERENCIAS

INTRODUCCIÓN

La descarbonización de la matriz energética ha sido un objetivo de la transición energética en Colombia durante la última década, y los esfuerzos para acelerar la implementación de las energías renovables han aumentado en los últimos años. A 2023, las centrales térmicas de gas y carbón representan 30% de la capacidad instalada del sistema eléctrico colombiano, sumando 6 GW de potencia. Durante los últimos años el gobierno ha explorado diferentes enfoques para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero -GEI- del sector, fomentando las energías renovables para hacer frente a la nueva demanda y, a largo plazo, eliminar completamente los combustibles fósiles.

Desde el año 2014, en Colombia se han sancionado varias leyes y decretos y el país ha realizado subastas de energía promover la adopción y el despliegue de las energías renovables no convencionales. Para 2023, la capacidad instalada a gran escala de energía eólica y solar es aproximadamente de 475 MW, lo que representa alrededor del 2% de la capacidad instalada total del país, que está cerca a los 20 GW (XM). A pesar de que el crecimiento de las renovables ha sido lento, el país espera un importante despliegue de estas en los próximos años, tanto en generación distribuida como en proyectos de gran escala. Se esperan más de 2,4 GW de energía eólica en el país para 2027, y hay planes para desarrollar más de 8,8 GW de energía solar antes de 2030.

Colombia anticipa un fuerte aumento en la energía renovable a pesar de un comienzo lento.

Según la Hoja de Ruta de Transición Energética Justa publicada recientemente por el Gobierno de Colombia el suministro de electricidad a partir de fuentes renovables es una de las principales estrategias de descarbonización y la visión del país es eliminar el carbón de la generación de energía para 2040. Sin embargo, en esta hoja de ruta no se establecieron objetivos de reducción o eliminación del gas (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

El sector eléctrico en Colombia es principalmente renovable gracias a las centrales hidroeléctricas, que tienen una participación del 66% (alrededor de 13 GW) de la capacidad instalada total del país. Sin embargo, para lograr un sistema de energía totalmente renovable, se necesita una reducción gradual del uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad y la masificación de las energías renovables no convencionales. El sector eléctrico colombiano podría eliminar los combustibles fósiles de su matriz de generación de energía eléctrica, pero hay varios obstáculos que debe superar:

En los últimos años, el desarrollo de proyectos hidroeléctricos a gran escala es cada vez más difícil debido a problemas sociales, técnicos y ambientales, que han detenido su ejecución en todo el país. A la fecha, solo se está construyendo un proyecto hidroeléctrico a gran escala: Hidroituango, el cual será la central hidroeléctrica más grande de Colombia con una capacidad instalada de 2,4 GW y generará el 17% de la energía del país. En abril de 2018, este proyecto sufrió un grave accidente durante su construcción que causó retrasos de más de 6 años, y generó una opinión pública negativa hacia la energía hidroeléctrica a gran escala. A partir de noviembre de 2023, solo 4 de las 8 turbinas están operando, y no hay una fecha clara de cuándo las 4 turbinas restantes (1,2 GW) estarán operativas.



INTRODUCCIÓN

La demanda de electricidad en Colombia ha crecido de manera constante a una tasa anual del 3% desde la pandemia del covid-19, mientras que los nuevos proyectos de generación y transmisión de energía han experimentado retrasos significativos. Según datos del Consejo Nacional de Operación, al país le hacen falta 4,6 GW de la capacidad renovable que debería estar operativa para 2023. La implementación de los proyectos renovables ha sido particularmente difícil en La Guajira, una región del norte de Colombia que tiene el mayor potencial eólico del país. Para 2023 debería haber 789 MW de energía eólica operativos, pero los proyectos han enfrentado complicaciones en cuanto a negociaciones y consultas previas con las comunidades indígenas que habitan la región. Para ilustrar la situación, en mayo de 2023 un proyecto eólico de 205 MW en La Guajira fue suspendido indefinidamente por sus promotores, debido a que las obras civiles se detuvieron más del 50% del tiempo por conflictos sociales con las comunidades cercanas.

En Colombia, las centrales de generación térmica existentes, junto con grandes centrales hidroeléctricas, proporcionan confiabilidad al sistema de energía eléctrica, especialmente durante El Niño - un fenómeno climático que trae altas temperaturas, causando sequías y una reducción de las precipitaciones en el país. En condiciones hidrológicas normales, la proporción de generación de energía hidroeléctrica puede alcanzar el 85% de la demanda de electricidad, pero durante El Niño, la proporción de energía hidroeléctrica puede caer al 50%. Esto significa que el clima y la hidrología, podrían afectar negativamente los esfuerzos de eliminación de combustibles fósiles en el país mientras la demanda de electricidad sigue creciendo, creando una situación difícil en cuanto a la confiabilidad del sistema eléctrico.

Considerando estos factores surge una pregunta: **¿Es posible eliminar los combustibles fósiles de la generación de energía eléctrica en Colombia para 2030?**

Este proyecto tiene como objetivo explorar el papel de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en Colombia, considerando escenarios favorables y desfavorables basados en condiciones económicas y políticas de la transición energética. También se evalúan los efectos de fuerzas externas y la aplicación de políticas específicas de eliminación de combustibles fósiles, para determinar el éxito de estas estrategias. El proyecto utiliza un modelo de dinámica de sistemas orientado a estudiar la evolución del sistema eléctrico de Colombia en diferentes condiciones.

Como resultado, este informe presenta señales para los tomadores de decisiones que sugieren, que una eliminación gradual de los combustibles fósiles para el año 2030, podría ser más factible de lo que se creía.

¿Puede Colombia eliminar los combustibles fósiles para 2030? Este proyecto explora las posibilidades y señala que es más posible de lo esperado.



RESUMEN EJECUTIVO - SEÑALES PARA LOS TOMADORES DE DECISIONES

El objetivo de este proyecto es explorar los posibles escenarios de salida de los combustibles fósiles en la generación de electricidad en Colombia. Esto se hace usando un modelo de dinámica de sistemas que determina el impacto de posibles escenarios a largo plazo en la transición energética del país, evaluando variables como la expansión de la capacidad instalada, las variaciones en los recursos energéticos y las decisiones de inversión por tecnología.

Se consideran tres escenarios basados en dos incertidumbres clave: la señal económica para el desarrollo de las energías renovables y la favorabilidad de las políticas de transición energética en Colombia. Los escenarios se definen como:

Escenario tendencial: Considera la tendencia de las condiciones económicas de Colombia en la última década, y las políticas de transición energética existentes.

Escenario favorable: Considera un fortalecimiento de la economía colombiana, un peso colombiano más fuerte y combustibles fósiles más costosos, que hacen que las renovables sean más competitivas. Las políticas de transición energética motivan la creación de nuevos negocios, la participación de los prosumidores y nuevos mercados de datos.

Escenario desfavorable: Considera una desaceleración de la economía colombiana, un peso colombiano más débil y combustibles fósiles más baratos (que también debilitan la economía de Colombia debido a que el país es altamente dependiente de las exportaciones de petróleo). Estas condiciones desmotivan la adopción de energías renovables. Además, considera que las actuales políticas de transición energética se aplican mal o no se implementan.

Estos escenarios se evalúan conjuntamente con factores críticos para el sector energético colombiano que incluyen: el futuro del proyecto Hidroituango, el desarrollo de la energía eólica en La Guajira, las condiciones climáticas extremas y el crecimiento de la demanda. Además, la evaluación incluye la implementación de políticas energéticas como la prohibición de nuevos proyectos de centrales térmicas, el desmantelamiento de centrales térmicas existentes, el forzamiento de una eliminación gradual de la capacidad instalada de térmicas (centrales existentes y nuevos desarrollos) y la implementación de un impuesto al carbono más alto.



A continuación, se presentan las principales señales y conclusiones de la simulación:

Bajo las políticas actuales, y suponiendo que no haya más retrasos en los proyectos renovables en construcción, las simulaciones sugieren que Colombia está en camino de eliminar gradualmente los combustibles fósiles en la generación de electricidad para 2030, aunque no implica desmontar la capacidad instalada de las plantas térmicas. Solo en el escenario desfavorable, donde hay una mayor demanda y pocos proyectos de generación distribuida, el gas se continúa utilizando después de 2030 y el carbón después de 2040.

El crecimiento de la demanda es la amenaza más relevante para lograr un sector eléctrico sin carbono para 2030. Si la demanda de electricidad en 2030 es un 25% superior a lo esperado, no será posible eliminar los combustibles fósiles. Se necesitan esfuerzos a nivel nacional en materia de eficiencia energética para frenar el crecimiento de la demanda y eliminar los combustibles fósiles de la generación de electricidad para 2030.

Si el desarrollo de la energía eólica en Colombia se vuelve inviable, la energía solar y las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas – PCHs – reemplazarán la falta de capacidad instalada. No habría sustitución de la energía eólica con combustibles fósiles.

La energía solar distribuida es una herramienta clave para lograr la eliminación del gas a 2030; el escenario favorable considera una adopción masiva de energía solar por parte de los usuarios finales, esto reduce la demanda de energía del mercado mayorista y aumenta la resiliencia del sistema. Sin embargo, una capacidad solar predominante puede crear retos para la atención de los picos de demanda en horas de la noche.

La finalización de la totalidad del proyecto hidroeléctrico Hidroituango es necesaria para alcanzar una eliminación gradual de los combustibles fósiles a 2030. En el caso improbable de que el proyecto no se complete, la energía de Hidroituango será reemplazada por gas a corto plazo y carbón a largo plazo porque la energía eólica y solar no pueden proporcionar la confiabilidad necesaria.

Considerando el peor de los casos, donde el escenario desfavorable enfrenta un aumento de la demanda de energía, condiciones hidrológicas bajas, un desarrollo eólico más costoso en La Guajira y el proyecto Hidroituango incompleto, los combustibles fósiles representarán el 19% de la generación de energía para 2030, con el 11% de gas y el 8% de carbón.

7

Forzar el desmantelamiento de las centrales térmicas para 2030, requerirá el desarrollo de 11 a 15 GW de energía renovable para 2035, una expansión que representa más de la mitad de la capacidad instalada total del país en 2023.

