



HOJA DE RUTA

ELECTRICIDAD 100% RENOVABLE

EN COLOMBIA A 2030

Green Energy
Roadmap Colombia 2030



HOJA DE RUTA ELECTRICIDAD 100% RENOVABLE EN COLOMBIA A 2030

Green Energy Roadmap Colombia 2030



Grupo de Investigación EADE

Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería

Universidad Jorge Tadeo Lozano

CoalExit Group

Technische Universität Berlin / Europa Universität Flensburg

Agosto 2022

*Dyner et.al. (2022). Hoja de ruta electricidad 100% renovable en Colombia a 2030.
Univercidad Jorge Tadeo Lozano*

Tabla de contenidos		pag.			pag.
1	Resumen Ejecutivo / Executive Summary	8	8.	Discusión de los escenarios y simulaciones que cumplen con los objetivos	56
2	Integrantes del proyecto	12	8.1	Democracia Verde	57
2.1	Equipo de investigación	13	8.2	Extractivismo de Energías Renovables	58
2.2	Participantes en los ejercicios de construcción de escenarios	14	8.3	Greta	60
3	Introducción	16	8.4	La Casa en Llamas	61
3.1	Antecedentes y motivación	18	8.5	Alcance y limitaciones del estudio	61
3.1.1	La conveniencia de un trabajo interdisciplinario	18	8.5.1	Los escenarios	61
3.1.2	La importancia de investigación orientada a la política pública	19	8.5.2	El modelo	62
3.2	Objetivo general	20	8.5.3	Síntesis	64
3.3	Objetivos específicos	20	9	Conclusiones	66
4	Metodología de escenarios	22	9.1	Sobre el proceso de elaboración de escenarios	67
4.1	Metodología de los escenarios y talleres realizados	23	9.2	Sobre los resultados cualitativos de los escenarios	67
4.2	Definición de foco y horizonte de tiempo	23	9.3	Sobre los resultados cuantitativos de los escenarios	68
4.3	Talleres	24	10.	Recomendaciones de política pública para una hoja de ruta hacia 100% electricidad renovable en Colombia	74
4.4	Predeterminados	25	10.1	Hacia un nuevo modelo de relacionamiento	75
4.5	Incertidumbres	29	10.2	Masificación de la energía solar distribuida	77
5	Presentación de los escenarios propuestos	34	10.3	Planeación y promoción de FNCER en clave de descentralización y empoderamiento territorial	82
6	Presentación del modelo y las simulaciones	36	10.4	Detener expansión de parque de generación térmico e iniciar la transición justa	84
6.1	Supuestos del modelo	37	10.5	Impulso a una mayor electrificación de la economía	86
6.2	Descripción del modelo	38	10.6	Hoja de ruta generación eléctrica 100% renovable 2030	87
7	Resultados de las simulaciones	46		Bibliografía	92
7.1	Democracia Verde	47		Anexos	100
7.2	Greta	50			
7.3	Extractivismo de Energías Renovables	52			
7.4	La Casa en Llamas	54			



Resumen Ejecutivo / Executive Summary

Con la llegada e implementación de las energías renovables en Colombia, se sigue acelerando la transición energética que actualmente busca aumentar la capacidad instalada para la generación eléctrica. En poco más de cuatro años, el país ha dado pasos grandes en el sentido de desarrollar proyectos de fuentes limpias de electricidad. Así, en la actualidad hay en montaje cerca de 2.500 MW de capacidad instalada entre proyectos eólicos y solares, buena parte de los cuales empezarán a operar a partir del 31 de diciembre del 2022 (Portafolio, 2022). Sin embargo, esto no garantiza que el sistema eléctrico de Colombia se base enteramente en energías renovables no generadoras de emisiones de gases de efecto invernadero.

Este documento presenta los resultados de un proyecto de investigación que incluyó la realización de una serie de talleres y de espacios de recolección de información, que contaron con el acompañamiento de actores de distintas orillas con conocimientos, experiencias y posturas diversas en temas energéticos. Gracias a estos aportes, se pudieron identificar las incertidumbres más importantes a la hora de imaginar escenarios para lograr 100% electricidad renovable en 2030 (**1. Voluntad política hacia electricidad 100% renovable y 2. Disposición social en distintos niveles ante cada vez más energía renovable**). Partiendo de estas incertidumbres centrales, se elaboró una descripción de cuatro escenarios construidos alrededor de las incertidumbres a nivel político y social. Con base en esos escenarios, se adelantó

una simulación vía dinámica de sistemas con el objetivo de entender qué posibilidades hay, en cada escenario, de lograr o no una transición a un sistema eléctrico 100% renovable, y se elaboró un conjunto de recomendaciones para avanzar en dicha dirección. Adicionalmente, se presenta un cronograma detallado de los escenarios que permiten llegar al 100% de energías limpias, describiendo la generación eléctrica y cada una de sus fuentes en periodos de análisis de 2 años. Igualmente, se realizó análisis de sensibilidad para contemplar circunstancias más extremas como periodos de sequía o problemas de interconexión.

Esta investigación permitió concluir que en uno de los cuatro escenarios planteados se lograría el 100% renovables en generación al 2030 y en un segundo escenario se estaría muy cerca de cumplir esta meta. Ambos escenarios dependen en gran medida de un fuerte accionar estatal en la implementación y uso de las fuentes de generación renovables, aunado al compromiso de la sociedad en este tipo de iniciativas para su materialización. El foco del estudio ha sido la posibilidad de abastecer la demanda proyectada de energía eléctrica, incrementando la participación de las renovables. Como se verá, si bien a partir de ciertos años la generación térmica se reduce a un mínimo, nuestro estudio no detalla lo relacionado con el retiro de las centrales térmicas que funcionan con combustibles fósiles. Este permanece un tema que puede ser tratado por futuros estudios.

----- Green Energy Roadmap Colombia 2030 -----

With the advent and implementation of renewable energies in Colombia, the energy transition continues to accelerate, currently seeking to increase the installed capacity for renewable electricity generation. In just over four years, the country has made great strides in the development of clean electricity projects. Thus, there are currently around 2,500 MW of installed capacity between wind and solar projects, most of which will start operating as of 31 December 2022 (Portafolio, 2022). However, this does not guarantee that Colombia's electricity system will be entirely based on non-greenhouse gas emitting renewable energy.

This document presents the results of a research project that included a series of workshops and information-gathering spaces, with the support of actors from different sides with diverse knowledge, experiences and positions on energy issues. Thanks to these contributions, it was possible to identify the most important uncertainties when imagining scenarios to achieve 100% renewable electricity by 2030 (1. political will towards 100% renewable electricity and 2. social willingness at different levels to increasingly renewable energy). Based on these central uncertainties, a description of four scenarios built around the uncertainties at the political and societal level was elaborated. Based on these scenarios, a system dynamics simulation was carried out in order to understand what possibilities there are, in each scenario, to achieve or not a transition to a 100% renewable electricity system, and a set of recommendations to move in that direction was elaborated. In addition, a detailed timeline is presented for the scenarios that allow for reaching 100% clean

energy, describing electricity generation and each of its sources in 2-year analysis periods. Several sensitivity analyses were also carried out to contemplate more extreme circumstances such as periods of drought or interconnection problems.

This research led to the conclusion that in one of the four scenarios proposed, 100% renewable generation would be achieved by 2030, in a second one this goal would be nearly achieved. Both scenarios depend to a large extent on strong state action in the implementation and use of renewable generation sources, together with the commitment of society in this type of initiatives for their materialization. The focus of the study has been the possibility of supplying the projected demand for electricity by increasing the share of renewables. As will be seen, while thermal generation is reduced to a minimum after a certain number of years, our study does not detail the retirement of fossil-fired thermal power plants. This remains an issue that can be addressed by future studies.



Integrantes del proyecto

La realización de la presente investigación se llevó a cabo con la participación de un equipo multidisciplinario con sólida experiencia en temas energéticos, y en la aplicación tanto de la metodología de escenarios, como en el desarrollo y calibración de modelos de simulación. Adicionalmente, para la identificación de predeterminados e incertidumbres, así como para la co-creación de las narrativas detrás de los escenarios identificados, se contó con la participación de un grupo amplio de expertos y funcionarios del sector energético, la academia, y la sociedad civil a nivel nacional.

2.1 Equipo de investigación

A continuación, se presentan a las personas que participaron en la realización de esta hoja de ruta para una matriz eléctrica 100% limpia en Colombia.

Isaac Dyner Rezonzew.
Investigador principal del proyecto. UTADEO

Pao-Yu Oei.
Co investigador. Technische Universität Berlin. Europa Universität Flensburg

Paola Andrea Yanguas Parra.
Coordinadora de política pública. Technische Universität Berlin

Felipe Corral Montoya
Coordinador operativo. Europa Universität Flensburg

Sebastián Zapata Ramirez.
Coordinador de modelado. UTADEO

Mónica Castaneda Riascos.
Modeladora. UTADEO

Enrique Ángel Sanint.
Asesor externo. EIA

Raúl Ávila Forero.
Asesor externo. UTADEO

Diego Gómez Sánchez. Asesor externo.
Fundación Ecsim, Colombia

Lina Paola Ruiz Martínez.
Becaria UTADEO

Dana Ellis Echavarría.
Becaria UTADEO

Juan David Cortés Gómez.
Asesor externo. UTADEO

2.2 Participantes en los ejercicios de construcción de escenarios

Para la construcción de escenarios se contó con la participación de un grupo de personas provenientes de diversas instituciones, a quienes se agradece su presencia. Debemos aclarar que ellas no representaban a las organizaciones y, además que, por diversos motivos, no todas ellas pudieron asistir a todos y cada uno de los espacios. Las personas provenían de Indepaz, Fundación Heinrich-Böll, IDEA – Universidad Nacional (Bogotá), Universidad ICESI, Universidad EIA, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, ANDI Colombia, Punto Medio, DNP, Exposolar Colombia, AIDA, Universidad Nacional de Colombia, CENSAT, Agua Viva, Transforma, CRY-GEAM, IPSE. XM, Ecopetrol y Universidad del Magdalena.



En medio de una crisis climática que ya está haciendo más frecuentes e intensos patrones climáticos extremos como sequías, inundaciones, tormentas, entre otros (véase por ejemplo Cai et al., 2014, 2015), Colombia surge como uno de los países más vulnerables (Germanwatch, 2018). Por todo lo anterior, es de crucial importancia atender los llamados de distintos entes multilaterales a aumentar la ambición y la efectividad de la acción climática.

En el marco del Acuerdo COP 21 de París (2016), Colombia se ha comprometido por medio de su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC por sus siglas en inglés) a reducir sus emisiones en un 51% para el año 2030 y ser carbono neutro para el año 2050 (MADS, 2020). Sin embargo, la NDC se concentra particularmente en el sector agroforestal y el uso de suelos, a pesar de que el sector energético representa la segunda fuente doméstica de gases de efecto invernadero (GEI).

Dentro de la matriz de GEI de Colombia, el sector energético incluye a los subsectores industriales, de transporte, y residencial, así como el de generación eléctrica. Las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de estos sectores representaron en 2019 alrededor del 39% del total para Colombia, es decir más de 100 millones de toneladas de CO₂eq (Climate Watch, 2021). Dentro del sector energético, el eléctrico es el que más ha crecido (en términos relativos) en emisiones desde 2005 (Crippa et al., 2019). Por todo lo anterior, una transición hacia una matriz eléctrica 100% renovable, es un paso clave para poder alcanzar de manera efectiva las ambiciosas metas de reducción de emisiones. De igual manera, constituye un hito fundamental para avanzar en la electrificación de otros sectores y de esa manera reducir las emisiones en industria, transporte y otros subsectores.

Al respecto, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) establece que descarbonizar el sistema energético global y llegar a cero emisiones netas tan pronto como sea posible, es fundamental para detener la aceleración del cambio climático y lograr los objetivos del Acuerdo de París (IPCC, 2018, 2022b, 2022a), la Agencia Internacional de Energía (IEA en inglés) plantea escenarios del sistema energético que podrían conducir a 100% renovables en electricidad para el año 2035 (IEA, 2021).

Estos objetivos no solo son deseables desde una perspectiva climática, sino posibles y factibles desde una perspectiva técnica y económica para todos los países del mundo (véase por ejemplo Jacobson et al., 2019). Se dan cuando el mundo se encuentra en un proceso de transformación importante hacia las energías renovables en electricidad (IRENA, 2021; REN21, 2022). Muchos países industrializados están avanzando hacia la incorporación importante de renovables, tal es el caso de Dinamarca, Reino Unido y Alemania. En Latinoamérica, donde tradicionalmente la matriz eléctrica ha sido renovable (hidroeléctrica) en grandes porcentajes, cada vez más países avanzan hacia una matriz eléctrica 100% renovable como Costa Rica y Uruguay.

El presente estudio continúa esfuerzos anteriores (véase Dyner, 2020; Henao et al., 2019; Zapata et al., 2018) para mostrar que llegar a un abastecimiento eléctrico 100 % basado en renovables es posible dentro de la próxima década.

3.1 Antecedentes y motivación

El proyecto Green Energy Roadmap Colombia 2030 nació de una alianza entre la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (UTADEO), la Technische Universität Berlin (TUB) y la Universidad Europea de Flensburg (EUF), y tiene como objetivo identificar las circunstancias relevantes para alcanzar un sector energético cada vez más renovable en Colombia, empezando por una matriz eléctrica 100% renovable para el año 2030.

3.1.1 La conveniencia de un trabajo interdisciplinario

Indagaciones previas de nuestros grupos de investigación, muestran que Colombia puede lograr avanzar rápidamente desde una matriz 70% renovable en la actualidad a una matriz 100% renovable en electricidad de manera sostenible, y que este sistema puede redundar en costos inferiores a los actuales, asegurando la confiabilidad de suministro (Henao et al., 2019; Henao & Dyner, 2020).

Sin embargo, las modelaciones en dichas investigaciones se han realizado en el pasado usando una aproximación meramente tecno-económica. Debido a esto, han dejado por fuera temas de gran importancia como la conflictividad socioambiental ligada a proyectos de infraestructura como lo son todos aquellos relacionados al sistema eléctrico. Por nombrar algunos, hoy por hoy hay importantes aportes que llaman la atención sobre los desafíos y problemas que pueden estar ligados al despliegue de parques eólicos (véase González Posso & Barney, 2019), líneas de transmisión (Vega-Araújo & Heffron, 2022) o hidroeléctricas (Román et al., 2020).

Se sabe entonces que casi todas las tecnologías sobre las que está concebida la idea de sistemas eléctricos basados 100 % sobre energías renovables requieren algún tipo de “licencia social”, es decir la “la aceptación o aprobación continua de una operación [o intervención en un territorio] por parte de las partes interesadas

de la comunidad local que sean afectados por ella” (Moffat et al., 2016, p. 480). En el presente texto, el concepto de licencia social se toma para reflexionar si proyectos como aquellos necesarios para la transición del sistema eléctrica puedan obtener esa “aceptación o aprobación continua” por parte de quienes se verán afectados por esos proyectos, de manera que estos no ocurran por imposición externa a los habitantes de los territorios afectados. Por ello, cualquier análisis tecno-económico puede verse beneficiado al ser complementado por perspectivas (en ocasiones necesariamente críticas) desde las ciencias sociales.

3.1.2 La importancia de investigación orientada a la política pública

En la reciente contienda electoral, poca atención se le dio al potencial que tiene Colombia de convertirse en un referente regional y global para una transición de su sistema eléctrico hacia 100% electricidad renovable. Esta investigación se propuso mostrar qué posibles caminos pueden llevar a dicho objetivo, profundizando hallazgos previos (véase Dyner, 2020; Henao et al., 2019; Zapata et al., 2018) que sugerían que Colombia puede tener altísimos niveles de energía eléctrica de origen renovable sin descuidar la confiabilidad del servicio, con la posibilidad de ofrecer precios más bajos, menor vulnerabilidad climática, menores emisiones e incluso menor uso de agua.

Así las cosas, el punto de partida de este proyecto era la hipótesis de que un sistema eléctrico 100% basado en energías renovables como el agua, el sol y el viento, no solo era técnica y económicamente factible, sino social y ambientalmente deseable, y que además se podía materializar mucho antes de lo que otros estudios lo sugerían (véase por ejemplo Gobierno de Colombia, 2021; UPME, 2021). Teniendo en cuenta que hay distintos indicios de que la meta de un sistema eléctrico basado en 100 % electricidad renovable en Colombia es factible, los objetivos generales y específicos del proyecto se orientaron a entender cuáles son los pasos que se tendrían que dar, para llegar a esa meta, en principio factible.

3.2 Objetivo general

Identificar las circunstancias relevantes para alcanzar un sistema eléctrico 100% renovable en Colombia para el año 2030.¹

3.3 Objetivos específicos

- Identificar las circunstancias relevantes para alcanzar escenarios 100% renovables en electricidad para el año 2030, ampliando el consumo eléctrico en transporte e industria.
- Reflexionar sobre las tendencias predeterminadas que podrían contribuir con una matriz eléctrica 100% renovable.
- Seleccionar las incertidumbres que podrían contribuir con una matriz eléctrica 100% renovable.

¹ Este objetivo se limitó a considerar aquellas áreas del territorio nacional que ya hacen parte del sistema interconectado nacional (SIN).

4

Metodología de escenarios

Para cumplir los objetivos del estudio, dentro del marco de tiempo y recursos que daba el proyecto, el equipo de investigación se propuso combinar tres métodos de investigación y trabajo. El primero de ellos fue trabajar en la construcción de una serie de escenarios que permitieran imaginar distintos futuros posibles para el sistema eléctrico colombiano, pero también para la sociedad y las instituciones dentro de las cuáles este opera.

4.1 Metodología de los escenarios y talleres realizados

La metodología propuesta es una variación de la enunciada por Schwartz (1996), adaptada al alcance y tiempo disponibles para la realización del ejercicio. Dicha metodología considera el futuro conformado por dos tipos de fuerzas, predeterminados e incertidumbres. Ambas fuerzas se identifican a través de la realización de talleres con amplia participación de expertos conocedores del sector bajo estudio. Para hacer el ejercicio más manejable, ambas fuerzas fueron agrupadas bajo el esquema PESTEL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ambiente –E según su sigla en inglés- y Legislación). Una vez identificadas las incertidumbres, se realiza un proceso progresivo de priorización, hasta encontrar las dos que más influyen sobre las demás. Estos serán los ejes de los escenarios. Posteriormente, se elabora la estructura básica de los mismos y se van identificando los hechos que resultan de la combinación de incertidumbres y predeterminados para cada escenario. Finalmente, se identifican los valores de los parámetros numéricos que permitirán realizar las simulaciones respectivas, utilizando los modelos desarrollados para tal fin.

4.2 Definición de foco y horizonte de tiempo

La pregunta para encauzar el ejercicio de escenarios fue:

¿Cuáles son los escenarios futuros para la consolidación de las energías renovables en Colombia como base para la matriz energética eléctrica para 2030?

Se definió igualmente, que el horizonte de tiempo del ejercicio sería hasta el año 2030 porque es el horizonte pre-definido en el Acuerdo de París para las NDC, y por tanto se busca ser consecuente con los compromisos a nivel internacional.

4.3 Talleres

El centro focal del desarrollo de la metodología de escenarios consiste en el desarrollo de una serie de talleres diseñados para capturar percepciones de los participantes, poner a su consideración los avances intermedios elaborados por el equipo técnico con base en esas percepciones. y servir como validador de la consistencia y amplitud del ejercicio realizado. En el Anexo 1 se presentan los resultados de los talleres con algo más de detalle.

Primer taller

El primer taller se llevó a cabo de manera virtual el jueves 19 de agosto de 2021, con una participación estimada de 30 personas provenientes de la academia, entidades gubernamentales encargadas de los temas y empresas energéticas (ver sección 1.2). La agenda desarrollada fue la siguiente:

- 1 Presentación del proyecto y breve presentación de los asistentes
- 2 Discusión de los participantes de predeterminados para el ejercicio, a partir de una propuesta elaborada previamente por el equipo técnico
- 3 Identificación de incertidumbres, priorización, identificación de ejes de los escenarios

En el primer acercamiento se buscó estudiar las circunstancias para alcanzar los diferentes escenarios y las tendencias que pueden determinar la contribución o no a una matriz 100% eléctrica

Segundo taller

El segundo taller se llevó a cabo de manera virtual el 7 de octubre de 2021, la agenda desarrollada fue la siguiente:

- 1 Recapitulación de lo avanzado en el primer taller y presentación de los ejes de los escenarios
- 2 Trabajo en grupo para elaborar una narrativa para cada escenario
- 3 Presentación de la hipótesis dinámica que sería la base para los modelos de simulación

Durante el segundo taller se realizó un resumen del primer taller y la presentación de los ejes de cada escenario y finalmente la actividad grupal donde cada equipo nombró y describió cada escenario como resultado de las incertidumbres del primer taller.

Tercer taller

El tercer taller se llevó a cabo de manera virtual el 2 de diciembre de 2021, con la siguiente agenda:

- 1 Recapitulación de lo avanzado hasta el momento
- 2 Presentación y discusión de las narrativas detalladas de los escenarios
- 3 Presentación y discusión de resultados preliminares de la simulación para dos escenarios seleccionados

4.4 Predeterminados

Los predeterminados son aquellas tendencias o fenómenos que anticipamos que se presentarán sea cual sea el escenario que finalmente ocurra. A continuación, se presentan los predeterminados identificados, agrupados en seis grandes categorías: Política, Economía, Sociedad, Tecnología, Ambiente y Legislación/regulación

4.4.1 Política

Se espera que el sistema político colombiano permanezca en un estado similar. Es decir, se anticipa que el alto grado de centralización en la administración pública, así como en las decisiones políticas, particularmente en el ámbito minero-energético, continúe a grandes rasgos. Igualmente, aspectos como el alto grado de polarización política existente, la fragmentación de los partidos y movimientos políticos, continuarán en un nivel similar al actual.

4.4.2 Economía

En el ámbito económico, el punto de partida en 2021 es el de un país con tasas de desigualdad entre las más altas del mundo. Si bien es posible que se den avances, en lo que tiene que ver con ingresos, riqueza, tenencia de tierra, patrimonio natural, entre otros, se mantendrán altos índices de inequidad. Uno de los factores relacionados con la desigualdad es la informalidad laboral que caracteriza a Colombia. Casi dos terceras partes de la población en edad laboral está desempleada, subempleada o habiendo renunciado a buscar trabajo, y sin muchas luces de cómo enfrentar el problema, se considera que se mantendrá la tasa de informalidad laboral y la de desempleo.

No se espera que el déficit comercial estructural y una canasta exportadora altamente dependiente de commodities de la economía colombiana vayan a cambiar radicalmente en el lapso de una década. En 2030, la situación será, muy probablemente, la de un país igual de vulnerable a cambios en los mercados internacionales de commodities que en 2021, incluso si durante el periodo de análisis se dan intentos (e incluso algunos avances iniciales) de reformas (ver incertidumbres).

Con alta probabilidad, Colombia permanecerá con un alto grado de dependencia en términos financieros, industriales, comerciales, alimentarios, entre otros, del exterior. No hay indicios de que Colombia vaya a convertirse en un productor de conocimiento o tecnología, de que vaya a generar un gran aparato industrial o que revierta sus déficits comerciales o financieros durante el periodo

de estudio. Por ende, se considera como un predeterminado que gran parte de las tecnologías de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR), así como las que apuntan a una mayor electrificación de la economía, seguirán siendo importadas en casi su totalidad.

4.4.3 Sociedad

Demográficamente, se espera que el crecimiento poblacional continúe siguiendo las tendencias actuales (es decir tasas <2% en promedio). En el ámbito social se considera que se mantendrá algún grado de precariedad y malestar social. Tanto a nivel local, como a nivel nacional, distintos conflictos latentes relacionados con pobreza, desigualdad, uso y acceso a recursos, entre otros, seguirán afectando, con alta probabilidad la cohesión social y la paz.

En Colombia, esta situación de tensión y conflicto social ha sido una constante durante décadas y se ha reflejado en violencia en contra de defensores del territorio, así como riesgos sobre sus vidas, integridad y procesos organizativos. Todo esto mediado por una situación de déficit de participación efectiva de pueblos y comunidades en proyectos en sus territorios y por un debilitamiento de los mecanismos de participación. No se espera que haya una mejora sustancial en cuanto al avance de la crisis climática, lo que mantendrá altas la vulnerabilidad de comunidades por degradación ambiental y la pérdida de autonomías (alimentarias, organizativas etc.).

Si las causas estructurales permanecen, es probable que los macro-conflictos subyacentes lleven a explosiones sociales como las que ocurrieron en 2019, 2020 y 2021. Algunos conflictos existentes en Colombia continuarán produciendo diversas manifestaciones violentas en el territorio, incluso si dan avances a través de procesos de negociación, o se mejora el relacionamiento local, por ejemplo. Por último, se espera que las tendencias a más “sostenibilidad” en consumo (energético) y producción (industrial, residencial, comercial) se continúen profundizando.

4.4.4 Tecnología

Se espera una mayor penetración de tecnologías más bajas en emisiones en sectores como el transporte, la industria o el residencial. Esto irá de la mano de una continua caída de costos (relativos) de tecnologías de energía renovables como la fotovoltaica o la eólica. La masificación a nivel mundial de estas y otras tecnologías, como la movilidad eléctrica, aumentarán la demanda y por ende los precios de materias primas como metales, tierras raras, entre otros. Sin embargo, se espera que el diferencial de precio entre las tecnologías fósiles y las renovables se acentúe aún más. Por ello anticipamos un creciente reemplazo de equipos que funcionan actualmente con combustibles fósiles, por sus contrapartes eléctricas o movidas por energías renovables.

La cuestión de los residuos tecnológicos producto del avance de las FNCER será cada vez más importante. En lo que respecta a la producción de hidrógeno, se considera que para 2030 aún no existirán capacidades a gran escala en Colombia; lo que no excluye que se den pilotos a menor escala (véase sección 6.1).

Por último, muchos de estos procesos de cambio y disrupción tecnológica asociados a tecnologías renovables, electrificación, entre otros, interactúan con las tendencias de tercerización, digitalización y automatización que están avanzando en la economía y la sociedad – todos ellos sugiriendo un aumento de la demanda eléctrica en el país.

4.4.4 Tecnología

Para 2030 existe una alta probabilidad de que los patrones climáticos extremos (ej. sequías, inundaciones, vendavales, huracanes, fenómenos del Niño o la Niña, etc.) aumenten tanto en intensidad como en frecuencia. Por ende, es también sensato asumir que se generarán diversas implicaciones en otros ámbitos como el social o económico, redundando en mayor inestabilidad (por ejemplo, ligadas a aumentos repentinos de flujos migratorios, hambrunas, apagones, etc.). Estos fenómenos traerán consecuencias sobre algunas infraestructuras con el consiguiente aumento en los costos de operación y mantenimiento.

4.4.6 Legislación/regulación

Si bien es de esperarse que se introduzcan ajustes a la regulación en lo concerniente a tecnologías específicas y definiciones sobre incentivos en momentos particulares del desarrollo del sector, se toma como un predeterminado que algunos de los elementos centrales en el ámbito legal-regulatorio tales como la convivencia de generadores estatales y privados permanecerán.

4.5 Incertidumbres

Las incertidumbres son aquellos elementos, tendencias o hechos puntuales del futuro que no podemos asegurar con un nivel alto de certeza. Suelen estar jerarquizadas, de tal manera que algunas de ellas tienen una alta incidencia sobre las demás.

Con la participación de los expertos asistentes a los talleres, se identificaron una serie de incertidumbres. Luego se les pidió a los asistentes que seleccionaran de cada categoría (Política, Economía, Sociedad, Tecnología, Ambiente y Legislación/Regulación) las dos incertidumbres más importantes. Con esas doce incertidumbres como punto de partida, se realizaron dos ejercicios adicionales que llevaron a identificar primero cuatro, y luego dos incertidumbres como las más importantes, estas dos están llamadas a conformar los ejes de los escenarios.



Ilustración 1: Respuestas de las y los participantes en el taller #2 – Fuente: elaboración propia

4.5.1 Orientación Política hacia electricidad 100% renovable

Teniendo en cuenta la naturaleza del sistema presidencialista colombiano, se reconoce que una multitud de cambios políticos, sociales, económicos, tecnológicos e incluso ambientales o culturales pueden estar ligados al resultado del reciente proceso político-electoral, que determinó un giro en la orientación de las políticas nacionales, dando como ganador al candidato Gustavo Petro, quien asumió la Presidencia de Colombia desde el 7 de agosto de 2022. Por ello, se incluyen dentro de esta macro incertidumbre todas aquellas que de una u otra manera dependen en gran medida de quiénes estarán al frente del gobierno en 2022/2026, y de cómo estas personas orientarán los esfuerzos gubernamentales/estatales.

Es así como dentro de esta categoría se encontrarán incertidumbres tales como: “cambios en modelo económico colombiano a 2030, políticas asociadas a los nuevos gobiernos en cuanto a implicaciones en materia energética social y ambiental, decisiones de política y regulación e implicaciones en la velocidad de adopción de renovables, agilidad del regulador y planificador para la toma de decisiones sectoriales, desarrollo de proyectos de grandes dimensiones, con fuertes impactos sobre comunidades y áreas protegidas” (ver Ilustración 1).

4.5.2 Orientación de la sociedad hacia las energías renovables

Esta segunda categoría que emergió de las discusiones trata de reflejar el papel fundamental que juega la respuesta por parte de la sociedad y las comunidades, a diferentes niveles, ante diferentes escenarios de transformación. Con ella se quiere resaltar el hecho de que, que se consiga una licencia social en los territorios por parte de sus habitantes, por ejemplo, pueden generarse situaciones de conflicto, incluso violento (véase Barney, 2021 por ejemplo), alrededor de los proyectos de FNCER. Sin ese aval desde los habitantes de los territorios que representa la licencia social, los proyectos también pueden demorarse y perder su rentabilidad o incluso poner en riesgo la estabilidad de la red. Igualmente, si no hay amplio apoyo en la población a las políticas de transición necesarias para llegar a 100% electricidad renovable (por ejemplo, a través de instalaciones en techos o mayor/mejor reciclaje), difícilmente se podrá avanzar con la velocidad/efectividad requerida. Entonces, ésta incertidumbre se enfoca en lo cambios sustanciales al sistema eléctrico como se conoce, que pueden definir qué tan renovable será este hacia adelante.

Dentro de esta categoría se pueden agrupar incertidumbres tales como: “capacidad, disposición o espacio de movimientos sociales para cerrar brechas estructurales, gravedad y velocidad de colapso socio-ecológico, tendencias globales en materia climática y uso de energéticos y desarrollo de proyectos de grandes dimensiones, con fuertes impactos sobre comunidades y áreas protegidas”.

Así agrupadas, las macro incertidumbres señaladas, concentraron el 90% de las menciones, y constituyen un par de ejes muy poderosos a la hora de estructurar los escenarios, pues estarían delineando la tensión -siempre existente- entre la sociedad que va mudando sus preferencias y los políticos que las interpretan más o menos rápidamente y a su vez, tienen la capacidad de crear opinión, es decir, de influir sobre la sociedad. Es interesante que resulten estas dos incertidumbres como las más importantes

en un análisis para un plazo mediano-largo (8 años), pues habla de un mundo en el que la sincronización entre la sociedad y las políticas será de especial importancia.

Estos ejes encontrados son coincidentes con el esquema de análisis de Acemoglu y Robinson (2019). En su texto, los autores hablan de ejes similares que ellos utilizan para entender el estrecho corredor que se tiene para alcanzar desarrollo y prosperidad en las naciones (a través de la tensión entre Poder del Estado Vs Poder de la Sociedad).