La aplicación del impuesto sobre el carbono a 2030 solo es relevante para el escenario desfavorable. El escenario tendencial y el escenario favorable no se ven afectados por ella, ya que alcanzan la eliminación de los combustibles fósiles en 2030. En el escenario desfavorable, la implementación de un mayor impuesto al carbono elimina el carbón antes, pero extiende la participación del gas más allá de 2030.

9

Los eventos de baja hidrología causados por el fenómeno de El Niño aumentarán la participación de la generación de energía con combustibles fósiles para los diferentes escenarios y retrasarán su eliminación. Esta situación es particularmente evidente en el escenario desfavorable.

Las señales anteriormente descritas sugieren que la generación del sector eléctrico sin emisiones es factible y podría ocurrir en la próxima década, siempre y cuando existan las condiciones técnicas y regulatorias favorables para promover la inversión y el desarrollo de energías renovables a gran escala.

Considerando que los costos de generación pueden conducir naturalmente a un abandono gradual del gas, la estrategia climática del gobierno podría ser más ambiciosa. Una sustitución progresiva del gas en el sector eléctrico es posible y permitiría que el gas apoye la descarbonización de sectores más retadores como el residencial, la industria y el transporte.

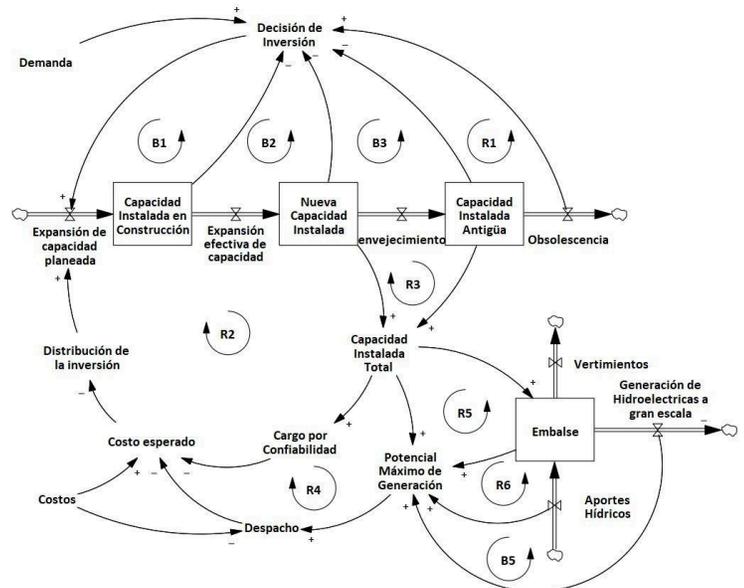
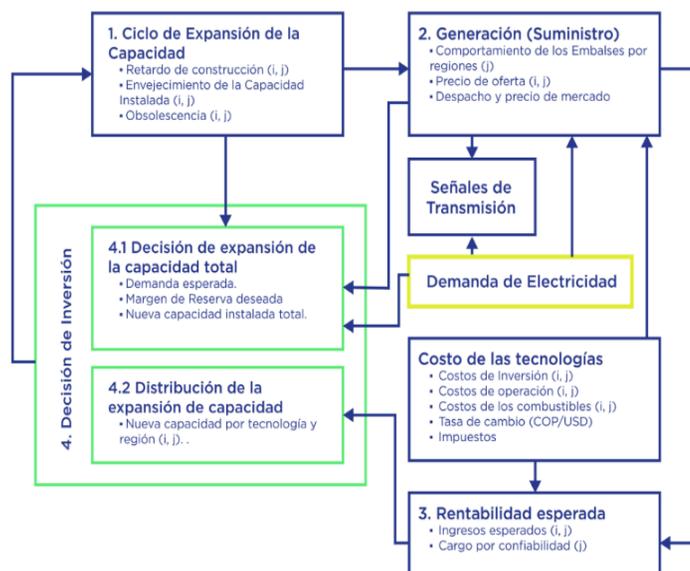


METODOLOGÍA

Descripción del modelo

El modelo de simulación utilizado para este estudio fue desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia por Parra et. al (2023) para cuantificar los escenarios a 2050 para la transición del sector eléctrico en Colombia. Usando este modelo se realiza simulación de los cambios en la matriz de capacidad instalada total y generación de electricidad hasta 2050. El modelo se basa en dinámica de sistemas, una metodología para el estudio de sistemas complejos que se ha utilizado para el análisis y toma de decisiones en problemas relacionados con el sector de la generación de electricidad y el mercado de la electricidad (Leopold, 2016). El enfoque de modelación considera los ciclos de expansión de la capacidad, las variaciones en los insumos de agua, y las decisiones de inversión de capacidad y tecnología para evaluar el impacto de posibles escenarios a largo plazo en la transición energética en Colombia.

El modelo incluye 7 tecnologías de generación de energía: hidroeléctricas a gran escala, pequeñas centrales hidroeléctricas, generación solar, eólica y centrales térmicas a carbón, gas y combustibles líquidos. Las simulaciones se realizaron utilizando un paso de simulación mensual y cubren un horizonte temporal de 2001 a 2050. El diagrama de bloques que representa las principales interacciones del modelo y el diagrama de bucle causal se muestran en la **Figura 1 y la Figura 2, respectivamente.**



▲ **Figura 2**
Diagrama de bucle causal (Parra et. al, 2023).

◀ **Figura 1**
Diagrama de bloques del modelo (Parra et. al, 2023).

METODOLOGÍA

Descripción del modelo

El modelo contiene cuatro bloques principales: ciclo de expansión de la capacidad, generación, rentabilidad esperada y decisión de inversión. El primer bloque, el ciclo de expansión de la capacidad, experimenta crecimiento a partir de la construcción de nuevas plantas y reducción de tecnología obsoleta. La generación de energía, el segundo bloque, depende de la capacidad instalada, el comportamiento del reservorio y el precio de oferta por tecnología. La capacidad instalada limita la cantidad de energía que cada planta puede generar y el clima también. Por ejemplo, durante los períodos hidrológicos bajos u otros fenómenos climáticos, la generación hidroeléctrica disminuye. Además, las distintas tecnologías de generación ofrecen energía a diferentes precios debido a las diferencias de inversión, operación y costo del combustible. La generación depende de estos precios de oferta de electricidad; el despacho de energía eléctrica prioriza tecnologías con precios más bajos, garantizando la cobertura de la demanda.

El tercer bloque, la rentabilidad esperada, se basa en los ingresos previstos derivados de la cantidad de electricidad vendida y el precio pagado a los productores para suministrar energía al sistema. La rentabilidad esperada sirve como señal para los inversionistas. Si los proyectos de generación de electricidad indican márgenes de rentabilidad favorables, los inversionistas deciden construir plantas que amplíen la capacidad total del sistema (bloque 4).

Este modelo se utilizó para evaluar los escenarios de eliminación del gas en Colombia, considerando tres escenarios de adopción (tendencial, favorable y desfavorable), el impacto de las fuerzas externas, la implementación de políticas de eliminación de combustibles fósiles y los cambios en la demanda.

El modelo de simulación utiliza las proyecciones de la demanda de electricidad de la Unidad de Planeación Minero-Energética -UPME-, que estiman las tendencias a largo plazo del consumo de energía a nivel nacional, utilizando información sobre la demanda histórica y las expectativas de crecimiento económico de Colombia. Para evaluar los cambios en la demanda de electricidad, la simulación también considera las proyecciones presentadas por XM (el operador del mercado eléctrico) ya que consideran un mayor crecimiento de la demanda que crea una condición más difícil para la eliminación de los combustibles fósiles.

La rentabilidad esperada de los proyectos de generación de electricidad es la señal que determina la inversión en nuevas plantas.

METODOLOGÍA

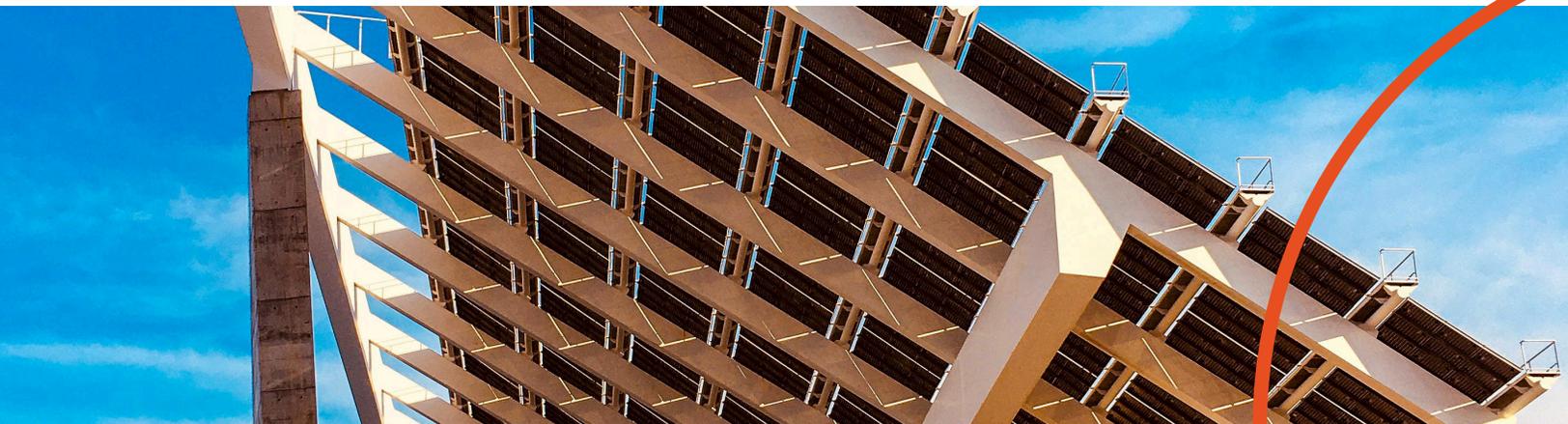
Limitaciones del modelo

El modelo asigna la capacidad necesaria para satisfacer la demanda de energía en diferentes momentos, por lo que no es capaz de considerar la seguridad del suministro.

La asignación de capacidad se realiza de forma agregada, y no tiene en cuenta las restricciones ambientales y técnicas que un proyecto en particular puede enfrentar.