5 Presentación de los escenarios propuestos

Con base en las dos incertidumbres principales, así como los aportes de los distintos participantes a los talleres, se elaboró una propuesta para cuatro escenarios posibles de futuro:

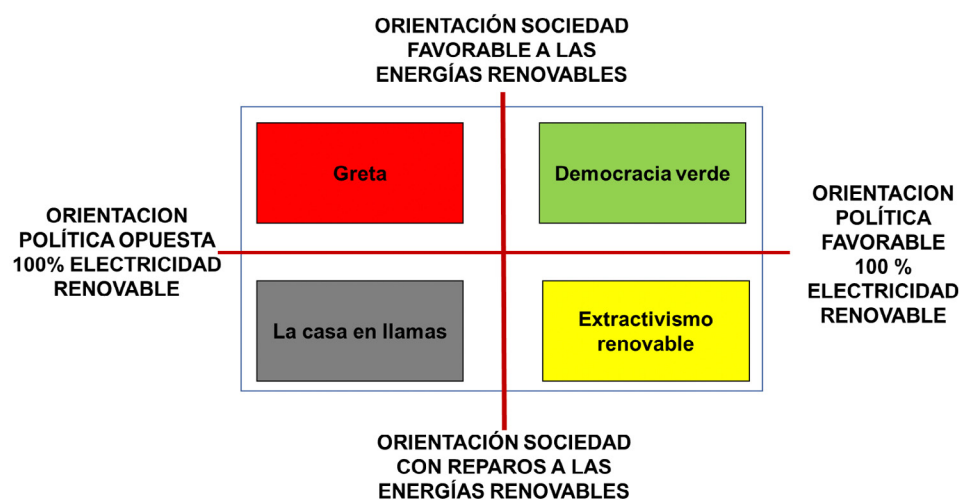


Ilustración 2: Escenarios construidos en el ejercicio – Fuente: elaboración propia

- Escenario (+,+) “Democracia Verde”, en el que confluyen las orientaciones favorables hacia las energías renovables tanto de la sociedad, como de la política. Es un escenario ideal para lograr el avance hacia un sistema eléctrico 100% renovable.
- Escenario (+,-) “Extractivismo Renovable” formado por la superposición de la favorabilidad política y una actitud con reparos de la sociedad frente a las renovables. Es un escenario en el que los políticos empujan un tipo de desarrollo de energías renovables que la sociedad mira con reserva y que profundiza la conflictividad socioambiental alrededor de proyectos energéticos.
- Escenario (-,+) “Greta”. Combina lo opuesto al escenario anterior. Aúna la favorabilidad de la sociedad con la oposición de los políticos. Es un escenario en el que la sociedad empuja a una mayor adopción de energías renovables y los políticos frenan el avance.
- Escenario (-,-) “La Casa en Llamas” en el que confluyen las orientaciones opuestas de los políticos y los reparos de la sociedad frente a las energías renovables. Este es un escenario complejo que augura pocos avances en la descarbonización de la matriz eléctrica, acentuando los problemas actuales (ej. Costo, confiabilidad, independencia energética, etc).



Presentación del modelo y las simulaciones

Se desarrolló un modelo de simulación en Dinámica de Sistemas para representar en el tiempo el balance energético eléctrico y la toma de decisiones frente a la expansión del sistema.

Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es un método de modelado para la simulación del comportamiento evolutivo de sistemas complejos (Sterman, 2000; Dyner y Larsen, 2000). Se enfoca en entender los posibles caminos de transformación de los sistemas en el tiempo. Ha sido utilizada desde los años 50s del siglo pasado en el diseño de políticas de sectores variados, incluyendo el de la energía. Aunque fundamentada en teorías de dinámicas no lineales y de realimentación de la matemática, su aproximación es interdisciplinaria e incorpora las ciencias sociales y la ingeniería. Su aplicación en el campo de la energía en Colombia es anterior al año 1990.

*Energético eléctrico y la toma de decisiones frente a la expansión del sistema.
Recuadro 1: ¿Qué es la dinámica de sistemas? – Fuente: elaboración propia con base en Sterman, 2000; Dyner y Larsen, 2000*

6.1 Supuestos del modelo

El modelo “agregado” propuesto busca ayudar a entender si es posible satisfacer la demanda del mercado eléctrico con 100% de energía renovable. Es decir, cuáles son los requerimientos eléctricos, de transmisión y regulación para lograrlo de manera general, y no detallada, bajo condiciones de una hidrología promedio (aunque se corrieron escenarios para sequías extremas tipo niño). En términos generales se consideraron dos regiones (zona caribe y el resto de país). Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Incremento proyectado de la demanda de las dos regiones.
- Evolución de la oferta en las dos regiones para satisfacer la demanda global.
- Líneas de transmisión para garantizar los intercambios entre las dos regiones.
- Regulación para que puedan darse estos intercambios para abastecer la demanda diurna y nocturna.

Este es un modelo para examinar la viabilidad de la demanda energética, incluyendo las transferencias, donde se realizan los siguientes supuestos:

- No se considera la entrada de baterías en el horizonte de planeación
- Se analiza el escenario Greta en el cual entran todas las subastas programadas y se sigue expandiendo gas.
- No se considera desinversión en el modelo.
- En los escenarios Greta y La Casa en Llamas se considera cargo por confiabilidad para las plantas térmicas.
- Solo se considera la entrada de Hidroituango en hidroenergía a gran escala.

- En el escenario Democracia Verde se considera subasta para las plantas renovables.
- En la operación del modelo se toma un día típico del mes y se despacha.
- El modelo está desagregado por regiones: la zona caribe y el resto del país.
- Se consideran los intercambios entre las regiones.
- Se considera la expansión de las redes de transmisión sin retrasos en el escenario Greta y Democracia Verde, en el escenario La Casa en Llamas se considera retraso en la expansión en redes de transmisión.
- La generación distribuida se considera a nivel residencial. En el modelo también asume que los hogares cuentan con un sistema fotovoltaico y producen energía que cubre sus necesidades energéticas.
- La instalación de generación distribuida depende de la tarifa de electricidad, donde la componente G es variable y las demás son constantes
- El modelo no hace consideración espacial en la oferta o la demanda de electricidad.

6.2 Descripción del modelo

Mediante este modelo se buscan responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los requisitos de transmisión para alcanzar un escenario 100% renovable en un gran sistema?
- ¿Cuáles son las implicaciones a mediano y largo plazo de un escenario 100% renovable en el despacho de electricidad entre regiones, bajo diferentes escenarios de capacidad de red?

-¿Y el estudio de la amenaza de apagones?

-¿Cuál es el papel de la política y la regulación en los sistemas 100% renovables?

-¿Cómo puede la sincronización de la política energética de transmisión y construcción de energía mitigar este problema?

Para lograr esto, se considera un enfoque de simulación basado en modelos bajo diferentes escenarios. El modelo construido para el propósito de esta investigación hace parte de una clase de modelos que han sido previamente utilizados para este tipo de ejercicios y han sido reportados en la literatura. Estos aparecen en la sección de bibliografía.

Los Modelos de Simulación representan matemáticamente las dinámicas del comportamiento de un sistema que se está considerando. Estas dinámicas son esquematizadas en relaciones causales que evidencien el tipo de relación que tiene las diferentes variables, o flujos o acumulaciones que se presentan en el sistema. Estos modelos buscan en esencia ser una representación del comportamiento real del sistema.

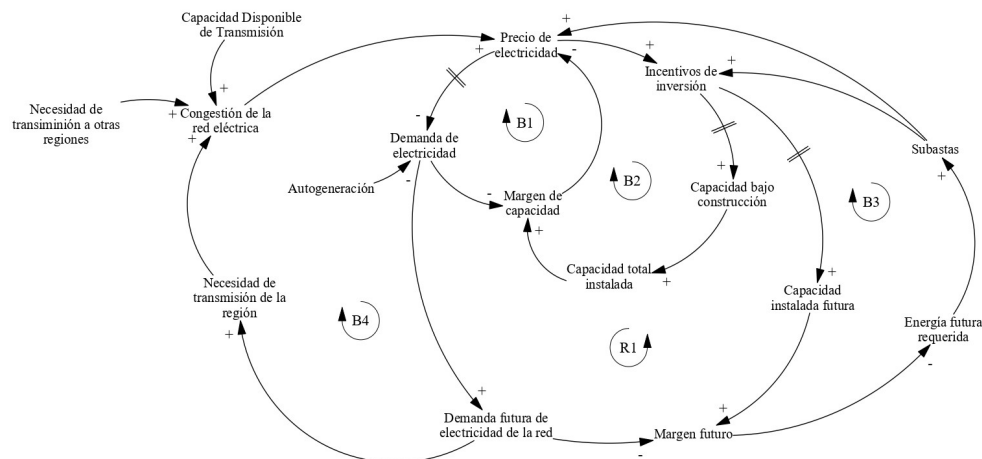
6.2.1 modelo del mercado eléctrico colombiano

Las dinámicas y el comportamiento del sistema eléctrico se representan en el diagrama de relaciones causales de la figura 2. Se muestra de manera general el comportamiento del mercado respecto a la demanda y precio de la energía, donde a mayor precio se aumenta la capacidad de energía para cubrir la demanda de toda la red de electricidad.

En el corazón de la Ilustración 2 se aprecia que la evolución del mercado se fundamenta en el margen de capacidad del sistema eléctrico; es decir, en la capacidad remanente (oferta menos demanda) que se tenga para responder a incrementos en la demanda. Esta variable genera una señal que impulsa al sistema en dos sentidos: oferta y demanda.

Por un lado, con respecto a la oferta. Cuando el margen es estrecho los precios son altos y esto, adicional a otros elementos (regulación, subastas, perspectivas futuras, disponibilidad de recursos, etc.) se constituyen en incentivos para la construcción de capacidad adicional. Lo cual, en el mediano plazo, se refleja en mayor capacidad de generación en el Sistema, que se traduce en la ampliación del margen.

Por el otro lado, con respecto a la demanda. Cuando los precios son altos, la demanda se contrae vía eficiencia, ahorro o desplazamiento hacia alternativas; lo cual a su vez influye sobre el margen, ampliándolo.



En el modelo también se tiene en cuenta que los hogares pueden contar sistemas fotovoltaicos y producir energía para sus necesidades. Este modelo incluye las diferentes regiones del país que contribuyen a generar energía 100% renovable.

Ilustración 2: Hipótesis del comportamiento dinámico – Fuente: elaboración propia

Pasamos entonces a explicar de manera detallada las relaciones causales entre las diferentes variables de la Ilustración 2. El margen de capacidad depende de la diferencia entre la demanda de electricidad y la capacidad total instalada, lo que influye en el precio de la electricidad y tiene un efecto sobre la demanda de electricidad (bucle de retroalimentación negativa B1). El ciclo de retroalimentación negativa B2 describe cómo el precio de la electricidad proporciona una señal para la inversión en capacidad y a mediano plazo influye en el margen de capacidad.

El ciclo de retroalimentación negativa, B3, corresponde a la dinámica del mercado de capacidad. El margen futuro depende de la capacidad instalada futura y demanda futura de electricidad. Si el margen futuro disminuye, la energía futura requerida aumenta; desencadenando las subastas de capacidad dando como consecuencia, aumento en la capacidad instalada futura.

Para el ciclo de retroalimentación positiva R1, el precio de la electricidad afecta la demanda de electricidad de la red, lo que tiene un efecto en cadena sobre las demás variables que hacen parte del ciclo de retroalimentación R1.

El cuarto ciclo de equilibrio B4 describe la dinámica entre la generación de electricidad y la congestión de la red eléctrica, así como sus efectos sobre el precio y la demanda de electricidad. A medida que aumenta la demanda futura de electricidad de la red, se necesita más infraestructura de transmisión, pero si las inversiones en capacidad de transmisión han sido insuficientes e involucran escalas de tiempo prolongadas, provocan congestión.

Estos ciclos son los que se representan en el modelo matemático que se genera en la representación de los Diagramas de Forrester en el software de Dinámica de Sistemas. Cada una de las variables, relaciones y dinámicas quedan allí representada. Es con base en esa estructura que se pueden simular múltiples escenarios derivados del nivel de intensidad o incidencia que pueda adquirir una de las variables o interrelaciones.

6.2.2 Modelado específico de la investigación actual

Ahora bien, para la presente investigación, el modelo incorpora los dos más importantes impulsores encontrados en el ejercicio de escenarios: poder gobierno que favorece las energías renovables y poder ciudadano que favorece las energías renovables. Ilustración 3.

En el primer caso, desde el poder del gobierno, se aprecia como ante un apoyo vigoroso de las renovables se favorecen tanto los incentivos para las renovables a gran escala como la regulación que favorece la generación distribuida renovable, y al mismo tiempo se desincentivan los combustibles fósiles. Esto conlleva círculos virtuosos en favor de las renovables, hasta copar las necesidades.

En el segundo, desde la perspectiva de la ciudadanía, se aprecia como un apoyo de la ciudadanía a las renovables promueve tanto la generación distribuida como aquella a gran escala, en contra de las tecnologías fundamentadas en combustibles fósiles. No obstante, esto no quiere decir que el apoyo hacia las renovables a gran escala es ilimitado (esto último no está expresado explícitamente en la figura)

Los diferentes escenarios son simulados dependiendo de sus respectivas características. Es así como, en el escenario Democracia Verde, los precios relativos de tecnologías renovables vs las fósiles influyen positivamente en preferir las primeras, sumado a que los parámetros de propagación las favorecen dado que las condiciones son favorables. De manera similar, en el escenario La Casa en Llamas, la ausencia de incentivos del gobierno sumados al desinterés de la sociedad conduce a que los parámetros asignados no favorezcan la adopción de energías renovables. Los demás escenarios se simulan teniendo en cuenta sus características particulares.

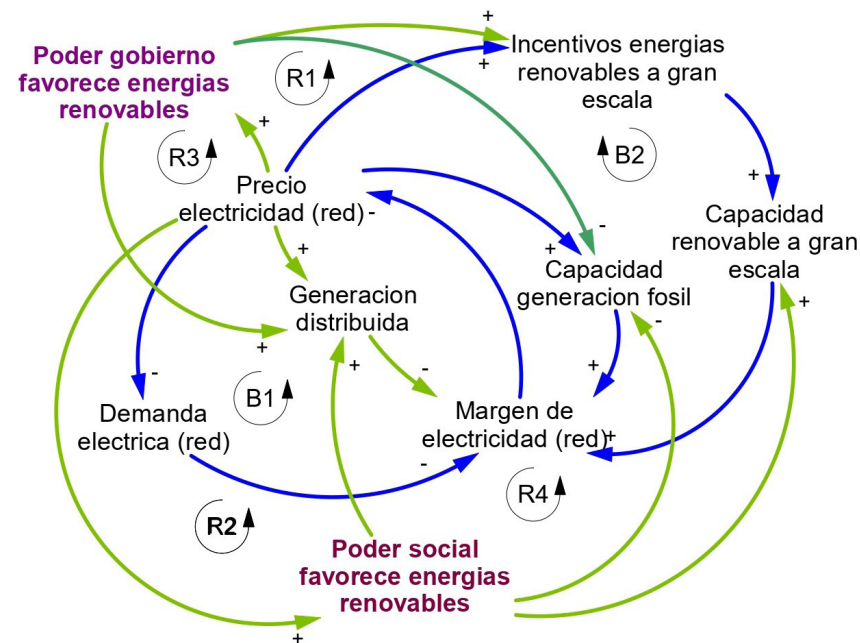


Ilustración 3: Análisis de Fuerzas Impulsoras. Fuente: elaboración propia

6.2.3 Explicando como el modelo produce resultados de simulación

Como se puede observar en las figuras anteriores, el modelo realiza la expansión de la capacidad de generación cuando se estrecha el margen del sistema (es decir la relación oferta vs demanda) teniendo en cuenta consideraciones de políticas o incentivos (principalmente el precio de la electricidad, cargo por confiabilidad y subastas de renovables).

De acuerdo con lo anterior, el nuevo equipamiento se adiciona especialmente dependiendo de los costos nivelados de la la electricidad producida y de los tiempos que se tarda en la construcción de las plantas. Por estos elementos, en primer lugar se prefieren las nuevas renovables, después las plantas filo de agua, posteriormente las hidroeléctricas y finalmente las fósiles. No

obstante, dependiendo del escenario, hay otras consideraciones, como en el caso de democracias verde, en el cual se descartan las tecnologías fundamentadas en combustibles fósiles. En cuanto a decisiones de política pública, y por aspectos de tiempo, este estudio excluye hidroeléctricas de tamaño mediano o grande para satisfacer la demanda a 2030.

Además de lo anterior, el modelo contempla la generación distribuida. Es decir, en lo fundamental, las soluciones tipo techos solares. Bajo condiciones de costos cada vez más bajos de las solares, y de las políticas de subsidios para las renovables, estas tecnologías son las preferidas, particularmente en el escenario democracia verde.

En cuanto al despacho eléctrico, este se simula por “orden de mérito” (es decir, de la más barata a la más cara) y considerando primero plantas tipo filo de agua o afines (solar y eólicas), y después energías fósiles, hasta satisfacer la demanda. Puesto que este estudio contempla dos regiones en el país (Caribe y el resto del país), lo anterior depende también de la capacidad de transmisión, para poder lograr intercambios entre ellas.

Es importante entender que el modelo simula la forma como se podría cumplir con el objetivo de entregar 100% de electricidad renovable a la demanda. Esto se fundamenta en que ella es la energía más económica actualmente, la que “no se puede almacenar” y la más limpia de todas. Esta manera de hacerlo no es la única posible, pero es una de las formas más empleadas en el mundo.