El modelo no considera la expansión del sistema de transmisión y asume que los requisitos de transmisión para los proyectos están disponibles.

El modelo considera las fuentes de energía actuales del sector energético colombiano: combustibles fósiles, hidroeléctrica, solar y eólica. No considera otras fuentes de generación de energía renovable como la biomasa y la geotérmica, ya que se espera que su participación en la generación de electricidad en Colombia sea marginal. Además, no considera tecnologías como la energía nuclear de nueva generación o la captura y almacenamiento de carbono, ya que no se espera que estas tecnologías estén comercialmente listas en Colombia antes de 2030.



El modelo tiene un paso temporal mensual y no considera la disponibilidad horaria de los recursos ni la diferencia de limitaciones de generación durante el día. En este sentido, no puede evaluar el suministro de energía durante la noche ni el cumplimiento de la demanda pico horaria. Por lo tanto, el modelo no puede simular alternativas de almacenamiento de energía o estrategias de flexibilidad para superar estos problemas, ni identificar eventos en los cuales no se satisface la demanda.



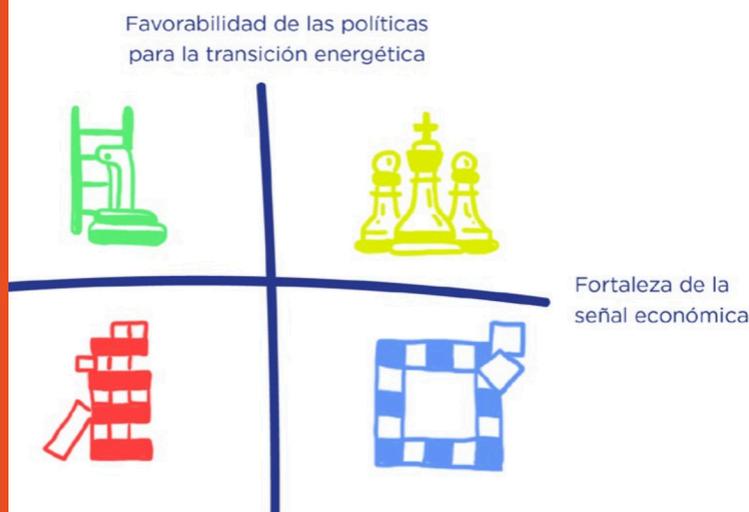
METODOLOGÍA

Descripción de los escenarios

Los escenarios utilizados en este proyecto son una adaptación de los definidos en Energética 2030 por Ortega, et al. (2019). Energética 2030 es un programa de investigación gestionado por el Ministerio de Ciencia de Colombia y financiado por el Banco Mundial que tuvo como objetivo definir estrategias de transformación para el sector energético colombiano a 2030. Estos escenarios se construyeron a través de un ejercicio prospectivo en el que participaron más de 50 académicos, expertos y funcionarios de instituciones y empresas clave del sector energético colombiano.

El proceso de construcción de los escenarios se basó en la metodología de análisis de escenarios de Schwartz (1996). Este método identifica las incertidumbres más importantes sobre el futuro y luego realiza un análisis de impacto cruzado para cuantificar cómo cada incertidumbre impacta a las demás. Las incertidumbres que son menos impactadas y a su vez mayor impacto sobre las demás se definen como incertidumbres críticas y se ubican en un plano cartesiano para definir los ejes de los escenarios. Las incertidumbres críticas resultantes fueron: la favorabilidad de la señal económica para el desarrollo de energías renovables y la favorabilidad de las políticas para la transición energética (Figura 3).

Figura 3 Escenarios energéticos de Energetica 2030 (Ortega et. al, 2022).



El eje "favorabilidad de la señal económica" considera los precios internacionales de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) y el diferencial entre las tecnologías basadas en combustibles fósiles y los precios de las alternativas renovables. El eje "favorabilidad de las políticas de transición energética" considera aquellas decisiones de política pública que afectan la descarbonización, descentralización, desregulación, democratización y digitalización del sector energético. (Ortega et.al, 2019).

METODOLOGÍA

Descripción de los escenarios

A partir de los ejes se determinan cuatro escenarios (Figura 3): Ajedrez (arriba a la derecha) con políticas de transición energética favorables y señales económicas favorables, Escaleras y Serpientes (arriba a la izquierda) con políticas de transición energética favorables y señales económicas desfavorables, Monopolio (abajo a la derecha) con políticas de transición energética desfavorables y señales económicas favorables y Jenga (abajo a la izquierda) con políticas de transición energética desfavorables y señales económicas desfavorables. Adicional a estos escenarios, se considera un escenario base denominado BAU (Business As Usual en inglés) que incluye las características del contexto económico y político actual.

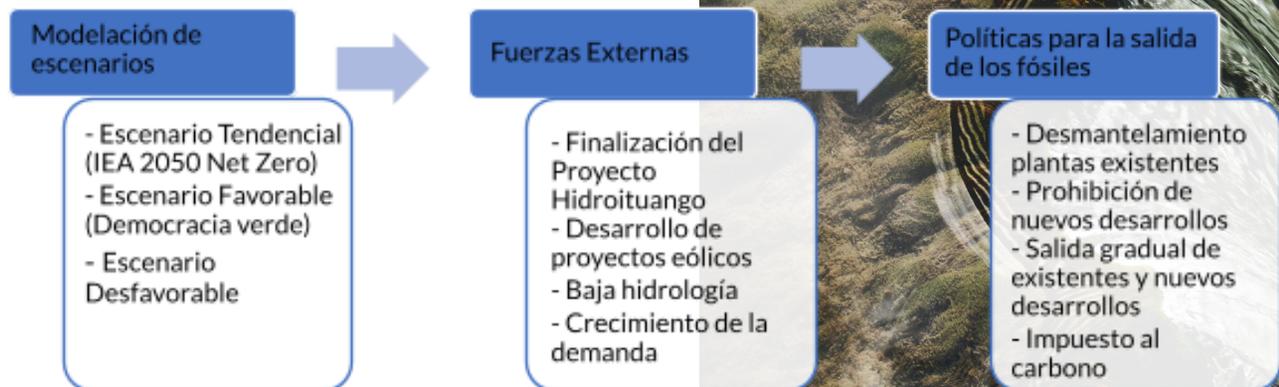
Para evaluar la eliminación de combustibles fósiles en este informe, se considera una versión simplificada de los escenarios definidos por Energética 2030: el escenario BAU, como referencia del contexto eléctrico, se denomina Escenario Tendencial, el escenario Ajedrez se denomina Escenario Favorable y el escenario Jenga se denomina Escenario Desfavorable. La descripción de los 3 escenarios elegidos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 1. Características de los escenarios utilizados en las simulaciones.

Características del escenario	Escenario Tendencial	Escenario Favorable	Escenario Desfavorable
Señal económica	Sigue la tendencia de las condiciones económicas de Colombia en la última década	Considera un peso colombiano más fuerte. La energía renovable no convencional se vuelve más barata que la generación térmica	Considera un peso colombiano más débil. Los bajos precios de los combustibles fósiles desmotivan la adopción de energías renovables y debilitan la economía
Señales de política	Considera las políticas de transición energética existentes en Colombia.	Las políticas de transición energética motivan nuevos negocios, la participación de prosumidores y nuevos mercados de datos.	Las actuales políticas de transición energética son mal implementadas o eliminadas.
Escenarios similares	Hoja de ruta para el sector energético mundial presentado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA en inglés) para que los países alcancen emisiones cero a 2050 (IEA, 2021) y Escenario BAU en Energética 2030 (Ortega, et. al, 2019).	Escenario de Democracia Verde presentado en la Hoja de Ruta hacia la electricidad 100% renovable a 2030 (Dyner et al., 2022) y Escenario Ajedrez en Energética 2030 (Ortega, et. al, 2019).	Escenario Jenga en Energética 2030 (Ortega, et. al, 2019).
Recursos Energéticos Distribuidos (DERs)	No considera explícitamente los DERs	Los DERs alcanzan una capacidad instalada de 9,1 GW de energía solar fotovoltaica para 2030	Los DERs alcanzan una capacidad instalada de 1,13 GW de energía solar fotovoltaica para 2030

Simulación

La simulación se divide en tres etapas: La primera etapa se centra en los escenarios base: tendencial, favorable y desfavorable. La segunda etapa considera el impacto de las fuerzas externas más críticas para el sistema energético, es decir, la finalización de Hidroituango, las dificultades en el desarrollo de la energía eólica, la hidrología desfavorable debido al fenómeno climático El Niño y el aumento en la demanda de energía en el país. Finalmente, la tercera etapa considera la implementación de políticas específicas para la eliminación gradual de los combustibles fósiles que incluye: el desmantelamiento de plantas térmicas existentes, la prohibición de nuevos proyectos de generación térmica, el forzamiento de una eliminación gradual de la capacidad instalada de térmicas (centrales existentes y nuevos desarrollos) y la implementación de un impuesto al carbono. La Figura 4 muestra el esquema de simulación y la Tabla 2 describe las fuerzas externas y políticas evaluadas.



▲ **Figura 4.** Metodología de simulación

Tabla 2. Descripción de fuerzas externas y políticas de eliminación utilizadas en las simulaciones.

Fuerzas externas		Políticas de eliminación de combustibles fósiles	
Proyecto Hidroituango	Sólo la mitad (1200 MW) de la capacidad instalada prevista del proyecto (2400 MW) entra en operación comercial	Desmantelamiento de centrales térmicas existentes	El modelo considera la reducción gradual de la capacidad térmica instalada
Proyectos de energía eólica	Los proyectos de energía eólica no entran en funcionamiento por su inviabilidad ambiental y social.	Prohibición de nuevos desarrollos	El modelo considera una prohibición de nueva capacidad de generación térmica.
Baja hidrología	El fenómeno de El Niño causa baja hidrología y afecta la generación de energía hidroeléctrica.	Salida gradual de combustibles fósiles	El modelo considera el desmantelamiento de plantas de generación térmica existentes y la prohibición de nuevas plantas.
Crecimiento de la demanda	Se utiliza una proyección de demanda mayor, calculada por XM en lugar de la de la UPME. La demanda de XM es 25% superior a la de la UPME para el año 2030.	Impuesto sobre el carbono	El modelo aumenta los costos de la generación de energía térmica al agregar un impuesto al carbono por kWh generado.