Resultados de las simulaciones

Con base en los escenarios que sirvieron de base para realizar las simulaciones se pudo obtener una visión de lo que puede ser el parque de generación eléctrico en términos de capacidad instalada por tecnología (en MWp), así como el despacho de generación de las distintas tecnologías a través del periodo de análisis –2021 a 2030– (en GWh). Los siguientes párrafos describen los resultados de las simulaciones para los distintos escenarios. Al hacerlo, tejen además los elementos más “narrativos” del ejercicio de escenarios de manera que se puedan presentar trayectorias coherentes y plausibles hacia esos distintos futuros posibles.

7.1 Democracia Verde

En el escenario (+,+) “Democracia Verde”, confluyen un compromiso político hacia 100 % electricidad renovable y el apoyo de la sociedad, en todos sus niveles, a una participación mayor de las energías renovables. Es decir, la democracia verde presupone un cambio en el relacionamiento político, social y económico alrededor de proyectos minero-energéticos. Este cambio puede manifestarse de distintas maneras, por ejemplo, cambios en los modelos de propiedad de las tecnologías renovables,² mejoras en la incidencia local efectiva sobre la escala o la ubicación de los proyectos,³ o un mayor poder de decisión sobre el uso final de la energía,⁴ entre otros.

En las discusiones con los actores que participaron en los talleres, así como en distintas revisiones de literatura sobre aceptación de las energías renovables en distintos niveles (véase por ejemplo Batel, 2020; Levenda et al., 2021), temas como el tamaño, la ubicación, la propiedad, el control o la distribución de “bienes” y “males” ligados a las energía renovables han jugado un papel central. Según el material revisado, la inclusión y participación eficaz, transparente y libre en espacios de planeación y toma de decisiones en materia de FNCER parecen entonces ser pilares centrales para que se configure esa “licencia social” de la que se ha hablado en secciones anteriores. Por ello, para este escenario, nuevas formas de relacionamiento y asociación como las brevemente descritas anteriormente son de los pocos caminos que plausiblemente permiten obtener el aval de actores en el territorio, la industria, las ciudades, los sindicatos minero-energéticos etc., para acelerar la transición del sistema eléctrico hacia las FNCER.

² Por ejemplo cooperativas de generación de energía, comunidades energéticas o autogeneración.

³ Permitiendo que por ejemplo se le dé prioridad a parques eólicos de menos tamaño ubicados en lugares aceptables para quienes habitan los territorios afectados.

⁴ Privilegiando por ejemplo el (auto) consumo local o aquel dirigido a servicios esenciales o de alto valor agregado, por encima de usos energéticos impopulares como la minería de carbón o el fracking.

Solamente con base en ese aval social, y contando con la voluntad política a favor de un sistema eléctrico 100 % basado en energías renovables, es que luego el escenario se permite anticipar que se pueden efectuar muchos proyectos de energía renovable en todo el país (incluyendo La Guajira) de manera rápida, a lo que se suma un boom de la generación distribuida. Debido a las distintas manifestaciones de resistencia territorial en contra de emprendimientos extractivos (para el presente análisis particularmente en lo que tiene que ver con la extracción de carbón e hidrocarburos), este escenario solo mantiene su consistencia si los cambios del sistema eléctrico se extienden a una transformación del sistema minero-energético que consiga reducir el extractivismo vigente, reduciendo así la enorme demanda energética de este sector, así como sus impactos socioterritoriales.

Otro aspecto que hace parte de este escenario es el crecimiento del sector industrial, así como una reconversión energética del mismo en la que se sustituya el uso de energéticos de origen fósil por energía eléctrica. Parte de esto tiene que ver con la importancia de que la transición energética del sector eléctrico pueda generar empleo de calidad, algo que a nivel global se asocia sobre todo al segmento de producción de tecnología y fabricación de componentes. Esto está ligado en segundo lugar a que la voluntad política y el aval social para una transición energética a 100% electricidad renovable pueden apalancar la sustitución tecnológica en otros sectores como la industria o el transporte, acelerando la electrificación de la economía.

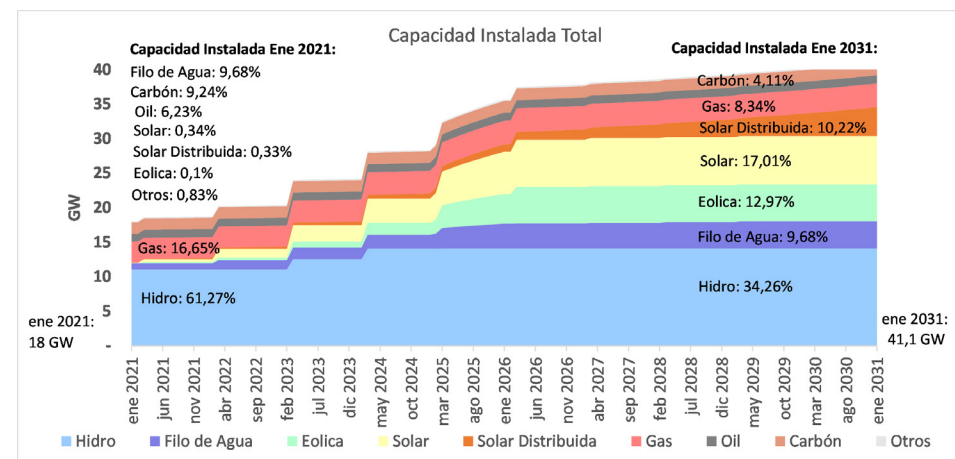


Ilustración 4: Capacidad total bajo escenario Democracia Verde – Fuente: elaboración propia

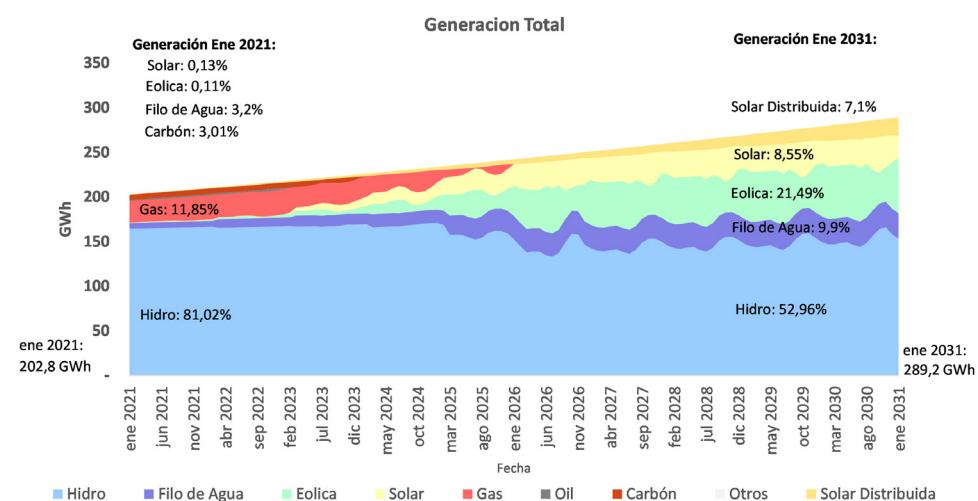


Ilustración 5: Generación total bajo escenario Democracia Verde – Fuente: elaboración propia

⁵ En caso de que no se den esos factores, pueden resultar situaciones más parecidas a otros escenarios. Por ejemplo, de continuarse el extractivismo y no cambiar el modelo de relacionamiento, pero sí se persigue una expansión de las FNCER, el escenario puede ser más bien el de “extractivismo de energías renovables”.

7.2 Greta

El escenario (-,+) “Greta” toma su nombre de la activista Greta Thunberg, fundadora el movimiento Fridays for Future, y hace referencia a un escenario donde la sociedad está claramente a favor de un sistema energético cada vez más renovable, mientras que la política se encuentra aún a favor del status quo y continúa favoreciendo un sistema eléctrico con una combinación de energía fósil y renovable. En este escenario, el gobierno nacional promueve algunos proyectos a gran escala de FNCER, en especial para surtir de electricidad barata al sector extractivo, pero sin ninguna intención de reducir y menos de acabar la generación eléctrica con combustibles fósiles. Se pretende una complementariedad por encima de una sustitución. Ante la inacción e indiferencia estatal, actores sociales en los territorios, la industria y la sociedad civil se unen para desplegar más FNCER, en especial generación distribuida. Por ende, confluyen una notable presión de la sociedad por avanzar en la transición, con (in)acción desde el Estado para retrasarla.

En este escenario, se da un aumento importante en la autogeneración, así como de proyectos a pequeña y mediana escala que unen a consumidores, negocios y comunidades en emprendimientos y comunidades energéticas. Por otro lado, solo en algunos pocos hogares e industrias avanza la electrificación de la economía. Dado que en este escenario no se reduce el extractivismo, la demanda de electricidad de este sector continúa creciendo.

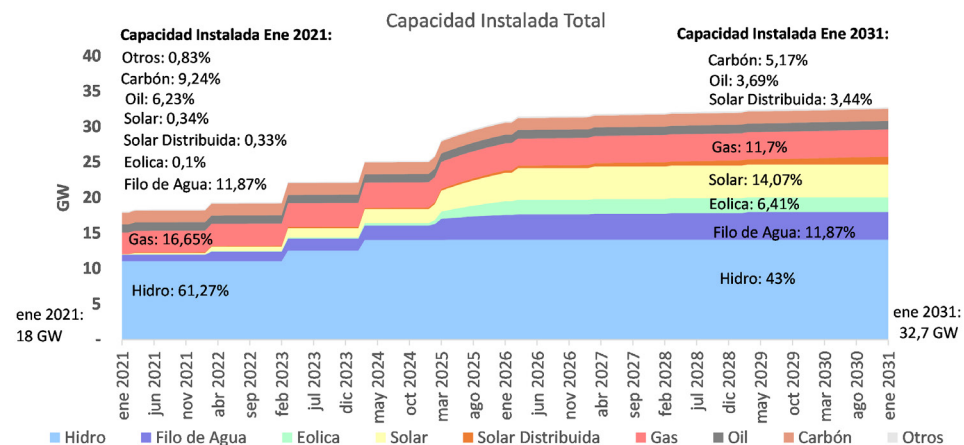


Ilustración 6: Capacidad instalada total bajo escenario Greta – Fuente: elaboración propia

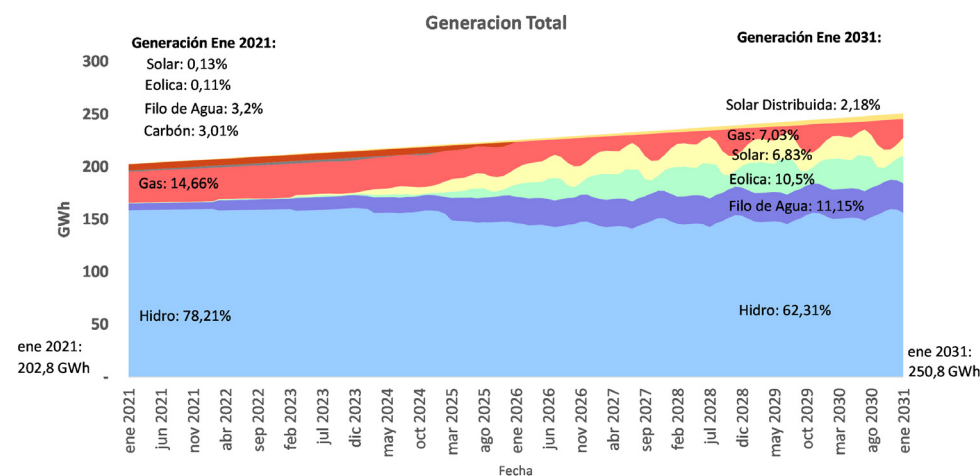


Ilustración 7: Generación total por fuentes bajo escenario Greta – Fuente: elaboración propia

7.3 Extractivismo de Energías Renovables

En el escenario (+,-) “Extractivismo de Energías Renovables” surge una voluntad gubernamental por materializar un sistema eléctrico 100 % renovable, que se enfrenta con reparos desde la sociedad, en distintos niveles, al avance de más energías renovables. En este escenario, no se modifica el modelo de relacionamiento social, político o económico, ni se reduce el papel del extractivismo (de combustibles fósiles o de otro tipo) en la economía colombiana. Por el contrario, se trata de imponer proyectos de FNCER de gran escala, en territorios donde existe gran conflictividad socioambiental y que, cuando finalmente entran a operar, en vez de beneficiar a grandes partes de la sociedad, muchas veces terminan tan solo abaratando los costos de electricidad de la extracción de hidrocarburos y carbón (especialmente en La Guajira, Cesar y los Llanos Orientales).⁶ En este escenario, las FNCER desplazan a las térmicas, sin un proceso organizado de transición justa. A la vez se construyen o priorizan diversos proyectos (ej. smelters) que consumen altos niveles de electricidad renovable. Se profundiza la conflictividad socioambiental en los territorios, llevando a que se generen reparos y procesos de resistencia, que pueden terminar deslegitimando y retrasando proyectos de FNCER.

En este escenario, los incentivos vigentes a las FNCER no se modifican para reducir su regresividad.⁷ Por ello y debido a un creciente costo tributario que no se ve reflejado en mejores resultados sociales o ambientales, desde la sociedad a nivel más amplio también se empiezan a generar reparos en contra de los incentivos de la Ley 1715/2014. En vez de aumentar la electrificación de la economía, en este escenario se promueven las inversiones para que al final del periodo de estudio se empiece con proyectos piloto para la producción de hidrógeno (verde y azul).

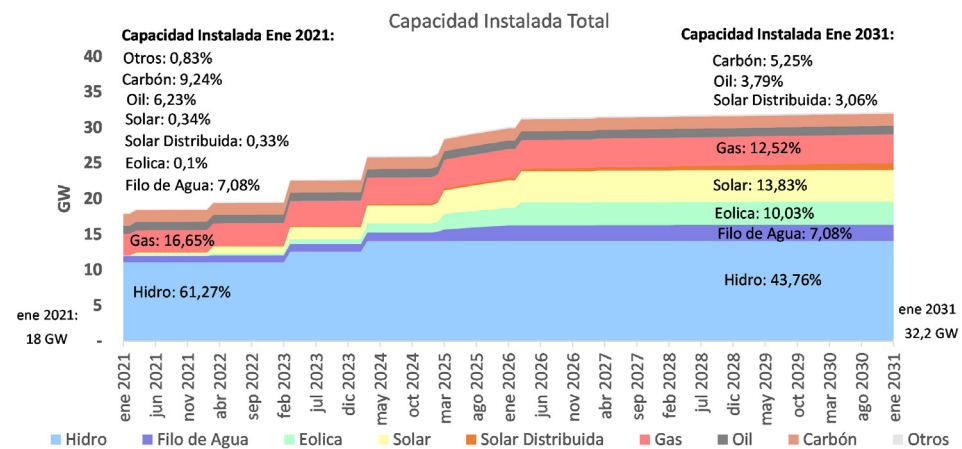


Ilustración 8: Capacidad instalada total bajo escenario Extractivismo Renovable – Fuente: elaboración propia

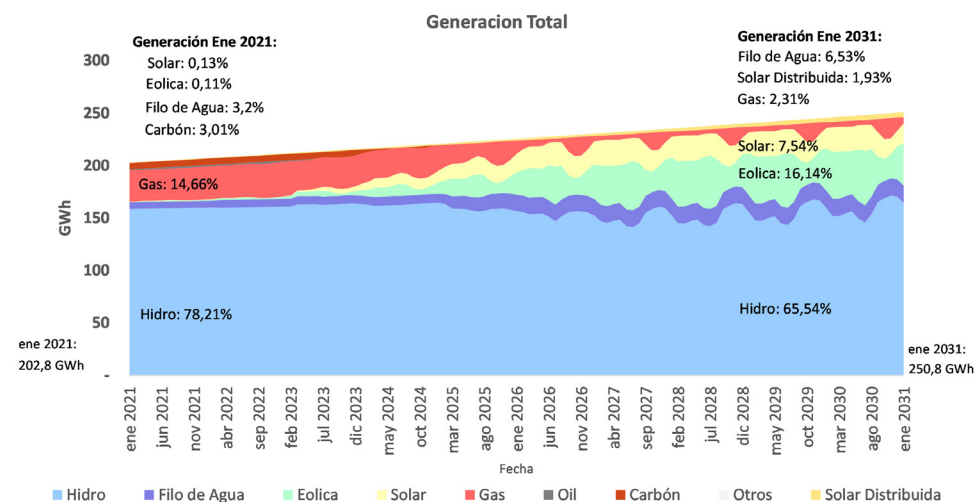


Ilustración 9: Generación total bajo escenario Extractivismo Renovable – Fuente: elaboración propia

⁶ Varios trabajos han problematizado por ejemplo la trayectoria actual de las transiciones energéticas en La Guajira (véase González Posso & Barney, 2019; Ulloa, 2021).