Para cada fuerza externa y política, los 3 escenarios fueron evaluados considerando la participación del gas y del carbón en la generación eléctrica. Luego, fueron comparados con los escenarios base. Los resultados se presentan en la Tabla 3 y las principales señales para los tomadores de decisiones se presentan en las siguientes secciones.

METODOLOGÍA

Simulación

Fuerzas Externas	Escenario	Generación de energía con gas 2030 (GWh)	Diferencia comparada con los escenarios base (2030)	Último año de generación con gas	Diferencia comparada con los escenarios base (meses)	Último año de generación con carbón	Diferencia comparada con los escenarios base (meses)
Escenarios base	Tendencial	68,61		sep-31		nov-25	
	Favorable	0,00		feb-24		sep-24	
	Desfavorable	415,81		ago-32		-	
Proyecto Hidroituango	Tendencial	554,76	709%	sep-32	12	-	
	Favorable	0,00		feb-24	0	-	
	Desfavorable	714,33	72%	ago-32	0	-	
Incremento en el costo de la energía eólica	Tendencial	64,58	-6%	sep-31	0	nov-25	0
	Favorable	0,00		feb-24	0	sep-24	0
	Desfavorable	408,33	-2%	ene-32	-8	nov-26	
No hay nuevos proyectos eólicos	Tendencial	89,72	31%	sep-31	0	feb-26	3
	Favorable	0,00		sep-24	7	nov-24	2
	Desfavorable	416,61	0%	ene-32	-8	ene-27	
Baja hidrología	Tendencial	204,82	199%	nov-31	2	-	
	Favorable	0,00		abr-25	14	abr-25	7
	Desfavorable	619,46	49%	abr-33	8	-	
Crecimiento de la demanda	Tendencial	726,41	959%	sep-32	12	-	
	Favorable	721,13	-	oct-32	105	-	0
	Desfavorable	726,39	75%	sep-32	1	-	
"Apagón"	Tendencial	658,39	860%	sep-32	12	abr-33	90
	Favorable	184,73		nov-31	94	may-25	8
	Desfavorable	740,94	78%	ago-32	0	abr-33	
"Apagón" y crecimiento de la demanda	Tendencial	846,50	1134%	sep-32	12	-	
	Favorable	846,81		feb-24	0	sep-24	0
	Desfavorable	846,14	103%	ene-32	-8	nov-26	
Políticas de eliminación de combustibles fósiles	Escenario	Generación de energía con gas 2030 (GWh)	Diferencia comparada con los escenarios base (2030)	Último año de generación con gas	Diferencia comparada con los escenarios base (meses)	Último año de generación con carbón	Diferencia comparada con los escenarios base (meses)
Escenarios base	Tendencial	68,61		sep-31		nov-25	
	Favorable	0,00		feb-24		sep-24	
	Desfavorable	415,81		ago-32		-	
Desmantelamiento de centrales térmicas existentes	Tendencial	0,00	-100%	feb-25	-81	nov-25	0
	Favorable	0,00		feb-24	0	sep-24	0
	Desfavorable	24,11	-94%	ene-31	-20	nov-30	
Prohibición de nuevos desarrollos	Tendencial	64,90	-5%	sep-31	0	nov-25	0
	Favorable	0,00		feb-24	0	sep-24	0
	Desfavorable	404,91	-3%	ene-32	-8	nov-26	
Salida gradual de combustibles fósiles	Tendencial	0,00		feb-25	-81	nov-25	0
	Favorable	0,00		feb-24	0	sep-24	0
	Desfavorable	0,10	-100%	sep-30	-24	sep-30	
Impuesto sobre el carbono	Tendencial	68,58	0%	sep-31	0	ene-25	-11
	Favorable	0,00		feb-24	0	sep-24	0
	Desfavorable	415,78	0%	-		-	

Tabla 3. Participación del gas y el carbón en la generación de electricidad para diferentes escenarios.



Con las políticas actuales, y suponiendo que no se produzcan más retrasos en los proyectos renovables en construcción, Colombia está en camino de eliminar progresivamente el gas en la generación de energía para 2030.

La simulación muestra que, en las próximas décadas, las energías renovables tendrán una mayor participación en la capacidad instalada del sistema eléctrico de Colombia (Figura 5). En los escenarios tendencial y favorable hay una disminución en la capacidad instalada de combustibles fósiles a lo largo del tiempo. Sólo en el escenario desfavorable se añade capacidad de carbón entre los años 2040 y 2050.

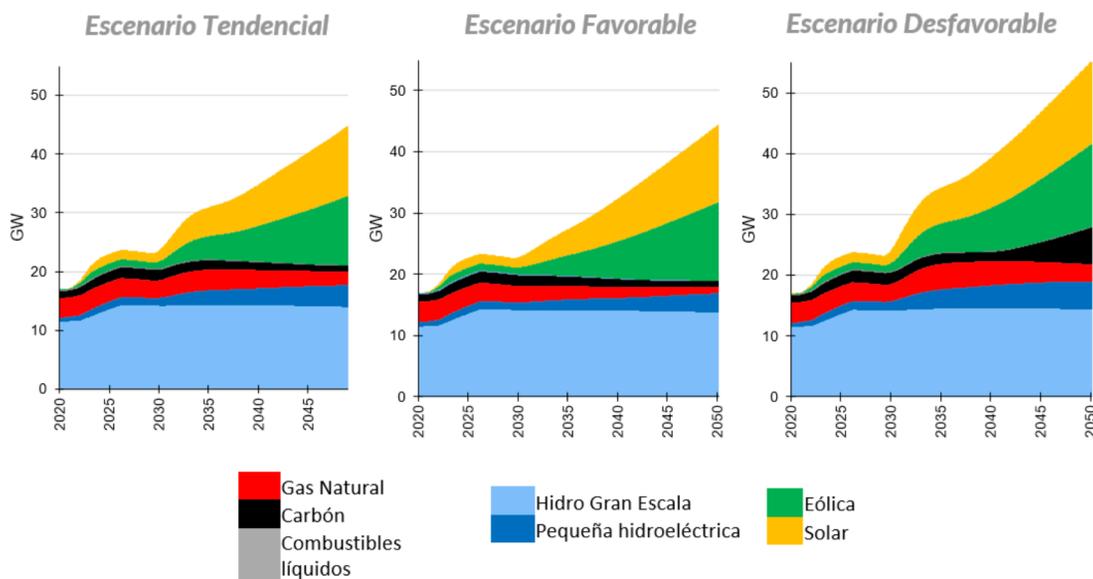


Figura 5. Capacidad instalada de escenarios base

Para todos los escenarios, la matriz de generación eléctrica sigue estando compuesta predominantemente por energía hidroeléctrica a gran escala (Figura 6). En el escenario tendencial, se evidencia que la generación de energía a carbón y gas se eliminará gradualmente en 2025, sin una política específica (aunque hay un corto período de generación a gas entre 2030 y 2035).

En el escenario favorable, la eliminación gradual de los combustibles fósiles, tanto gas como carbón, se producirá en 2025 y se extenderá durante todo el período de simulación. En el escenario desfavorable, el sistema depende de la generación de gas entre 2027 y 2033. Aunque posteriormente se produce una eliminación gradual de los combustibles fósiles, la generación eléctrica con carbón reaparece en 2040, ya que los precios del carbón son bajos y se vuelve nuevamente competitivo en el mercado.

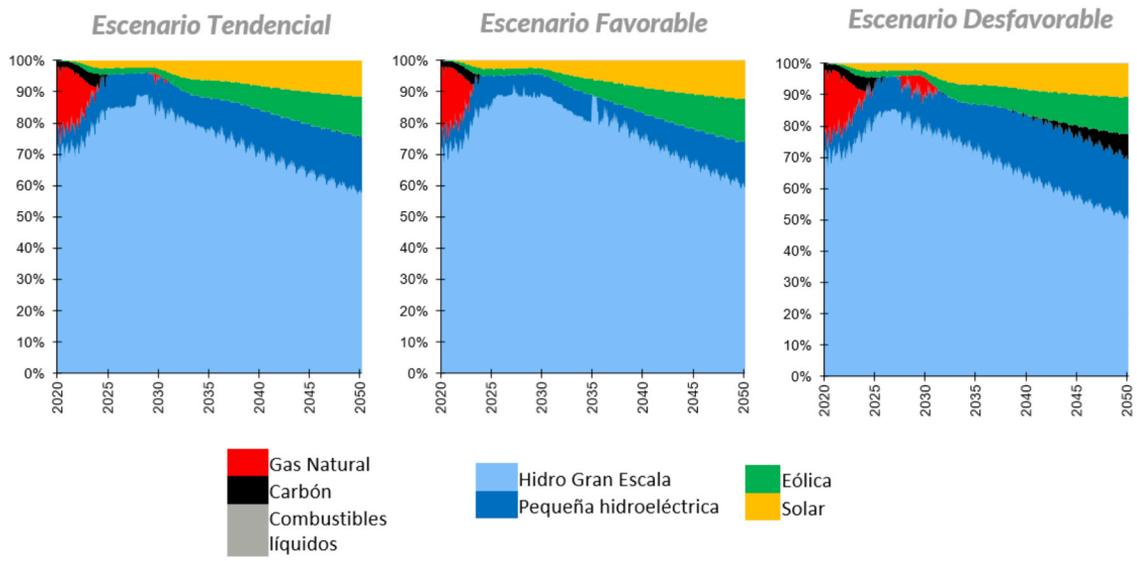
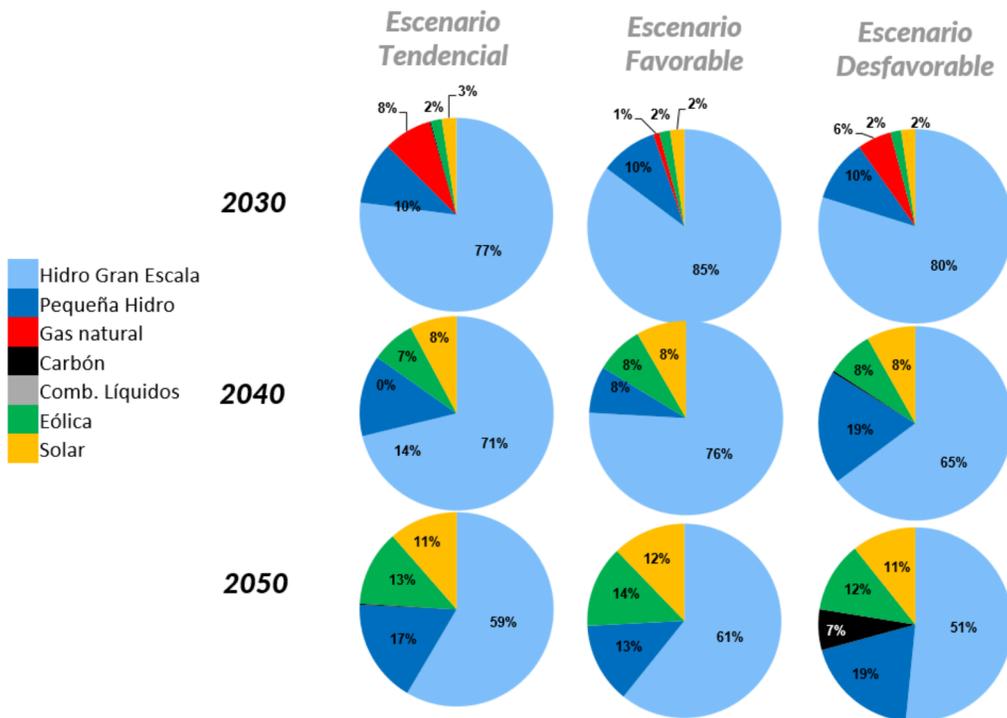