⁷ Ésta se da por los incentivos predominantemente cobijan a quienes mayor consumo eléctrico tienen y a quienes pagan impuesto a la renta (que son también quienes mayores ingresos tienen), mientras que de-facto excluyen a quienes menores ingresos o patrimonio tienen.

7.4 La Casa en Llamas

En el escenario (-,-) “La Casa en Llamas”, se une una oposición política a 100% energía eléctrica renovable con los reparos desde la sociedad en sus distintos niveles a un aumento de la energía renovable en el sistema energético. El gobierno promueve la expansión de termoeléctricas a gas y carbón como complemento a las FNCER. Al mismo tiempo que se persigue una profundización del extractivismo de combustibles fósiles en búsqueda de ampliar la producción de los mismos tanto para exportación como para consumo interno, se trata de imponer proyectos de FNCER, especialmente en La Guajira, así como proyectos de exploración y explotación de hidrocarburos y minerales con una gran demanda energética. No se modifica el esquema de relacionamiento social, económico y social, llevando a un aumento en la conflictividad y en la violencia socioambiental. Esto conlleva un retraso muy importante en los proyectos de FNCER, que apenas empiezan a funcionar a mediados de la década. Los crecientes costos del esquema de incentivos a las FNCER y al gas fósil (Leyes 1715/2014 y 2099/2021) hacen que se dé una creciente resistencia, llevando a que estos se marchiten y que solo los subsidios o beneficios tributarios vigentes para la extracción y al uso de combustibles fósiles sigan vigentes. Solo se alcanzan mínimos avances en la electrificación de otros sectores de la economía.

En el Anexo 2 se pueden apreciar las simulaciones correspondientes a la evolución de la capacidad instalada y la generación durante el día y la noche, así como los intercambios de electricidad entre las dos regiones consideradas en este estudio (importaciones y exportaciones entre la Costa Atlántica y el resto del país). Estas para cada uno de los escenarios planteados.

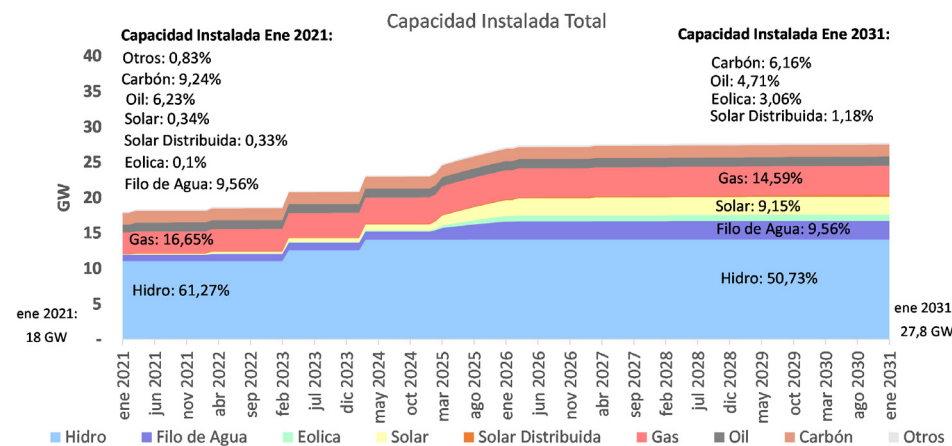


Ilustración 10: Capacidad instalada total bajo escenario La casa en llamas – Fuente: elaboración propia

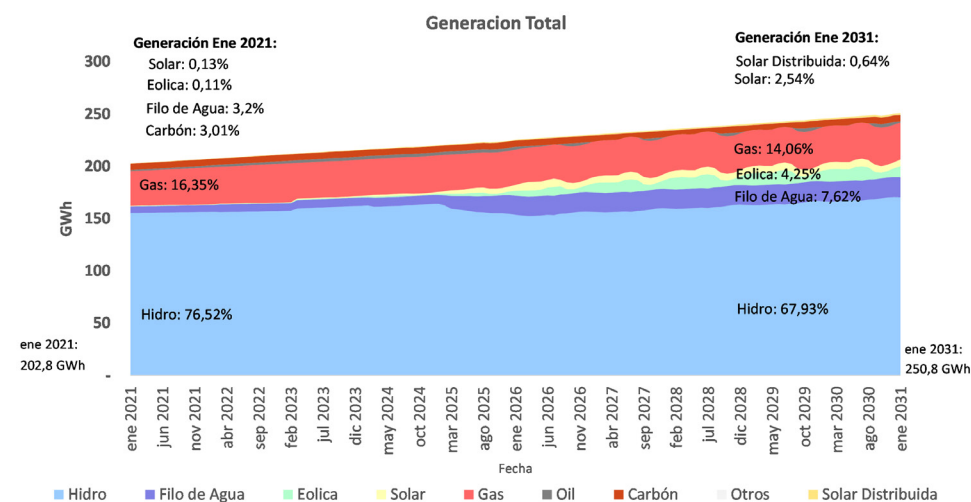


Ilustración 11: Generación total bajo escenario La casa en llamas – Fuente: elaboración propia



Discusión de los escenarios y simulaciones que cumplen con los objetivos

Los diferentes escenarios difieren, como ya se presentó en las características correspondientes al extremo de los ejes que definen a cada uno. Las decisiones de política pública deben, por un lado, reflejar esa característica proponiendo profundizar, incrementar y sacar mayor partido a las tendencias positivas hacia la implementación de 100% renovables y, por el otro lado, protegerse y aminorar las consecuencias de las tendencias que dificultan o retrasan dicha implementación. A continuación, se discute brevemente el alcance y las limitaciones de la combinación entre el ejercicio de creación de escenarios y su aplicación dentro de las simulaciones realizadas. Luego, detallamos las implicaciones de aquellos escenarios en donde se cumple el objetivo del estudio de llegar a tasas de generación eléctrica de 100% energía renovable.

8.1 Democracia Verde

En el escenario de “Democracia Verde”, en el que se conjugan los valores más promisorios de cada eje para la implementación de 100% renovables y aplicando lo señalado, las recomendaciones generales de política irían en la dirección de aprovechar ambas tendencias para que el logro del objetivo sea lo más rápido, completo y contundente posible. A pesar de ser el escenario más optimista, no necesariamente es el escenario más sencillo de materializar. Obtener el aval social, en los distintos niveles y escalas en las que este es esencial para una transición en clave de “democracia verde”, implica reformas profundas y alto compromiso político. De lo contrario, es totalmente improbable que se vayan a poder alinear los apoyos sociales a nivel territorial y nacional.

Tomando en cuenta los predeterminados y las incertidumbres que se presentaron en la sección 4.4, para que este escenario se dé, los cambios necesarios son múltiples y muy profundos. Dichos cambios van desde la progresividad de los incentivos a las FNCER, pasando por la inclusión y participación efectiva, libre, informada y vinculante por parte de actores locales en diseño y la planificación de proyectos de FNCER, llegando a cambios sustanciales en la forma en que se hacen los negocios en el sector⁸ y cómo se administra la energía⁹. Dicho de otra manera, obtener el aval social, en los distintos niveles y escalas en las que éste es esencial para una transición en clave de “democracia verde”, implica reformas profundas y muchísimo compromiso político. De lo contrario, es totalmente improbable que se vayan a poder alinear los apoyos sociales a nivel territorial y nacional.

Algunas reformas en dirección hacia este escenario podrían incluir mejoras a los procesos de consulta previa, cambios en el diseño y la planificación de política minero-energética, promoción activa

⁸ Por ejemplo superar la estructura oligopólica actual del mercado de generación.

⁹ Por ejemplo desde un modelo central estructurado alrededor del SIN, a uno más descentralizado con precios nodales o incluso con regiones energéticas autónomas.

de electrificación en todos los sectores, políticas de fomento industrial para sectores estratégicos de la transición, monitoreo y seguimiento cercano a la situación de aceptación política de los proyectos, así como intensificación de los programas de eficiencia energética. Por todo lo anterior, este escenario tiene que verse como el más aspiracional del presente ejercicio.

Un factor de optimismo respecto a la factibilidad de este escenario reside en que este escenario presenta la mayor similitud con lo que se expuso tanto en el plan de gobierno¹⁰ del Presidente electo Gustavo Petro, como en el informe¹¹ sobre su comité de empalme con el gobierno saliente en el sector de minas y energía, en donde se habla con frecuencia de muchos de los cambios de los que se habló en la construcción de este escenario.¹² Sin embargo, el presente análisis es tan solo un pilar más para continuar y profundizar más en la investigación y el trabajo sobre transición del sistema eléctrico (véase sección 9 para mayor detalle).

8.2 Extractivismo de Energías Renovables

En este escenario la voluntad política de promover la electricidad renovable básicamente continúa e incluso profundiza el proceso actual de desplegar soluciones de FNCER a gran escala, sin pretender modificar el modelo vigente de relacionamiento, ni de explotación de recursos naturales. Por ello, incluso si se hace a pesar o en contra de distintos actores,¹³ la transición que se da en este escenario se reduce casi que exclusivamente al ámbito tecno-económico, y se restringe al sistema eléctrico. Para que este escenario se materialice, sucesivos gobiernos tan solo requerirían

abandonar los subsidios a las termoeléctricas y continuar promoviendo las FNCER dentro del marco legal, institucional, económico y político vigente en 2021. En comparación a la situación que se refleja en los predeterminados, mucho se queda sin cambiar.

Por ello, este escenario debe enfrentar los desafíos de una alta y probablemente creciente conflictividad socioambiental alrededor de la continuación de distintos proyectos de generación de energía renovable así como de procesos extractivos, ligada a la expansión o profundización del extractivismo que llega al ámbito de las energías renovables.¹⁴ Además, este escenario contempla que la sociedad a nivel nacional cada vez tenga más reparos para apoyar la expansión de las FNCER si éstas favorecen a unos pocos y al sector extractivo, sin necesariamente reducir la huella climática de Colombia¹⁵, y mucho menos, hacer frente a los problemas de desigualdad en la distribución de beneficios y afectaciones a nivel territorial con relación a las actividades extractivas. Por ello, en este escenario es de esperar que, como en los proyectos adelantados hasta 2022, el esfuerzo gubernamental se enfoque en reprimir la conflictividad socioambiental de los grandes proyectos mineros y energéticos, y no en tramitar o prevenir estos conflictos (véase Puerto-Chaves & Corral-Montoya, 2022 para el caso del sector carbonífero, por ejemplo). Y que los mecanismos de participación existentes se usen para legitimar decisiones tomadas en las entidades nacionales sin posibilidad de contestación desde el territorio.

¹⁰ <https://gustavopetro.co/programa-de-gobierno/>

¹¹ <https://tinyurl.com/3trfurh7>

¹² Es el caso de cambiar el relacionamiento social alrededor de las FNCER, alterar la distribución de costos/beneficios en el proceso de transición, desescalar el extractivismo minero-energético, entre otros.

¹³ Entre los que pueden estar comunidades afectadas por parques eólicos o solares, trabajadores de termoeléctricas afectados por su cierre anticipado y no planeado, entre otros.

¹⁴ Concretamente nos referimos a la posibilidad de que, de nuevo, se establezca un modelo de intervención a gran escala de un territorio (pe. a través de parques eólicos) con el objetivo de extraer una commodity (en el corto plazo electricidad y más adelante posiblemente hidrógeno) con el ánimo de hacer ventas externas predominantemente (véase Ulloa, 2021 al respecto).

¹⁵ Recordemos que en este escenario no se reduce necesariamente la extracción de combustibles fósiles para exportación, incluso si se reduce la generación eléctrica con estos energéticos.

8.3 Greta

En el escenario “Greta”, la voluntad política está en contra de un sistema eléctrico 100% renovable, mientras que la disposición social favorece mayor energía renovable. Este escenario se puede leer entonces como uno en el que se da una apropiación desde distintos niveles de sociedad de las tecnologías de FNCER, a pesar de la inacción o los obstáculos que impone la política. En ese orden de ideas, la implementación de pequeños sistemas de generación solar y eólica, así como mayor adopción de vehículos privados eléctricos, apalancados en la acción desde el sector privado, los entes territoriales (municipios y departamentos), las comunidades y los hogares.

Este auge se da en paralelo a un ligero incremento en el despliegue de las FNCER a gran escala a través de mecanismos convencionales como las subastas y no afecta en gran medida ni el relacionamiento desde el Estado ni la destinación final de gran parte de la energía. Sin embargo, actores de la sociedad civil son capaces de organizarse por medio de cooperativas energéticas, emprendimientos, empresas de innovación social, líneas de crédito e inversión innovadoras, entre otras. Estas les permiten acceder a los incentivos fiscales y tecnológicos actuales (que están más diseñados para proyectos a gran escala y centralizados) para aplicarlos en proyectos de menor escala y más descentralizados.

Esto resulta, para aquellas comunidades y empresas que adoptan dichas tecnologías, en considerables efectos de economía de escala, lo que abarata el costo del consumo eléctrico considerablemente. Sin embargo, dada la inacción del Estado para crear regulación que promueva la masificación de nuevas secciones de mercado relacionadas a las energías renovables (e.g. intercambio peer-to-peer, ley de propiedad horizontal para conjuntos residenciales autogeneradores, regulación para venta de excedentes de generación eléctrica al sistema interconectado, etc.) el despliegue y uso de nuevas tecnologías en este escenario es más bajo que en el escenario de la “democracia verde”. En pocas palabras, en este escenario el avance en las energías renovables se da a pesar de y no a causa del gobierno.

8.4 La Casa en Llamas

Finalmente, en el escenario “La Casa en Llamas” se conjugan los valores menos prometedores de los ejes para el logro de 100% renovables. Este escenario refleja una continuidad de políticas previas de promoción de la generación eléctrica con combustibles fósiles, así como un aumento de la extracción de estos con fines de exportación; simultáneamente, a pesar de la conflictividad socioambiental, no hay iniciativas y acciones claras desde la sociedad para la adopción de energías renovables.. En este escenario, es muy probable que Colombia sea incapaz de cumplir con los compromisos de mitigación del cambio climático a los que se ha comprometido ante las Naciones Unidas. Además, dado el alto uso de gas en este escenario, y las bajas reservas de este combustible en Colombia, es probable que en este escenario Colombia se convierta en un importador de gas natural antes de 2030, con impactos económicos y fiscales significativos.

8.5 Alcance y limitaciones del estudio

Como se pudo discutir en secciones anteriores, tanto los escenarios como las simulaciones tienen un alcance limitado. Por ello, es crucial aclarar para qué sirven y cómo pueden ser interpretados, pero también para qué no y cómo se pueden evitar interpretaciones erróneas.

8.5.1 Los escenarios

En primera medida, los escenarios constituyen una aproximación a los factores determinantes técnicos, sociales y políticos para conseguir un sistema eléctrico 100% basado en energía renovable para 2030. Debido a sus limitaciones de inclusión o participación que impuso el marco del proyecto (ver sección 4.6) y a las limitaciones de modelo para incluir variables como ubicación y tamaño de los proyectos (sección 6.3) éste estudio de ninguna manera puede ser interpretado como uno que de certezas sobre cómo obtener un “aval” o “licencia social” a la transición en el

sistema eléctrico o como uno que presente un “único” camino para la realización de una voluntad política por 100% electricidad renovable.

Como se planteó desde el principio, los ejercicios de escenarios constituyen intentos por explorar distintos futuros posibles. En el marco de proyectos como este, en los que se pretende ofrecer una serie de visiones informadas sobre lo que podría ser el futuro de territorios enteros en los que se desarrollaría la transformación del sistema eléctrico, independientemente de la dirección que esta tome, es crucial hablar de participación e inclusión. El presente estudio trató de incluir a una muestra diversa de actores de distintos sectores (sociedad civil, empresariado, gobierno, academia) en la construcción de los escenarios. Sin embargo, el estudio no incluyó en ninguno de los espacios a habitantes o representantes de las personas afectadas por los proyectos contemplados en los escenarios.

A diferencia de los escenarios de generación eléctrica producidos por el gobierno (UPME), que no consideran factores de aceptabilidad social, nuestras simulaciones representan un avance para incluir ciertos factores de posible conflictividad social. Por ejemplo, no se han incluido tecnologías que no han sido empleadas en Colombia y por ende no cuentan con el aval social (ej. energía nuclear o CCS) ni se asume la entrada de tecnologías que tienen una gran conflictividad socio ambiental (ej. hidroeléctricas a gran escala) más allá de las ya existentes. Además, se consideran diferentes grados de “retrasos” en la instalación de nuevas capacidades de generación, reflejando el hecho de que el bajo consenso social tiene consecuencias explícitas en la implementación de la planeación energética.