Figura 6. Matriz de generación de energía de los escenarios base



Bajo las condiciones regulatorias y de mercado actuales, Colombia está en camino de eliminar gradualmente el gas de la generación de energía eléctrica para 2030 (Figura 7). Sólo en el escenario desfavorable se utiliza gas más allá de 2030, y el carbón reaparece más allá de 2040.

Figura 7. Porcentajes de generación de energía en los escenarios base.

La energía solar distribuida es una herramienta clave para lograr la eliminación gradual de los combustibles fósiles para 2030.

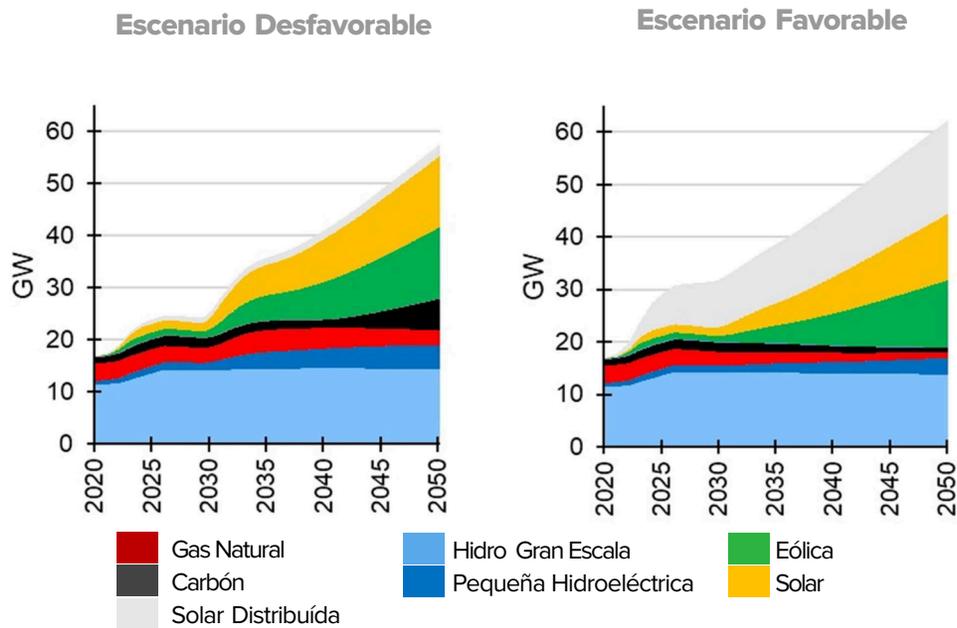


Figura 8. Capacidad instalada incluyendo solar distribuida para los escenarios Favorable y Desfavorable.

En la definición de los escenarios, el escenario favorable cuenta con fuertes políticas y señales económicas que promueven la implementación de Recursos Energéticos Distribuidos (DER por sus siglas en inglés), alcanzando una capacidad instalada de 9,1 GW de energía solar en techos para 2030. El escenario desfavorable carece de esas políticas y señales económicas, lo que se convierte en una barrera para la implementación de DER, alcanzando una capacidad instalada de 1,13 GW de energía solar fotovoltaica en techos para 2030 (Figura 8).

Los DER tienen un papel importante en los escenarios para alcanzar la eliminación gradual de los combustibles fósiles. Las simulaciones muestran que, gracias a la adopción masiva de DER, el escenario favorable tiene más resiliencia para enfrentar fuerzas externas sin necesidad de utilizar combustibles fósiles, a diferencia del escenario desfavorable que es más vulnerable a fuerzas externas y tarda más en alcanzar la eliminación gradual de los combustibles fósiles.

Los resultados indican que la energía solar distribuida es clave para lograr la eliminación gradual de los combustibles fósiles a 2030, ya que reduce la demanda de energía del mercado mayorista y aumenta la resiliencia del sistema eléctrico.

El crecimiento de la demanda es la amenaza más relevante para lograr un sector eléctrico sin emisiones de carbono para 2030.

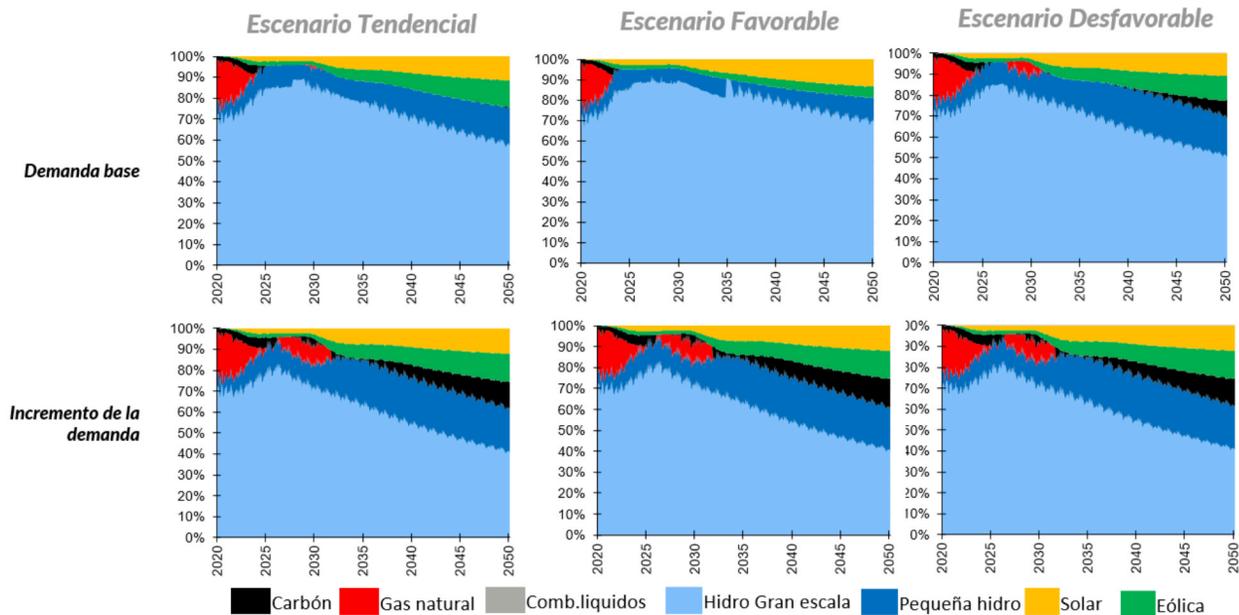


Figura 9. Generación de energía con crecimiento de la demanda para todos los escenarios.

El modelo base considera la demanda eléctrica según la proyección oficial de la Unidad de Planeación Minero-Energética -UPME-. Sin embargo, estas proyecciones son un 25% inferiores a las presentadas por el operador del mercado XM, que considera un mayor crecimiento económico y en consecuencia una mayor demanda energética.

Si la demanda de energía de Colombia crece de la forma presentada por XM, el país no alcanzaría una eliminación de los combustibles fósiles en ningún escenario. Habría una mayor participación de gas entre 2025 y 2035, luego el carbón aumentaría progresivamente hasta 2050, principalmente por la disminución de su precio de mercado.

Además, las pequeñas centrales hidroeléctricas tendrían un aumento significativo para satisfacer la demanda (Figura 9).

El crecimiento de la demanda es la amenaza más importante para lograr la eliminación gradual de los combustibles fósiles para 2030. Por eso, es fundamental aumentar esfuerzos nacionales en eficiencia energética para controlar el crecimiento de la demanda y lograr una generación sin emisiones de carbono en el mediano plazo.

La finalización de la totalidad de Hidroituango (2400 MW) es necesaria para alcanzar la eliminación gradual de los combustibles fósiles en 2030.