8.5.2 El modelo

Cabe señalar que, como todo modelo, al ser solo una simplificación de la realidad, el modelo no está exento de limitaciones, que se pueden convertir en interesantes avenidas de investigación dentro y fuera del grupo de modelación.

Para empezar, la demanda de generación eléctrica es una variable exógena al modelo, que se toma como un “dado” basado en las proyecciones del gobierno nacional. Esto impide que se puedan evaluar de manera endógena el impacto de la instalación de nuevas tecnologías para la gestión de la demanda eléctrica, así como evaluar escenarios de alta eficiencia energética o manejo “inteligente” de la demanda, que permita, por ejemplo, una menor diferencia entre la demanda máxima y la mínima, redistribuyendo las cargas en la curva de demanda de energía durante el día.

En segundo lugar, no se han tenido en cuenta en las simulaciones una serie de tecnologías que podrían, de ser incluidas, cambiar los resultados de la matriz eléctrica ideal para disminuir el costo de generación. Ejemplos de dichas tecnologías no incluidas son las baterías de almacenamiento de energía, la generación de electricidad eólica costa afuera (off-shore) y la generación de electricidad por medio de energía geotérmica.

En tercer lugar, en general el modelo tiene una baja granularidad temporal de optimización para el despacho, usando como insumo la demanda en una hora dada de un promedio, lo cual permite solamente estimar dos perfiles de generación “día y noche” pero no resultados detallados (p.ej. cada 15 minutos) de generación, para los cuales se requerirían intervalos de modelación mucho más cortos (ej. demanda granular cada 15 minutos). Además, tiene una baja granularidad espacial con respecto a la red eléctrica nacional, permitiendo únicamente distinguir entre dos regiones “centro y caribe”, lo cual hace imposible determinar la ubicación estimada posible de las nuevas tecnologías que entran al sistema, así como optimizar variables como cercanía a grandes centros urbanos, distancia a parques naturales, entre otras que podrían ser útiles para comparar de manera detallada los diferentes escenarios presentados. Esta misma limitación resulta en que las Zonas no Interconectadas no se tengan en cuenta en los resultados.

Por otro lado, el modelo considera las tecnologías de generación como un agregado total de los proyectos individuales existentes y da como resultado también valores de capacidad instalada agregada total por tipo de tecnología. Esto hace imposible determinar el tamaño de los proyectos de generación individuales

que son integrados al sistema, dificultando la evaluación de componentes como la aceptabilidad social de los diferentes escenarios. Al igual que la gran mayoría de modelos del sistema eléctrico, este modelo solo integra variables exógenamente provistas que afectan la capacidad instalada de FNCER, más no contempla variables socio ambientales o políticas más allá del precio de las tecnologías individuales. Si bien algunas variables como un impuesto al carbón, entre otras que afecten el costo podrían ser evaluadas por medio de este modelo, muchas otras que dependen de variables como la ubicación y tamaño de los proyectos (ej. aceptabilidad social) tienen que ser incluidas ex-post en la presentación/discusión/interpretación de los resultados.

Estudios que puedan analizar de manera más granular, temporal y espacialmente, dónde deben estar ubicadas, tanto las fuentes de generación, como las cargas, de manera que se reduzca al máximo la necesidad de generación y se minimicen los costos del sistema, algo que excede totalmente el alcance del presente estudio, pero puede inspirar a otros que lo sigan.

8.5.3 Síntesis

Este estudio se preguntó a partir de cuándo, basándonos en distintos escenarios, puede llegar Colombia a penetraciones de energía renovable en el mercado eléctrico de 100 %. Como resultado, el modelo nos muestra promedios, que se reflejan en horas puntuales en el año, más no la totalidad de horas en el mismo. La modelación basada en escenarios tampoco nos dice cuándo se podrán cerrar las plantas térmicas, qué tan susceptible será el sistema eléctrico a Fenómenos del Niño o la Niña extremos y prolongados, ni menos qué implicaciones tendría que un gobierno del futuro (en 2026, por ejemplo) decida revertir los cambios introducidos por el anterior. Responder estas interrogantes serán tarea de otros, nuevos estudios que vale la pena realizar. No obstante, el Anexo 3 muestra algunas sensibilidades preliminares que se le realizaron a los resultados del modelo.

Adicionalmente, queremos resaltar la importancia de proyectos de investigación interdisciplinaria como este. Somos conscientes

de que existen modelos de simulación sobre variables “tecnológicas” para la transición del sistema eléctrico (véase Dyner, 2020; Henao et al., 2019; Zapata et al., 2018). A la vez, la interacción con participantes de distintos sectores expuso al equipo a importante investigación y trabajo realizado desde orillas más críticas, especialmente desde las ciencias sociales (entre otros, González Posso & Barney, 2019; Román et al., 2020; Ulloa, 2021; Vega-Araújo & Heffron, 2022). Sin embargo, se identificó que existe un vacío de investigación interdisciplinaria que una ambas perspectivas y consiga entender cuáles son los “must-haves” y “no-gos” (Brand et al., 2021, p. 274) que desde los territorios y sus habitantes pueden darse ante las transiciones energéticas, y sin los cuáles es virtualmente imposible obtener aceptación social e incluso la co-creación social de la transición energética. En otros espacios, puede entonces tener sentido unos ejercicios de modelación con ejercicios de planeación de sistema eléctrico más detallados que incluyan esta perspectiva para no correr el riesgo de reproducir distintas formas de exclusión y al final de violencia, al decidir –incluso sin quererlo expresamente así– sobre territorios y vidas ajenas, sin consultar o vincular a las personas afectadas. Otra posible alternativa a esto consiste en elaborar procesos de modelación participativa, en los que se involucra activa y significativamente a actores no académicos en la modelación de manera que los modelos o simulaciones pueden mostrar y representar las visiones de sustentabilidad o futuro del sistema energético que éstos actores no académicos pueden tener (véase Dreyer et al., 2015; Ernst et al., 2018; McGookin et al., 2021; Moallemi & Malekpour, 2018; Ngar-yin Mah & Hills, 2014).

En el contexto de todo lo anterior, el presente estudio aporta una aproximación inicial para lo que podrían ser futuros del sistema eléctrico colombiano donde si es posible tener una matriz 100% renovable. Esa aproximación incluye elementos centrales para entender cómo se puede manifestar la confluencia entre lo que denominamos “orientación política favorable hacia electricidad 100% renovable” y “orientación favorable de la sociedad hacia las energías renovables”.



Conclusiones

Esta sección resume las conclusiones más importantes del estudio orientadas a enriquecer futuros procesos de investigación, así como la acción en política pública que se vaya a dar en materia de transición del sistema eléctrico.

9.1 Sobre el proceso de elaboración de escenarios

Si bien los ejercicios de escenarios como el presente sirven para explorar distintos futuros posibles (distintos a las visiones dominantes ya existentes), para futuros trabajos puede ser muy importante que éstos también propendan por un mayor grado de democratización, lo que requiere un nivel de recursos y tiempo considerablemente mayor al que había disponible en este proyecto. En el transcurso del presente trabajo aprendimos y resaltamos la importancia de un proceso multi-actor para la creación de escenarios que permita reflejar adecuadamente las vistas y posiciones de diferentes actores sobre la transición energética. Esto debe incluir a quien sea afectado por los procesos de cambio en discusión. Este tipo de procesos pueden sentar las bases para una planeación energética más consensuada, así como abrir espacios de diálogo con actores con opiniones y campos de acción divergentes resultando en una sensibilización mutua con respecto a sus posiciones y a argumentos alternativos, así como a un aumentando del rango de comprensión sobre temas complejos y multifacéticos como la transición energética entre los participantes. Más aún, puede sentar bases para evitar conflictos en el territorio y fortalecer la construcción de paz.

Por esa razón exhortamos a quienes continúen en esta línea de investigación a que se puedan adelantar procesos más participativos e incluyentes. Esto no necesariamente se debe restringir a la academia, sino también podría ser adoptado por entidades planificadoras como la UPME o el DNP.

9.2 Sobre los resultados cualitativos de los escenarios

Si bien la voluntad política siempre ha sido identificada como una incertidumbre y factor clave para la transición energética, nuestro ejercicio de escenarios resalta la importancia de la aceptabilidad social sobre las características y dirección de la política energética, que suele ser un factor olvidado en ejercicios de modelación técnico-económica.

En un país con alta conflictividad socio ambiental como Colombia, es imperativo aumentar el diálogo y consenso social sobre la transición energética, así como frenar el modelo extractivista actual. Este no solo retrasa la transición energética debido a la alta demanda de energía que las actividades extractivas representan, sino que agudiza la conflictividad socio ambiental actual.

Adicionalmente, ejercicios de construcción de escenarios con distintos actores pueden permitir evaluar las condiciones básicas que se tienen que dar para que un escenario pueda materializarse plausiblemente. En el presente caso, queda por ejemplo claro que, si no hay una alineación entre la voluntad política por 100% electricidad renovable y la disposición social en favor de más energía renovable, con las condiciones que se requieren para que tal alineación se dé, es poco probable que se pueda llegar a 100% electricidad renovable de manera rápida y, especialmente sin que esa transición desemboque en violencias, conflictos e injusticias.

9.3 Sobre los resultados cuantitativos de los escenarios

Independientemente del escenario, todas las simulaciones nos muestran resultados más ambiciosos que las actuales simulaciones de la UPME (2017, 2021) bajo las cuales un sistema eléctrico totalmente renovable no es posible antes de 2050. Por ello, es esencial que desde la UPME se contemple incluir escenarios de 100% electricidad renovable que analicen con mucha mayor granularidad bajo qué condiciones conseguir este objetivo es técnica y económicamente factible, teniendo en cuenta los lineamientos que se definan desde los territorios en los que se adelantarán las transiciones.

A diferencia de otros escenarios (véase Gobierno de Colombia, 2021; UPME, 2021), todas las tecnologías incluidas en nuestros escenarios son tecnológicamente comprobadas y listas para desplegar por todo el territorio colombiano. En particular, tecnologías como la de captura, almacenamiento y uso de carbono (CCUS) aplicado a termoeléctricas, o centrales nucleares (que se incluyen en los escenarios explorados por la UPME)

son completamente excluidas de nuestras simulaciones dada la incertidumbre y riesgo alrededor de las mismas, así como sus costos prohibitivos en comparación con las tecnologías consideradas.

En nuestras simulaciones no se incluye el uso de baterías como complemento para la generación de electricidad renovable dados sus actuales costos relativamente altos. Por lo anterior, nuestras simulaciones son conservadoras en cuanto al potencial de generación solar, en comparación con cualquier modelo que considere el uso de baterías. Futuros estudios podrían evaluar el aporte potencial de baterías de distintos tamaños a un sistema eléctrico que propenda a ser cada vez más renovable. De igual forma, estudios futuros también podrían integrar la variable de una gestión inteligente de la demanda para que los patrones de consumo se puedan adaptar a las condiciones de generación que los recursos renovables nos pueden proporcionar.

En nuestras simulaciones no se incluye la generación de electricidad de origen eólico mar adentro. La intención del gobierno saliente de instalar 8 GW de generación eólica mar adentro fue anunciada luego de cerrar nuestro proceso de modelado. Por lo anterior, nuestras simulaciones son conservadoras en cuanto al potencial de generación eólica, en comparación con cualquier modelo que considere el viento mar adentro. A pesar de no ser incluido en las simulaciones, los autores resaltan el potencial del viento off-shore para la generación eléctrica en zonas donde la conflictividad relacionada al uso de la tierra firme sea alta, o exista riesgo de afectar considerablemente los ecosistemas locales. Sin embargo, no se debe subestimar el potencial de conflicto que la energía eólica mar adentro puede generar con otros habitantes y usuarios de las áreas marinas (ej. pescadores, rutas de navegación, comunidades indígenas), así como con otros usos (ej. conservación).

En nuestras simulaciones no se incluye el uso de energía geotérmica como fuente de generación de electricidad renovable dadas las incertidumbres alrededor de esta fuente de energía.

Sin embargo, dado el enorme potencial, la intención del saliente y entrante gobierno de considerar este tipo de energía en futuras subastas, y los costos tan competitivos de esta fuente de energía, consideramos que es posible que entre en operación en los próximos 10 años y se convierta en un buen complemento a las energías renovables intermitentes. En un estudio realizado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) sobre la estimación del potencial geotérmico de Colombia se estima que el potencial geotérmico puede equivaler a cerca del 7% de la capacidad eléctrica estimada en 2018, también se destaca como una fuente competitiva que tiene como ventajas el ser altamente confiable e independiente de las condiciones climáticas (Alfaro et al., 2021). Por lo anterior, nuestras simulaciones son conservadoras en cuanto a la potencia de generación renovable, en comparación con cualquier modelo que considere la generación geotérmica.

Independientemente del escenario, reforzar la interconexión entre la zona norte y la zona centro del país es una de las medidas más urgentes y fundamentales para poder lograr la complementariedad entre fuentes de generación, la confiabilidad y estabilidad del sistema eléctrico, y la optimización de costos del sistema. Con una interconexión apropiada, es posible aprovechar el enorme potencial solar y eólico del norte del país en el día, y tener reservas de electricidad fluyendo desde el centro hacia el norte del país en la noche. Acá vale la pena aclarar que una de las limitaciones de nuestro estudio es que no contempla un sistema mucho más descentralizado que trate de minimizar la transmisión entre regiones y de generar la electricidad lo más cerca de las cargas posible. Sin embargo, esa puede ser una avenida de investigación futura.

Colombia tiene una enorme ventaja frente a la mayoría de los países del mundo para asegurar la estabilidad y confiabilidad de un sistema 100% basado en electricidad renovable: nuestras centrales hidroeléctricas, que ya generan más del 70% de la electricidad del país, pueden actuar como unas enormes “baterías naturales”, que permitan, gracias a su flexibilidad, compensar las irregularidades en la generación de energías intermitentes

renovables como el sol y el viento. Sin embargo, este es un punto a ser estudiado en detalle en futuros trabajos.

Para ello, es crucial estudiar si tienen que darse adecuaciones en la infraestructura o la regulación, de manera que las hidroeléctricas puedan reaccionar ágilmente ante la variabilidad de las FNCER más variables. Lo anterior, teniendo en cuenta además salvaguardar los ciclos ecológicos de los ecosistemas teniendo en cuenta la vulnerabilidad de los mismos a los efectos del cambio climático. Igualmente, es clave que, en aras de obtener el beneplácito de comunidades a nivel local y nacional, se trabaje desde los operadores de las hidroeléctricas y el gobierno en función de una mayor justicia ambiental, dado que históricamente las hidroeléctricas han estado asociadas a diversos conflictos socio-territoriales. Hacia adelante, lo estudiado en este trabajo permite inferir que temas de escala, impactos ambientales, consultas previas abiertas, libres, informadas y vinculantes, entre otros mecanismos de participación, son de gran importancia para obtener el aval territorial para estos proyectos.

Nuestros escenarios muestran el enorme potencial sin explotar de la generación solar distribuida para el sector residencial y comercial. Dichas tecnologías no solo son flexibles y accesibles en comparación a las versiones centralizadas y a gran escala de estas, sino que tienen un gran potencial para aumentar la aceptabilidad de la sociedad en general hacia la transición energética, al hacerlos partícipes y ofrecer el potencial de reducir los costos de su factura de electricidad. Dichas tecnologías tienen además un potencial enorme para proveer energía en zonas no interconectadas (para el acceso donde no hay o la reconversión de sistemas basados en combustibles fósiles), o aquellas que tienen un servicio de energía deficiente, promoviendo una mayor democratización energética y ofrecer las condiciones para proyectos productivos que ayuden a mejores condiciones de vida. A pesar de continuar siendo parte de la capacidad instalada, en nuestras simulaciones las centrales a base de carbón resultan generando electricidad con un factor de utilización muy bajo en todos los escenarios, desapareciendo completamente (en

promedio) del esquema de generación en tres de los escenarios planteados (año 2026 en los escenarios greta y democracia verde, y 2030 para el escenario de extractivismo de energías renovables). Dichas simulaciones no reflejan posibles aumentos de costos de operación de dichas centrales en los próximos años debido a los precios altos del carbón en el mercado internacional, o la implementación de un impuesto al carbono más alto, y son, por ende, conservadoras. Tampoco se considera la obsolescencia de los equipos y tecnologías. Esto quiere decir, que, para dichas centrales, es posible que no se justifique sostener la figura de cargo por confiabilidad. Desde nuestra visión, consideramos que hace falta investigar más qué efectos puede tener un fin o una modificación del cargo por confiabilidad, así como un aumento del impuesto al carbono para las plantas térmicas.