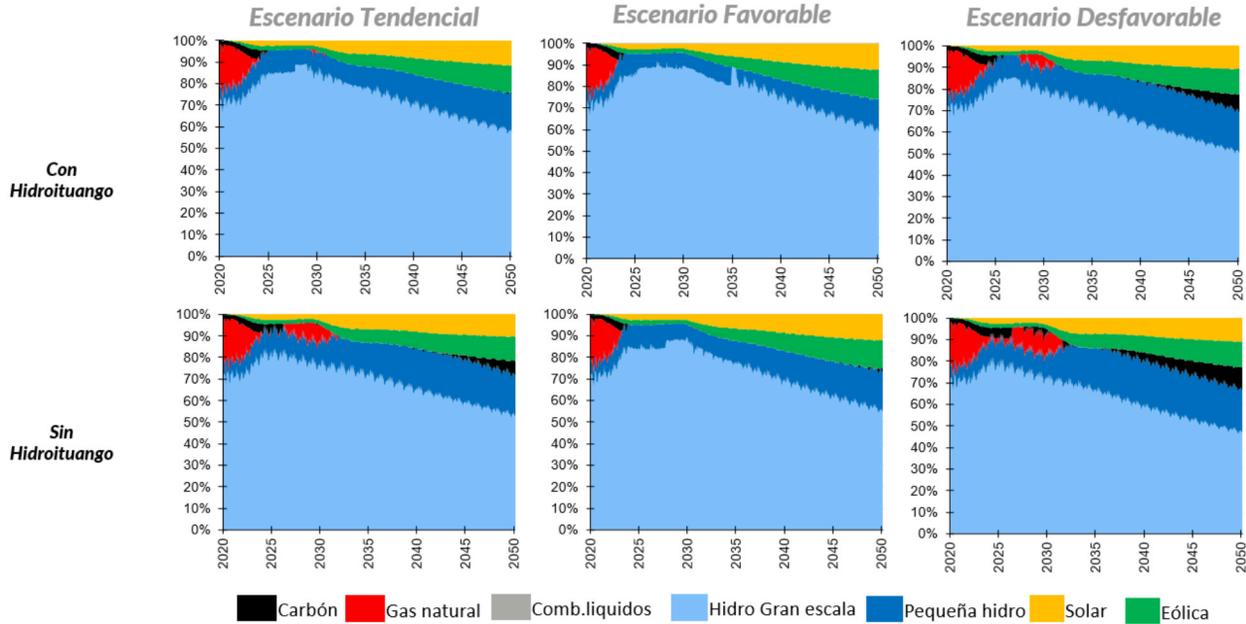


Figura 10. Generación de energía sin el proyecto Hidroituango para todos los escenarios

Hidroituango es actualmente el proyecto hidroeléctrico a gran escala más importante de Colombia, ya que cubrirá el 17% de la demanda energética actual del país. Este proyecto ha enfrentado importantes retrasos durante su construcción. Para 2022 se esperaba que el proyecto tuviera una capacidad instalada operativa de 2400 MW con 8 turbinas, sin embargo, para finales de 2023 solo la mitad del proyecto (1200 MW) está operativa. Actualmente, el proyecto enfrenta incertidumbres en la construcción y contratación de las otras 4 turbinas necesarias para completar la capacidad instalada.

El modelo base considera que la totalidad de Hidroituango está terminada, pero se realizó un análisis de sensibilidad considerando que solo la mitad del proyecto (1200 MW) se encuentra en pleno funcionamiento. En este caso, tanto en el escenario tendencial como en el desfavorable, el uso de gas aumenta entre 2025 y 2030 en la matriz energética.

Además, el carbón reaparece más allá de 2035. En el escenario favorable, la eliminación de los combustibles fósiles se alcanza a pesar de la menor capacidad instalada de Hidroituango gracias a la participación de la energía solar distribuida (Figura 10).

Estos resultados sugieren que la finalización de la totalidad de Hidroituango es necesaria para alcanzar la eliminación gradual del gas para 2030. En el caso improbable de que el proyecto no se complete, la energía del proyecto será reemplazada por gas en el corto plazo y carbón en el largo plazo ya que la energía eólica y solar no pueden proporcionar la confiabilidad necesaria.

Si el desarrollo de la energía eólica en Colombia se vuelve inviable, la energía solar y las pequeñas centrales hidroeléctricas reemplazarán la capacidad instalada faltante

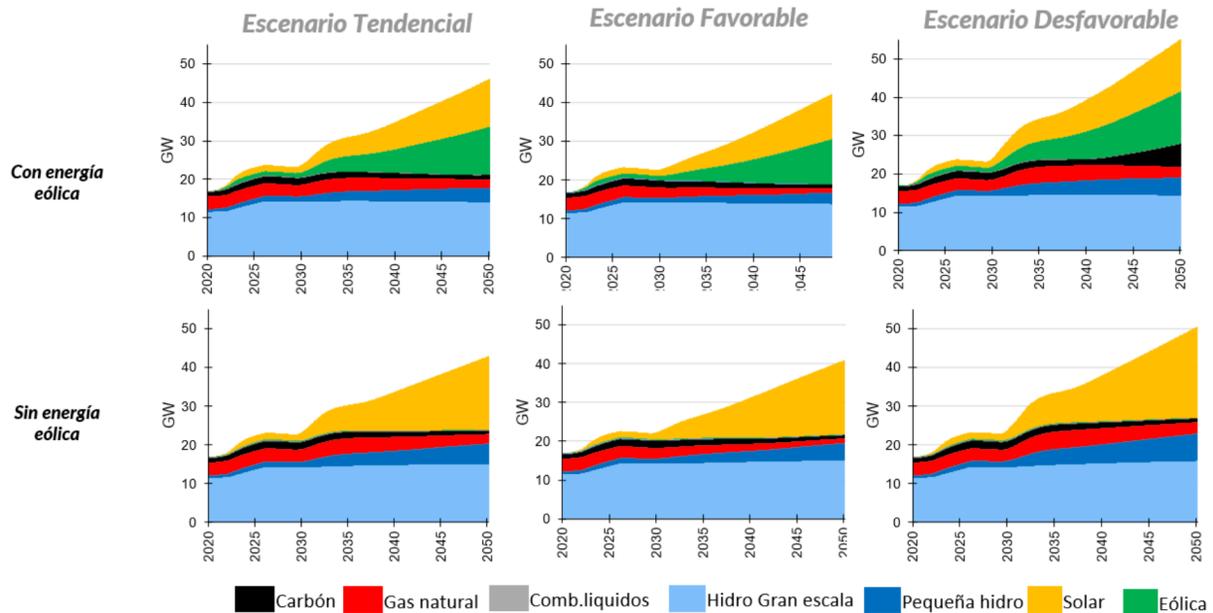


Figura 12. Capacidad instalada sin proyectos de energía eólica para todos los escenarios

La Guajira es un departamento del norte de Colombia con potencial para la generación de energía eólica debido a sus favorables condiciones geográficas y climáticas. Empresas nacionales e internacionales han mostrado gran interés en la instalación de parques eólicos en La Guajira, convirtiéndolo en un territorio clave para la transición energética del país en términos de generación de energía renovable. Sin embargo, la implementación de los proyectos ha enfrentado enormes desafíos relacionados con las consultas previas que deben realizarse con las comunidades indígenas Wayúu que habitan estos territorios y los retrasos en la construcción de las líneas de transmisión para llevar esta energía al resto del país.

El modelo base considera que el potencial eólico de La Guajira podría aprovecharse en un futuro próximo, pero un análisis de sensibilidad considera que no se logran construir estos proyectos en Colombia, incluidos los que actualmente tienen contratos asignados mediante subastas de energía.

Sin la posibilidad de desarrollar proyectos eólicos, la energía solar tendrá una mayor participación en la capacidad instalada en todos los escenarios y hay un aumento de la hidroeléctrica a pequeña escala a partir de 2030 (Figura 12). En el escenario tendencial y favorable, no hay variación significativa en la capacidad instalada de combustibles fósiles, a diferencia del escenario desfavorable en el que tener más energía solar e hidroeléctrica a pequeña escala reduce la capacidad instalada de carbón para 2050.

Esto sugiere que, en el caso de que el desarrollo de la energía eólica en Colombia resulte inviable debido a los problemas sociales, ambientales y técnicos, la capacidad instalada podría ser reemplazada por energía solar y pequeñas hidroeléctricas. No habría sustitución de la energía eólica con combustibles fósiles.

En el peor de los casos, los combustibles fósiles representarán el 19% de la generación de energía en 2030

Escenario desfavorable

2030

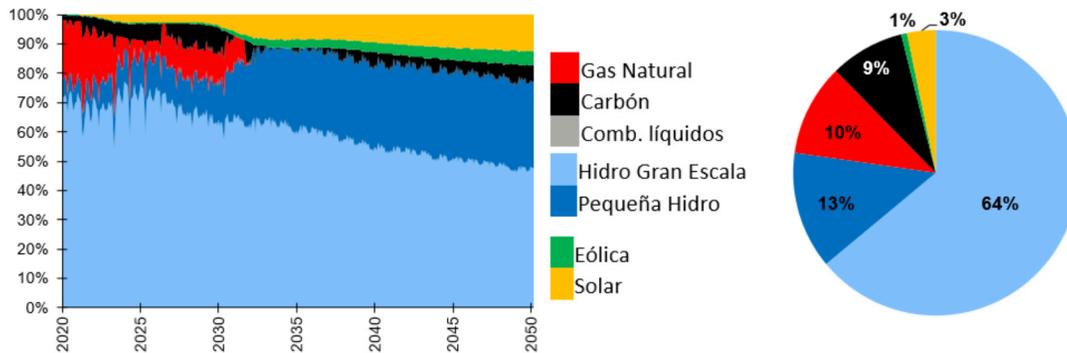


Figura 13. Generación de energía en el escenario desfavorable considerando el impacto de todos los forzamientos externos.

Colombia puede enfrentar una tormenta perfecta en el caso muy improbable de que varias cosas ocurran al tiempo:

- El proyecto Hidroituango no está completamente terminado.
- Los problemas sociales, ambientales y técnicos aumentan el costo del desarrollo de la energía eólica.
- Hay un aumento en la demanda de energía.
- Hay baja hidrología debido a la presencia de El Niño.

Se configuraría una situación muy crítica si todas estas condiciones se dieran al mismo tiempo en el escenario desfavorable. En este caso, la eliminación de los combustibles fósiles no se alcanza en ningún año y hay una participación significativa y amplificada de las centrales térmicas, que utilizan predominantemente gas hasta 2030 (Figura 13). Después de 2030, se reduce la participación de las centrales térmicas, se elimina progresivamente el gas y el porcentaje restante de térmicas utiliza carbón para la generación de energía.

Considerando el peor escenario, los combustibles fósiles alcanzan el 19% de la generación de energía para 2030, representado por un 10% de gas y un 9% de carbón, comparado con el escenario base tendencial que solo tiene un 8% de la generación de energía con térmicas de gas en el mismo año.

Forzar una eliminación gradual de la capacidad térmica para 2030 requerirá el desarrollo de 11 a 15 GW de energía renovable para 2035

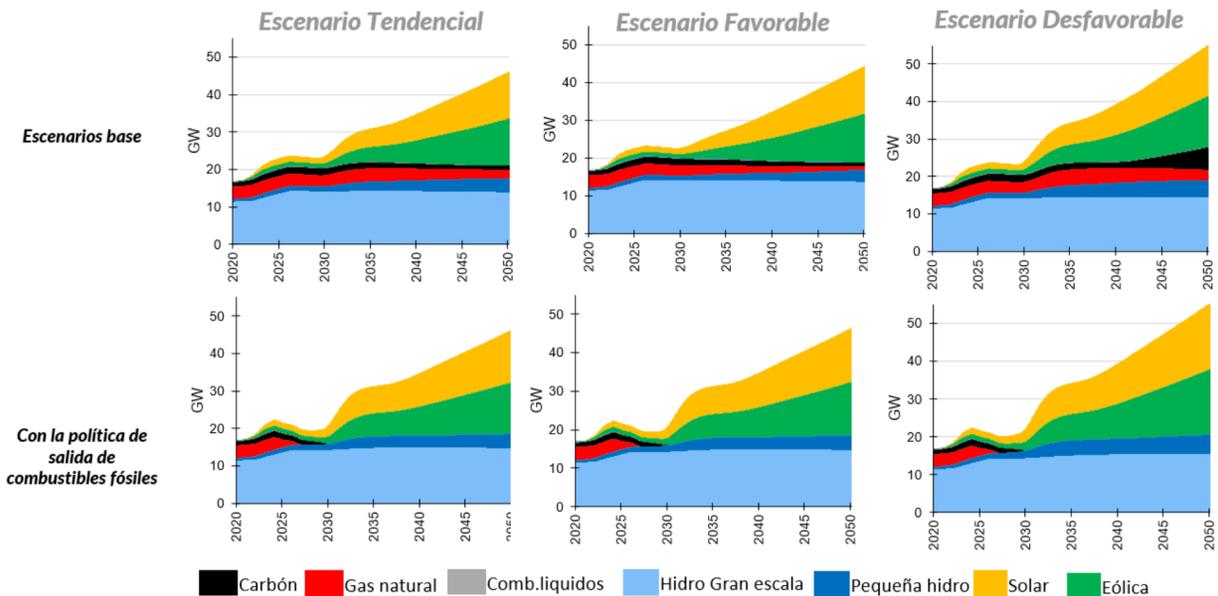


Figura 14. Capacidad instalada con política de eliminación progresiva de combustibles fósiles para todos los escenarios.

Uno de los posibles caminos para alcanzar la eliminación gradual de los combustibles fósiles es forzar el desmantelamiento de las centrales térmicas existentes y prohibir la entrada de nuevos proyectos térmicos. Esta política pública se evalúa utilizando el modelo base.

Si la capacidad de combustibles fósiles se elimina gradualmente para 2030, la capacidad energética se compensará principalmente con energía solar y eólica (Figura 14), que requerirá un desarrollo masivo entre 11 GW y 15 GW de energías renovables para 2035. Eso representa un 50% adicional de la capacidad instalada total que se tiene en el escenario base, y obliga a un fuerte aumento de la capacidad entre 2030 y 2033. Esta es una situación muy desafiante para Colombia, ya que requerirá una expansión equivalente del 59% al 78% de la capacidad instalada de renovables que tiene el país a 2023.

Si Colombia implementa este tipo de política de eliminación gradual de los combustibles fósiles, debería centrarse en permitir que las condiciones regulatorias y de mercado promuevan un impulso en el desarrollo de energías renovables a gran escala para evitar afectar la confiabilidad del sistema energético.

En el escenario desfavorable, la implementación de un impuesto más alto al carbono eliminaría el carbón antes, pero podría extender la participación del gas más allá de 2030.

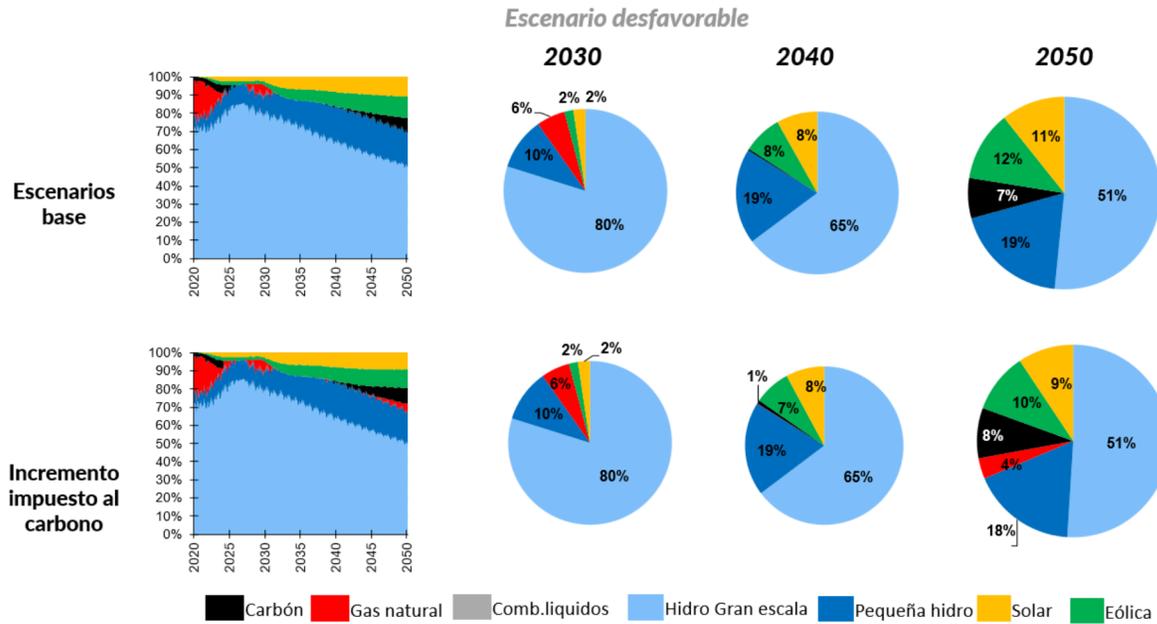


Figura 15. Generación de energía en el escenario desfavorable con política de aumento del impuesto al carbono

Subir el precio del impuesto al carbono es una política que pretende desincentivar el uso de combustibles fósiles, ya que encarece la generación de energía. Esto es particularmente crítico para el carbón, ya que tiene mayores emisiones por kWh que otros combustibles fósiles como el gas.

Al evaluar esta política en el modelo se evidencia que la implementación del impuesto al carbono solo es relevante para el escenario desfavorable. Los escenarios tendencial y favorable no se ven afectados ya que ellos alcanzan la eliminación de los combustibles fósiles en 2030.

En el escenario desfavorable, la implementación de un impuesto más alto al carbono eliminaría el carbón antes, pero podría extender la participación del gas más allá de 2030 debido a que es un combustible con menores emisiones y el precio de venta de la energía no se vería tan afectado con el impuesto (Figura 15).

Los eventos de baja hidrología, como El Niño, aumentarán la proporción de generación con combustibles fósiles.

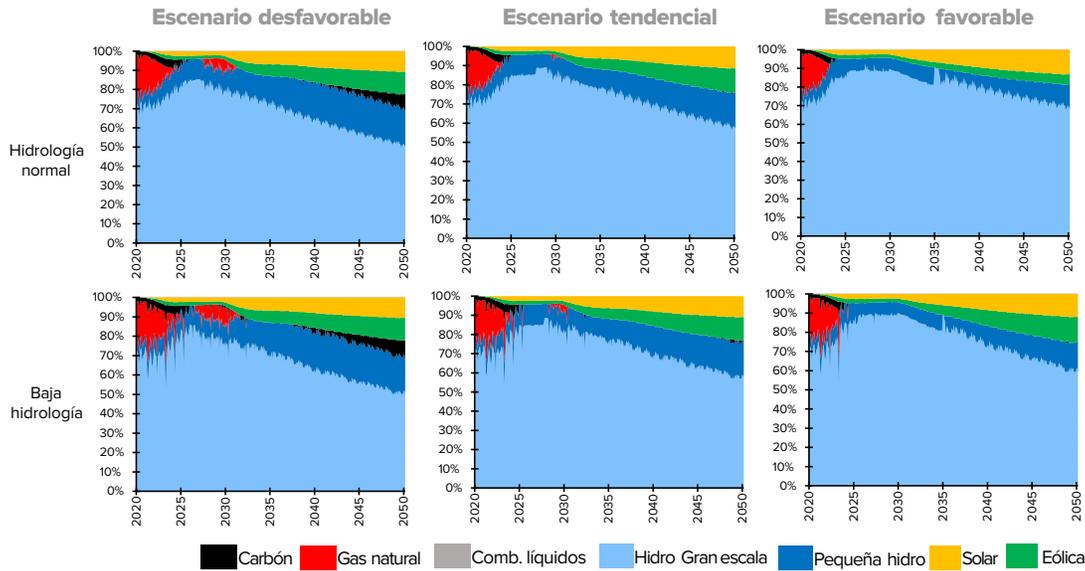


Figura 11. Generación de energía con baja hidrología para todos los escenarios.

El Niño -Oscilación del Sur (ENSO) es un fenómeno climático recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas en el Océano Pacífico tropical central y oriental. La reducción de las precipitaciones y las sequías asociadas a El Niño tienen un impacto significativo en la producción de electricidad y afectan la confiabilidad del sistema eléctrico de Colombia, ya que hay menos agua disponible para la generación de energía hidroeléctrica.

El modelo base considera una hidrología ENSO-neutral durante todo el período de simulación, pero un análisis de sensibilidad evalúa una baja hidrología asociada a una fase cálida del ENSO (El Niño), utilizando los registros hidrológicos históricos disponibles en Colombia desde el año 1997.

En la simulación no se identifican cambios significativos en la generación de energía en ninguno de los escenarios (Figura 11). Hasta 2035, se amplifica la participación de los combustibles fósiles en la matriz de generación debido a los eventos hidrológicos extremos. Esta situación se hace particularmente evidente en el escenario desfavorable, con una mayor participación del gas de 2025 a 2035 y luego de 2040 en adelante hay un aumento en el uso de carbón por sus precios bajos.