De materializarse una expansión de las FNCER por cualquiera de los caminos planteados en este estudio, es muy probable que más temprano que tarde se tengan que cerrar las plantas térmicas más viejas (ej. Termocartagena, Termozipa, Termosochagota, Termoguajira, etc.). Por ello, si se quiere promover un proceso de transición gradual y justa, es esencial que el gobierno y los operadores de dichas plantas se empiecen a preparar para realizar un cierre planeado que incluya las preocupaciones de los operadores, trabajadores, comunidades circundantes y demás partes interesadas, uniéndose a las iniciativas internacionales que apuntan a dejar el carbón atrás fuera de la matriz energética.

Igualmente, en varios de los escenarios las centrales térmicas a gas son desplazadas del despacho por la mucho más barata electricidad proveniente de las FNCER. Por ello, también es importante empezar a planear y prepararse para escenarios en los que las plantas que funcionan a gas, muchas de ellas relativamente nuevas, no funcionen. El desafío en este caso es doble: no solamente están en riesgo los empleos directos y la actividad económica circundante a estas plantas, sino que mucha de la infraestructura allegada a las térmicas a gas puede volverse obsoleta mucho antes de cumplir su vida útil. Es por ende fundamental que, desde el sector privado, el gobierno y la

sociedad civil se haga un riguroso seguimiento a las inversiones en proyectos nuevos que pueden rápidamente volverse activos varados en escenarios de alta penetración de FNCER como los que se presentaron en este estudio.

10

Recomendaciones de política pública para una hoja de ruta hacia 100% electricidad renovable en Colombia

Tras analizar los resultados del modelo propuesto para la presente investigación se encontró que en dos de los escenarios es posible llegar al 100% de la generación eléctrica renovable para 2030. Sin embargo, teniendo en cuenta lo discutido en la sección 8.2, que argumenta que hay distintas similitudes entre el programa de gobierno de la administración entrante, así como su informe de empalme en el sector de minas y energía, con el escenario “democracia verde”, esta sección se concentrará en elaborar la hoja de ruta a 100% electricidad renovable con base en este escenario.¹⁶

En el escenario “Democracia Verde” confluyen una voluntad política favorable hacia electricidad 100% renovable y una disposición social favorable, en distintos niveles, ante cada vez más energía renovable. Este escenario muestra, entonces, un futuro en el que, desde la administración pública y distintos estamentos de la sociedad, se coincide en adelantar la variedad de cambios requeridos para que se pueda obtener un “aval territorial” y un apoyo popular a la transición del sistema eléctrico, así como un apoyo político para materializarla.

En lo que respecta al modelo, el supuesto es que debido a esos cambios se puede desbloquear y acelerar el ritmo de despliegue de la capacidad de generación renovable, así como de proyectos de transmisión para el intercambio entre las regiones norte y centro. En las siguientes subsecciones se amplía la discusión acerca de los distintos pilares e hitos sobre los que se puede basar la ruta, dentro del escenario “democracia verde”, hacia 100 % electricidad renovable a 2030 en Colombia.

¹⁶ En el Anexo 4 se encuentra información adicional referente a los demás escenarios, así como el detalle de la evolución en las capacidades instaladas y la transmisión necesaria, para cada uno de los escenarios.

10.1 Hacia un nuevo modelo de relacionamiento

En este momento hay un importante número de proyectos de FNCER detenidos o demorados al no haber sido capaces de surtir procesos de licenciamiento ambiental, consultas previas, entre otros, a tiempo (véase por ejemplo Forbes Colombia, 2021; Mejía, 2021). Los trabajos de Gonzalez-Posso & Barney (2019), Ulloa (2021), Vega-Araujo & Heffron (2022) entre otros, son claros en concluir que sin modificar la forma en que se llega, opera y relaciona con los territorios, las empresas del sector eléctrico no pueden esperar mucho más que resistencia.

Dado que la expansión del parque de generación, especialmente eólico y solar es un pilar central para que el escenario “democracia verde” conduzca a 100% electricidad renovable, y que gran parte de esta expansión está proyectada para que ocurra en La Guajira, es justo acá donde tienen que iniciar los esfuerzos de transformación. El gobierno debería buscar activamente el diálogo con las comunidades indígenas Wayuu en donde se construirá la gran mayoría de parques eólicos y ofrecer un acompañamiento que le genere confianza y respeto a estas. A la vez, deberá ser proactivo en abrir el diálogo con las empresas que están adelantando los proyectos, de tal manera que se puedan explorar mecanismos de interlocución distintos a los existentes.

Como lo sugieren distintas fuentes (González Posso & Barney, 2019; Ulloa, 2021), existen varios indicios para saber que las comunidades Wayuu exigen poder incidir sobre el tamaño, la ubicación o la propiedad de los parques eólicos, así como sobre la destinación final de la electricidad que allí se produzca. Si el gobierno logra servir de árbitro y mediador entre las reivindicaciones territoriales de las comunidades Wayuu y los intereses empresariales, hay razones importantes para creer que las comunidades reduzcan su resistencia a muchos de los proyectos de FNCER. Si, por el contrario, se trata de imponer estos proyectos a la fuerza, no solo es posible que la resistencia se mantenga o aumente, sino que suceda lo que ha sucedido en otros proyectos de infraestructura, y se generen nuevos ciclos de violencia, algo que ya está ocurriendo alrededor de diversos proyectos eólicos (Barney, 2021; Mejía, 2021).

En el muy corto plazo, algo similar aplica a los proyectos de interconexión. Especialmente los proyectos Colectora 1 y 2 son centrales para el proceso de transición. Acá, de nuevo, sin el aval de los habitantes de los territorios afectados, será muy difícil avanzar en el proceso. De esa manera, para el gobierno puede ser crucial proceder a coordinar a las distintas entidades para que medien y arbitren los procesos en curso ciñéndose a los más altos estándares de DDHH y participación local.

Si bien lo anterior puede contribuir a mejorar el desenlace de los proyectos de FNCER que ya están en curso, cuando se habla de un replanteamiento del modelo de relacionamiento, este tiene que hacer parte central de todos los proyectos futuros. Como lo sugieren distintas investigaciones (véase Brand et al., 2021; Devine-Wright, 2015; Devine-Wright et al., 2022), la participación es un elemento central que incluye, por un lado, la incidencia efectiva en si un proyecto se realizará, dónde se construirá, qué tamaño tendrá, quién o quiénes tendrán la propiedad, cómo se distribuirán las ganancias y para qué usos se priorizará la energía. Por el otro, la participación puede y en muchos casos tendrá que incluir una copropiedad por parte de las comunidades locales (véase Bauwens & Devine-Wright, 2018; González Posso & Barney, 2019).

Concretamente, esto implica que desde distintos ámbitos se deberá cambiar la naturaleza de procesos como el de consulta previa, de manera que los proyectos no lleguen como hechos consumados al territorio, sino que surtan distintos pasos de interlocución para que una vez se llegue a consensos, los proyectos puedan proceder con celeridad. Para conseguir esto, se pueden fortalecer entidades existentes como la Defensoría del Pueblo o distintas organizaciones de la sociedad civil, de manera que puedan hacer un acompañamiento desde el principio a comunidades, equilibrando la asimetría que éstas muchas veces enfrentan ante empresas. A su vez, estos actores garantes, si cuentan con los recursos apropiados, pueden ir construyendo mapas de territorios y comunidades en donde ya hay claridad sobre líneas rojas y condiciones básicas para proyectos de FNCER. Con base en tales mapas y pliegos de condiciones, se puede proceder a buscar formas de viabilizar financieramente los proyectos. También se puede aprender y cooperar con otras entidades gubernamentales que, aunque no pertenecen al sector minero energético, tienen

experiencia en la construcción de diálogos sociales, como es el caso de la Comisión de la Verdad.

Debido a que los elementos anteriores tocan por lado proyectos de FNCER ya en curso o proponen cambiar elementos para futuros proyectos que pueden tomar tiempo, la siguiente subsección atiende elementos de apoyo al sector que puedan aplicar de manera más rápida.

10.2 Masificación de la energía solar distribuida

Debido al tamaño, costos y complejidad, las soluciones solares a gran escala, especialmente aquellas ubicadas en territorios con presencia de comunidades étnicas, áreas protegidas, entre otros, suelen demorarse considerablemente más que proyectos de menor escala (véase Ruiz-López et al., 2021) Como lo muestra el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en techos en lugares como Alemania, EEUU, Reino Unido o Australia, esta alternativa puede permitir que se instalen importantes capacidades de generación en tiempos relativamente cortos (Rystad Energy, 2022).

En consecuencia, para que se materialice la expansión en capacidad de generación de energía solar, es crucial que se promuevan proyectos de menor escala que no requieran pasar por largos procesos de licenciamiento ambiental o social (es decir, proyectos de menos de 1 MW de capacidad). La combinación de miles de pequeños (<100 kW) y medianos (>100 kW y < 1 MW) proyectos sobre techos y suelo puede contribuir de manera muy significativa a las metas de expansión de generación. La siguiente tabla muestra una combinación ilustrativa de proyectos¹⁷ que permitiría superar con creces los resultados que presenta el modelo de 11.729,93 MW instalados de energía solar para 2030. La tabla toma los cálculos de potencial tecnoeconómico de PNUMA (2021), así como los proyectos registrados ante la UPME (2022) para la

¹⁷ Esta combinación toma los tamaños promedio de proyectos de generación distribuida, que se identificaron en (PNUMA, 2021, p. 97). En ningún momento refleja los resultados del modelo y debe ser interpretado como un posible camino entre muchos para una expansión del parque de generación solar.

semana 30 de 2022. Dicho esto, **de aprovecharse todo el potencial tecnoeconómico para generación distribuida, y de construirse todos los proyectos actualmente registrados ante la UPME entre 2023 y 2030, Colombia podría llegar, en teoría, a una capacidad instalada total de generación solar superior a 16 GW.**

Potencia típica de proyecto (véase PNUMA 2021, p. 97)	Número de proyectos por año ¹⁸	Capacidad instalada por año desde 2023	Capacidad instalada total para enero/2030
Residencial - Estratos 1, 2 y 3, y usuarios no subsidiados con consumo menor de 2.500 kWh/a: 1.5 kW	7.619	11,428 MW	79,99 MW
Residencial - Usuarios no subsidiados con consumo mayor que 2.500 kWh/a: 3 kW	4.047	12,141 MW	84,98 MW
Comercial - Consumo menor a 15.000 kWh/a: 5 kW	28.571	142,855 MW	999,98 MW
Comercial - Consumo mayor a 15.000 kWh/a: 10 kW	19.785	197,85 MW	1.384,95 MW
Industrial - Consumo de hasta 100 MWh/a: 50 kW	2.857	142,85 MW	999,95 MW

¹⁸ Para generación distribuida se toma número de proyectos considerados viables por PNUMA (2021, p.120). Para gran escala, se toma el número de proyectos registrados actualmente ante la UPME y se divide en siete (años).

Potencia típica de proyecto (véase PNUMA 2021, p. 97)	Número de proyectos por año ¹⁸	Capacidad instalada por año desde 2023	Capacidad instalada total para enero/2030
Industrial - Consumo de entre 100 y 200 MWh/a: 100 kW	1.428	142,85 MW	999,95 MW
Industrial - Consumo de entre 200 y 500 MWh/a: 250 kW	571	142,75 MW	999,25 MW
Industrial - Consumo de más de 500 MWh/a: 500 kW	492	246 MW	1.722 MW
Oficial - Consumo de hasta 30.000 kWh/a: 10 kW	714	7,14 MW	49,98 MW
Oficial - Consumo mayor a 30.000 kWh/a: 30 kW	309	9,27 MW	64,89 MW
Subtotal Generación Distribuida	66.393	1.055,134 MW	7.385,92 MW
Gran escala – tamaño pequeño (hasta 20 MW): 12 MW en promedio	20	240 MW	1.680 MW

Potencia típica de proyecto (véase PNUMA 2021, p. 97)	Número de proyectos por año ¹⁸	Capacidad instalada por año desde 2023	Capacidad instalada total para enero/2030
Gran escala – tamaño medio (mayor a 20 MW y menor que 100 MW): 73 MW en promedio	6	438 MW	3.066 MW
Gran escala – tamaño grande (mayor que 100 MW hasta 100 MW): 198 MW en promedio	3	594 MW	4.158 MW
Subtotal Gran escala	29	1.272 MW	8.904 MW
TOTAL	66.422	2.327,134 MW/a	16.289,92 MW

Tabla 1: Cálculo ilustrativo de instalación anual de energía solar para distintos tamaños de proyecto, tomando el potencial tecno-económico identificado en (PNUMA, 2021, p. 120)¹⁹ y los registros vigentes en (UPME, 2022).

Lograr que entre 2023 y 2030 se instalen capacidades similares a las descritas de manera ilustrativa en la tabla 1 no es una tarea sencilla. Para conseguirlo, es esencial realizar modificaciones a los esquemas de fomento a las FNCER. Para comenzar, es esencial facilitar el acceso a financiación para la gran mayoría de la población colombiana que no puede

acceder a los incentivos tributarios previstos por ejemplo en la Ley 1715/2014, que requiere que quien se beneficie declare y pague impuesto de renta. Esto se puede dar a través de reformas a esta legislación que permitan un apoyo directo a la instalación de energía solar como lo son los “investment tax-credits” en EE.UU. (véase por ejemplo Dwivedi, 2018) o la deducción de 110 % a las instalaciones solares en Italia (véase Giuffrida, 2022). Otros mecanismos pueden venir desde el sector financiero (PNUMA, 2021) e incluir garantías estatales a préstamos relacionados con instalaciones en techos, que por ejemplo incluyan también adecuaciones de infraestructura civil y eléctrica (véase Ruiz-López et al. 2021). Alternativamente, se pueden abrir también avenidas para que pequeños y medianos proyectos puedan aplicar a fondos como el FENOGE, a los que se les puede inyectar capital con los recursos sin usar del impuesto al carbono (véase Cámara de Representantes - República de Colombia, 2022), entre otros. Ante todo, se trata de explorar que los incentivos para la instalación de energías renovables se elaboren de conformidad con las condiciones económicas y organizativas de quienes habitan el territorio, sin convertirse en herramientas que discriminen y segreguen la población civil.

Adicionalmente, se puede reformular el instrumento de las subastas de energía renovable de manera que estas también puedan incluir proyectos a menor escala, a la vez que promueven esquemas asociativos y de consumo local de energía. Concretamente, se pueden diseñar subastas como las de China (Farand, 2022), en las que los oferentes deben concertar previamente²⁰ con negocios locales, hogares e industrias para poder presentarse a la subasta, en la que el Estado oferta un determinado volumen de subsidios o apoyos a la inversión.

¹⁹ Dado que el estudio referenciado no diferencia entre tamaños de instalaciones en sus resultados finales de potencial tecnoeconómico se tomó una distribución aleatoria entre las distintas categorías que privilegió instalaciones más grandes.

²⁰ Esta concertación puede incluir aspectos como arrendamientos de techos, contratos de venta de electricidad a largo plazo, esquemas de propiedad compartida, entre otros.

Como lo pudimos discutir con representantes del sector de la energía solar colombiano y también lo han especificado trabajos previos (Ruiz-López et al. 2021), para poder realizar esta expansión es fundamental desplegar una gran ofensiva de capacitación y formación, así como de generación de valor agregado local. Lo primero tiene que ver con la necesidad de entrenar a la multitud de personal técnico, de certificación, de ventas, entre otros, que se necesitaría. Esto puede perfectamente ligarse con medidas de reentrenamiento para la fuerza laboral que decida o se vea obligada a empezar a salir de sectores en declive como las termoeléctricas, la minería de carbón o la explotación de hidrocarburos. En lo que tiene que ver con generar valor agregado local, el tema es aprovechar que muchos elementos como herrajes, canaletas, cables, estructuras metálicas y quizás incluso paneles e inversores, en el mediano o largo plazo, pueden ser fabricados en Colombia.

10.3 Planeación y promoción de FNCER en clave de descentralización y empoderamiento territorial

Así como una de las llaves para poder acelerar el despliegue de las FNCER tiene que ver con temas de relacionamiento, participación y democratización (ver sección 10.1), hay otros elementos necesarios para que se pueda materializar lo que implica el escenario “democracia verde”. Esta subsección se concentra entonces en proponer distintos elementos que pueden servir para promover las FNCER de manera que estas puedan seguir contando con una voluntad política favorable a 100% electricidad renovable, así como con el visto bueno, en distintos niveles, de la sociedad.