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL MARCO DE LA HOJA DE RUTA DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA JUSTA DE COLOMBIA

El gobierno colombiano ha dado un paso significativo en su compromiso con la transición energética al presentar recientemente la Hoja de Ruta para una Transición Energética Justa (Ministerio de Minas y Energía, 2023). Este plan estratégico describe las perspectivas del sistema energético del país en su conjunto, más allá de la generación eléctrica. Cubre también los sectores de industria, transporte y residencial, considerando los combustibles fósiles, las energías renovables y el hidrógeno.

La Hoja de Ruta consideró tres escenarios, que son resultado de un esfuerzo liderado por el Ministerio de Minas y Energía, con el objetivo de analizar el impacto de las políticas sobre la oferta y la demanda de energía. Estos escenarios se originan a partir de una línea base denominada "Escenario de Tendencia", en el que el cambio tecnológico sigue el ritmo del mercado actual. Se proponen entonces tres trayectorias alternativas:

- **El escenario de "Políticas Anunciadas" se basa en la implementación de políticas de transición energética previstas antes de 2022.**
- **El escenario "TEJ" incorpora políticas adicionales, y las primeras se centran en prioridades gubernamentales de justicia social y ambiental.**
- **El escenario "COP 26" aspira cumplir el Acuerdo de París y alcanzar la neutralidad de carbono para 2050.**

En general, Colombia espera un aumento de la participación de las Fuentes de Energía Renovables No Convencionales en la generación de electricidad (alrededor de 20 GW para 2030), junto con una reducción gradual de la participación de los combustibles fósiles.

En los escenarios de "Tendencia" y "Políticas anunciadas", se proyecta una reducción gradual en el uso de carbón para 2040, impulsada por señales del mercado internacional que conducen a mayores costos de generación de carbón en comparación con otras tecnologías. En el escenario "TEJ", la eliminación gradual de la generación con carbón se anticipa alrededor de 2035, una vez que dejen de recibir ingresos por el "carga de confiabilidad", un mecanismo de mercado que proporciona un ingreso estable a las centrales térmicas durante un período de tiempo para garantizar que, con esa capacidad, la demanda podrá ser atendida en episodios críticos.

En contraste, las proyecciones del gas indica una participación más amplia en la matriz de generación eléctrica. El escenario "TEJ", apoyado por el gobierno, presenta una narrativa en la que el gas se considera un combustible de transición en los sectores eléctrico, transporte, industrial y residencial.

El escenario "COP26" es el único que contempla el abandono gradual del gas, centrándose en la descarbonización total de la matriz energética. Este escenario implica la eliminación del uso de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en los hogares y restringir la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, el gobierno no elige este escenario como objetivo, porque que no "no se ajusta plenamente a los principios de viabilidad, plausibilidad e implementabilidad, ya que su adopción implicaría cambios retroactivos de mayor complejidad".





En contraste a los resultados del gobierno, los hallazgos del presente documento indican que es factible tener un sector eléctrico con cero emisiones en la próxima década. Considerando que los costos de generación pueden conducir naturalmente a un abandono gradual del gas, la estrategia del gobierno podría ser más ambiciosa.

En este contexto, el papel de los tomadores de decisiones debe ser promover condiciones de mercado que aceleren la eliminación gradual del gas del sistema eléctrico. Estas condiciones deben incluir un compromiso firme para evitar acciones que incentiven o promuevan nuevos desarrollos de capacidad térmica.

Incluso en un escenario desfavorable, los resultados indican que con las políticas actuales podría producirse una eliminación gradual del gas de la generación eléctrica para 2030. La influencia directa del aumento de los costos de generación con combustibles fósiles y la reducción simultánea de los costos de generación a partir de fuentes de energía renovables no convencionales, crean una poderosa señal económica para la salida de los combustibles fósiles.

La Hoja de Ruta para una Transición Energética Justa enfatiza la importancia del gas como facilitador de la transición energética y la reducción de la pobreza energética en algunas regiones. En el sector residencial, el gas se considera un combustible de apoyo para la electrificación rural y la sustitución de la madera en los hogares. En el sector del transporte, el gas se considera una alternativa viable debido a las limitaciones financieras y de infraestructura para la electrificación directa de vehículos. En el sector industrial se espera una progresiva sustitución del diésel y la gasolina por gas.

Colombia debería aumentar su ambición climática para eliminar gradualmente el gas de la generación de electricidad a 2030. Una sustitución progresiva del gas en el sector eléctrico es posible y permitiría que el gas apoye la descarbonización de sectores como el residencial, la industria y el transporte.



CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados de este proyecto muestran que, con las políticas actuales, y suponiendo que no se produzcan más retrasos en los proyectos renovables en construcción, la eliminación gradual del gas para la generación de electricidad podría lograrse en Colombia dentro de la próxima década. El modelo de simulación sugiere que podemos esperar una expansión muy importante de la energía eólica y solar, que complementará la energía hidroeléctrica existente. Esto podría desplazar por completo la generación de centrales térmicas para el funcionamiento del sistema.

Sin embargo, en los últimos años el país ha enfrentado un retraso significativo en el ingreso de proyectos tanto de transmisión como de generación, lo que refleja dificultades en la expansión del sistema. Dichos eventos inesperados no son considerados en el modelo. Así mismo, el modelo no considera la expansión del sistema de transmisión y asume que los requerimientos de transmisión para los proyectos están disponibles. Si Colombia pretende alcanzar una eliminación gradual de los combustibles fósiles, debe crear condiciones favorables para promover la inversión y el despliegue de energías renovables a gran escala. Estos incluyen un marco de inversión sólido, estabilidad en las decisiones de políticas públicas y regulación específica para superar los obstáculos en el desarrollo de proyectos. En línea con esto, es crucial que el gobierno fortalezca las instituciones del sector eléctrico para que Colombia pueda modernizar su regulación y al mismo tiempo promover un mercado atractivo para que las empresas se comprometan con la transición energética.

Una de las señales más importantes de este documento es que la demanda de energía es la variable más crítica a considerar. En las simulaciones, un aumento del 25% en la demanda para 2030 requerirá que el 12% de la generación sea proporcionada por combustibles fósiles. Además, no se alcanzaría una eliminación progresiva de los fósiles en ningún año, ni siquiera en el escenario favorable.

Una de las alternativas para reducir el impacto del crecimiento de la demanda son los Recursos Energéticos Distribuidos (DER por sus siglas en inglés), como la energía solar en los techos. Los DER reducen la demanda agregada de energía y, por lo tanto, se convierten en un elemento crucial para lograr la eliminación gradual de los combustibles fósiles en Colombia. Además, los DER pueden mejorar la resiliencia y confiabilidad de la red energética al reducir las pérdidas de transmisión y promover la descentralización del mercado.

La importancia de los DER sugiere que más allá del despliegue a gran escala de energías renovables, las políticas públicas y el financiamiento deberían apoyar y potenciar aún más las estrategias de eficiencia energética y el desarrollo de energía solar en techos, ya que son la forma más barata de reducir la demanda de energía y generar ahorros para los usuarios finales. Las estrategias para fomentar la implementación de DER se pueden complementar con programas de digitalización y respuesta a la demanda que busquen empoderar al usuario final.



CONSIDERACIONES FINALES

El modelo utilizado no considera la disponibilidad horaria de los recursos ni las limitaciones de generación durante el día. Esto significa que, aunque haya suficiente energía para satisfacer la demanda mensual, no necesariamente se cubrirá la demanda máxima diaria. Para abordar estos desafíos, se deben explorar alternativas complementarias para garantizar la flexibilidad y confiabilidad del sistema por hora o por día. Estas alternativas incluyen tecnologías de almacenamiento (como baterías a gran escala) y cambios en el mercado eléctrico para reconocer el valor que la gran energía hidroeléctrica podría proporcionar en términos de flexibilidad. Se necesitarán más investigaciones y un enfoque de modelización diferente para determinar la viabilidad de cambios regulatorios para incluir estas alternativas, y también para evaluar los cambios en las condiciones del mercado resultantes del despliegue de sistemas de almacenamiento.

Si Colombia logra establecer las condiciones para el despliegue a gran escala de las energías renovables, y promover con fuerza la eficiencia energética, la generación distribuida, la flexibilidad y el almacenamiento podría convertirse en un ejemplo de crecimiento sostenible, acción por el clima y creación de riqueza en la región y en el sur global.

La política pública y la financiación deberían respaldar y fortalecer aún más las estrategias de eficiencia energética y el desarrollo de la energía solar en los tejados, ya que son la forma más económica de reducir la demanda de energía y generar ahorros para los usuarios finales.

REFERENCIAS

Dyner, I., Oei, P.-Y., Yanguas, P. A., Corral, F., Zapata, S., Castaneda, M., Ángel, E., Ávila, R., Gómez, D., Ruiz, L. P., Ellis, D., & Cortés, J. D. (2022). Hoja de ruta electricidad 100% renovable en Colombia a 2030.

IEA. (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector

Leopold, A. (2016). Energy related system dynamic models: a literature review. Central European Journal of Operations Research, 24, 231-261.

Ministerio de Minas y Energía. (2023). Escenarios Nacionales. Transición Energética Justa. Rutas que nos preparan para el futuro. <https://www.minenergia.gov.co/es/servicio-al-ciudadano/foros/documentos-de-la-hoja-de-ruta-de-la-transici%C3%B3n-energ%C3%A9tica-justa/>

Ortega, S., Ángel, E., & Jaramillo, A. (2019). Escenarios Energéticos. Seis posibilidades para la transición en Colombia.

Schwartz P. The art of the long view: Planning for the future in an uncertain world. Ed. Currency. 227 páginas. 1996

Parra, JF., Arango, S., Arias, J., Olaya, Y. & Larsen ER. (2023). Quantifying the 2050 scenarios for Colombia's electricity sector transition, Working Paper N°01.

¿UN SECTOR ELÉCTRICO SIN COMBUSTIBLES FÓSILES EN COLOMBIA A 2030?

emergente
innovación para
transformar



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