Un primer elemento para poder materializar una penetración mucho mayor de FNCER, que en nuestro estudio está planteada para llegar a metas de capacidad instalada para 2030 de 6.688,47 MW de capacidad eólica, 2.911,55 de hidráulicas filo de agua, 13.905,17 MW de hidroeléctricas con embalse y 245,55 MW de cogeneración y otros, es un replanteamiento de la planificación

minero-energética adelantada, entre otros, por la UPME. Concretamente, esta entidad podría empezar a incluir en sus actualizaciones del Plan Energético Nacional (PEN), así como del Plan de Expansión en Generación y Transmisión, escenarios en los que se evalúe la viabilidad, confiabilidad y asequibilidad de un sistema eléctrico basado exclusivamente en renovables y que cumpla con los objetivos de mitigación del cambio climático de Colombia. Tales análisis deberían, en el mejor de los casos, empezar a evaluar con mucha mayor granularidad temporal y espacial las posibilidades y necesidades de un sistema eléctrico con muchos más altos grados de penetración de FNCER. Finalmente, desde la planeación minero-energética es central que se determine qué horizontes temporales tienen las plantas térmicas y qué cronogramas de cierre serían viables, teniendo en cuenta la confiabilidad del suministro, su asequibilidad, entre otros.

Con esos instrumentos de planeación más fuertes, desde los gobiernos nacional y departamentales, con colaboración del sector privado y eventualmente de los municipios, se puede entonces proceder a elaborar planes municipales y departamentales que promuevan el 100% de electricidad renovable en los distintos territorios, aprovechando de la mejor manera los energéticos presentes, y a su vez involucrando al máximo a la ciudadanía. Un componente clave de este proceso puede ser propender por altos niveles de generación doméstica, de manera que cada región del país logre la autonomía energética, reduciendo al máximo la necesidad de obras complejas de infraestructura adicional en materia de transmisión.

Ante la claridad de recursos disponibles y un creciente número de planes municipales y departamentales de transición, la institucionalidad estatal, en sus distintos niveles puede proceder a promover el establecimiento de empresas sociales que promuevan el uso de las FNCER en la generación de electricidad. Siguiendo lo desarrollado en la sección 10.1, muchas de estas nuevas empresas podrían surgir del seno de comunidades, sindicatos minero-energéticos, organizaciones de jóvenes,

organizaciones de víctimas del conflicto, entre otros, que quieran irrumpir en el sector. Como se habló en la sección 10.2, esto también requiere de unos fondos dedicados a la materialización de tales emprendimientos. Una opción es capitalizar un Fondo de Transición Energética con fondos de las regalías, recursos de inversión de exploración de Ecopetrol, ingresos por concepto de impuesto al carbono, entre otros.

Un componente adicional tiene que ver con la política de ciencia, tecnología e innovación. Si se quiere que la transición del sistema eléctrico y las que le pueden seguir en otros sectores energéticos cuenten con un aval popular amplio, es fundamental que tal transición genere empleo. Sabiendo que mucho del empleo en FNCER se da en el segmento de creación y fabricación de la tecnología, es por ende crucial adelantar una estrategia para la promoción de investigación e inversión para la creación de empresas locales productoras de las tecnologías necesarias para el 100% de energías renovables. Esto puede ir acompañado de un fomento al asentamiento de empresas extranjeras que quieran fabricar tales tecnologías en Colombia e incluso estén dispuestas a realizar transferencias de tecnología para el sector productivo colombiano.

10.4 Detener expansión de parque de generación térmico e iniciar la transición justa

En el marco de las transiciones energéticas necesarias para luchar contra la emergencia climática, no es suficiente innovación sin “exnovación”. En ese orden de ideas, para la transición no basta agregar FNCER a la matriz eléctrica. También se vuelve necesario hablar del cierre de las centrales térmicas que hoy funcionan con carbón, gas, fuel-oil o diésel.

El primer elemento para posicionar este tema consiste en instituir una moratoria para las nuevas plantas térmicas. Teniendo en cuenta que en la actualidad las FNCER pueden competir perfectamente con cualquier tecnología que use combustibles fósiles para generar electricidad, el gobierno podría descartar la

construcción de nuevas plantas a gas, como el proyecto NENCOL 5, siempre y cuando esto no comprometa contratos ya firmados por entidades del Estado.

Un segundo elemento consiste en evaluar la posibilidad de eliminar gradualmente la exención al impuesto al carbono que cubre a distintas plantas térmicas, especialmente aquellas que funcionan con carbón. Siendo este el energético con mayor contenido de carbono, es crucial que se empiece a desincentivar la generación con carbón lo antes posible. Los ingresos adicionales generados por esta medida pueden destinarse directamente a financiar proyectos de generación con FNCER, que involucren, por ejemplo, a trabajadores de las térmicas o la minería de carbón que queden cesantes.

El tercer componente de este punto consiste en evaluar cómo se podría reducir gradualmente y finalmente eliminar la figura de cargo por confiabilidad, bajo la cual operan muchas de las plantas térmicas hoy en funcionamiento. De nuevo, sin perjuicio de contratos vigentes, el Estado y sus entes de planificación pueden ir evaluando qué tanto sentido tiene este subsidio ante el avance de las FNCER y si se puede proceder a no prolongarlo.

En última instancia, y siguiendo las experiencias de otros países como Chile, España, Alemania o Portugal (Atteridge et al., 2020; Brauers et al., 2018; Caldecott et al., 2017; Furnaro et al., 2021; Hauser et al., 2021) se puede proceder a elaborar un cronograma de cierre de las plantas térmicas en el marco de un amplio diálogo social con empresas, sindicatos, gobiernos locales, sociedad civil, entre otros. El presente estudio, como se detalló en las secciones 8.1 y 6.2 no pretende responder la pregunta de hasta cuándo se necesitarán cada una de las térmicas y como se podría organizar un cronograma de retiro para las mismas. Ese es un interrogante tendrá que ser resuelto por futuros estudios y sobre todo desde la política pública.

En cualquier caso, dar claridad sobre un futuro limitado para las plantas térmicas, independientemente del tiempo que esto tome, es clave para iniciar un proceso de transición justa del

sector termoeléctrico y sus sectores allegados, como la minería de carbón a pequeña y mediana escala en la región Andina. Con esa claridad, los distintos actores sociales pueden empezar a prepararse para transitar de una manera gradual, equilibrada y justa a otros sectores.

10.5 Impulso a una mayor electrificación de la economía

Un último componente que hace parte de la apuesta de transición del sistema eléctrico que implica el escenario “democracia verde” consiste en que, además de expandir las FNCER en la matriz eléctrica, se puedan electrificar otros sectores de la economía. Concretamente, reconocemos las siguientes áreas de acción que alrededor de las cuales se puede impulsar esta transición.

En primer lugar, está la promoción de la movilidad eléctrica, tanto individual (en automóviles, motos o bicicletas), como pública (en buses, taxis o trenes) y de carga. A la luz del escenario “democracia verde” el objetivo de 600.000 vehículos eléctricos para 2030 parece poco ambicioso. El nuevo gobierno podría entonces plantear concebir metas más claras de sustitución de movilidad fósil (usualmente medida en km/persona/año o tonelada/km/año) que dejen claro qué tanto se quiere transitar a movilidad eléctrica y cómo incidirá esto en la demanda de electricidad futura.

Un segundo elemento consiste en promover allí donde se pueda en industria, comercio y sector residencial la sustitución de energéticos fósiles por alternativas renovables (no necesariamente eléctricas). Esto puede implicar la sustitución de fogones, calentadores, hornos o motores que funcionen con gas, por alternativas eléctricas (en hogares o negocios, por ejemplo). En lo que toca a procesos industriales más complejos como la fundición de metales, la fabricación de cemento, entre otros, se puede explorar tanto la electrificación (por ejemplo, con hornos de arcos eléctricos en la siderurgia) como el uso de otros energéticos renovables (como la biomasa residual para procesos para calentar agua o el biogás para procesos de mayor

temperatura). Para conseguir esto, se puede recurrir a incentivos de tipo tributario, por ejemplo. Más adelante, se puede contemplan recurrir a medidas más restrictivas como la prohibición de ciertas tecnologías, como por ejemplo se está planteando en distintos países europeos con los calentadores que funcionan con gas fósil (EDF, n.d.).

10.6 Hoja de ruta generación eléctrica 100% renovables a 2030

Para lograr el 100% de electricidad proveniente de renovables al año 2030, la presente investigación identificó el escenario Democracia Verde, en el cual la sociedad y el poder ejecutivo del país deciden cooperar para consolidar un sistema libre de emisiones de gases efecto invernaderos en generación al interior del del mercado eléctrico colombiano. Como se puede apreciar en la Tabla 2, en este escenario se fortalecerá la capacidad de generación eólica, pasando de 0.59 GW en el año 2024 a 3.50 GW en el año 2026. En el caso de la Hidroelectricidad se mantendrá como la principal fuente de generación del país, partiendo de 12.54 GW en el año 2024 y logrando una generación de 14,08 GW. Para el recurso solar se obtendrán 2,05 GW en el año 2024, 5,0 GW al 2026 y 6,59 GW al 2030. Ahora bien, para el caso de la tecnología filo de agua se obtendrán 1,67 GW al año 2024, 3,80 GW al año 2026 y 2.30 GW al año 2030. Finalmente, para la tecnología de generación distribuida se consolidarán 0,52 GW al 2024, 1.41 GW en el año 2026 y 4,11 GW en el año 2030.

Otro de los factores claves para la implementación del 100 % renovable al año 2030 en Colombia es la transmisión, que para el caso particular deberá asegurar la conexión entre las regiones Caribe y resto del país. La transmisión comenzará con una capacidad de transporte horario de unos 1,67 GW en el año 2024, aumentando a 1,80 GW al año 2026 y finalmente llegando a 2,30 GW al año 2030.

Capacidad de Generación			
Tipo de recurso generación renovable	2024	2026	2030
Wind (GW)	0,59	3,50	4,37
Hydro (GW)	12,54	14,08	14,08
Solar (GW)	2,05	5,00	6,59
Filo de Agua (GW)	1,69	3,80	4,04
Transmisión (GW)	1,67	1,80	2,30
Generación Distribuida (GW)	0,52	1,41	4,11

Tabla 2. Capacidad de Generación-Democracia Verde 100 % Renovables

Para lograr las instalaciones en capacidad que se requieren para lograr 100% en electricidad renovable se plantean pilares y estrategias como aparecen en la tabla xxx. Las estrategias desde el punto de vista de la política pública y las adoptadas por la sociedad consideran los pilares relacionados con la capacidad de generación, transmisión, distribución, demanda y regulación.

TABLA HOJA DE RUTA AL 2030		
Estrategia	Política	Sociedad
Pilar		
CAPACIDAD DE GENERACIÓN	1. Línea de acción: Estrategia para la promoción de la formulación y financiación continua de proyectos de generación a través de las FNCE (subastas inicialmente).	4. Línea de acción: Incentivos para que la efectiva participación de la autogeneración en los hogares y otros sectores de Colombia. 5. Promoción eficiente para la creación de

CAPACIDAD DE GENERACIÓN	2. Estrategia de transición hacia las FNCE - por costos en el SIN, las renovables son más competitivas que las térmicas. 3. Estrategia para el reemplazo paulatino de las plantas térmicas del país, ya que éstas serían superfluas por costos económicos y ambientales, y cuando se pruebe no ser necesarias para la seguridad energética del país.	empresas sociales que promuevan el uso de las FNCE en la generación de electricidad. 6. Socialización amplia de la Generación de Energía proveniente de las FNCE. 7. Estímulos probados para la creación de empresas locales productoras de las tecnologías o partes necesarias para el 100 % de energías renovables.
CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN	8. Línea de acción: Estrategia de aseguramiento de interconexión nacional de las zonas con mayor potencial de generación renovable del país. 9. Establecimiento de procesos que demuestren la sostenibilidad (S, E, A) de los proyectos.	10. Línea de acción: Estrategia de socialización y adquisición predial con los grupos poblacionales afectados para la transmisión del STN. 11. Incentivos claros (asumidos por la sociedad en su conjunto) para las comunidades afectadas por la construcción de infraestructura

<p>CAPACIDAD DE DISTRIBUCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN</p>	<p>12. Línea de acción: Estrategia para la implementación de la GD y redes inteligentes.</p> <p>13. Estrategia para la promoción de microrredes y de soluciones aisladas en las ZNI, a través de FNCE.</p>	<p>14. Línea de acción: Incentivos efectivos para la inclusión de sistemas integrados de autogeneración y microrredes en las ciudades y las ZNI.</p>
<p>DEMANDA</p>	<p>15. Estrategia para la Autogeneración</p>	<p>16. Línea de Acción: Garantías económicas y ambientales para las comunidades</p>
<p>REGULACIÓN</p>	<p>17. Con un horizonte de tiempo a 30 año para el logro de la meta 100% renovable.</p> <p>18. Intercambio para la seguridad energética en condiciones de un sistema 100% renovable en energía. AC/DC</p>	<p>19. Estimulo efectivo para la participación comunitaria en la regulación de las renovables.</p> <p>20. Exigencia de la elaboración de planes municipales y departamentales participativos que promuevan la generación 100% renovable.</p>

Tabla 3. Hoja de Ruta 100 % Renovables al año 2030.

El resultado de la simulación e investigación realizada se representa por medio de una abstracción grafica de esta hoja de ruta, la cual se representa en la siguiente figura.

2030 Capacidad Instalada

52,96% Hidro 21,49% Eolica 7,1% Solar distribuida
 9,9% Filo de agua 8,55% Solar

2030



2021 Capacidad Instalada

81,02% Hidro 0,11% Eolica 3,01% Carbon
 3,2% Filo de agua 0,13% Solar 11,85% Gas

Bibliografía

Acemoglu, D., & Robinson, J. A. (2019). *The narrow corridor: States, societies, and the fate of liberty*. Penguin Press.

Alfaro, C., Rueda Gutiérrez, J., Casallas, Y., Rodríguez, G., & Malo, J. (2021, June 28). *Una mirada al potencial geotérmico de Colombia*. Desarrollos en Volcanología y Geotermia. <https://sociedadcolombianadegeologia.org/una-mirada-al-potencial-geotermico-de-colombia/>

Atteridge, A., Blanco, I., & Strambo, C. (2020). *Insights from Historical Cases of Transition: Background Paper for the EBRD Just Transition Initiative*. European Bank for Reconstruction and Development, London.

Barney, J. (2021, April 14). "LA GUAJIRA, ENTRE UN NUEVO AIRE O UN DESASTRE" *Panorama actual de la violencia en la Guajira con la llegada de las empresas energéticas al territorio Wayuu [Noticias - INDEPAZ]*. <https://indepaz.org.co/la-guajira-entre-un-nuevo-aire-o-un-desastre-panorama-actual-de-la-violencia-en-la-guajira-con-la-llegada-de-las-empresas-energeticas-al-territorio-wayuu/>

Batel, S. (2020). Research on the social acceptance of renewable energy technologies: Past, present and future. *Energy Research & Social Science*, 68, 101544. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101544>

Bauwens, T., & Devine-Wright, P. (2018). Positive energies? An empirical study of community energy participation and attitudes to renewable energy. *Energy Policy*, 118, 612–625. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.062>

Brand, U., Muraca, B., Pineault, É., Sahakian, M., Schaffartzik, A., Novy, A., Streissler, C., Haberl, H., Asara, V., Dietz, K., Lang, M., Kothari, A., Smith, T., Spash, C., Brad, A., Pichler, M., Plank, C., Velegrakis, G., Jahn, T., ... Görg, C. (2021). From planetary to societal boundaries: *An argument for collectively defined self-limitation. Sustainability: Science, Practice and Policy*, 17(1), 264–291. <https://doi.org/10.1080/15487733.2021.1940754>

Brauers, H., Herpich, P., von Hirschhausen, C., Jürgens, I., Neuhoff, K., Oei, P.-Y., & Richstein, J. (2018). *Coal transition in Germany—Learning from past transitions to build phase-out pathways*. IDDRI and Climate Strategies. https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Rapport/20180609_ReportCOAL_Germany.pdf

Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., England, M. H., Wang, G., Guilyardi, E., & Jin, F.-F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4(2), 111–116. <https://doi.org/10.1038/nclimate2100>

Cai, W., Wang, G., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., Jin, F.-F., Timmermann, A., Collins, M., Vecchi, G., Lengaigne, M., England, M. H., Dommenges, D., Takahashi, K., & Guilyardi, E. (2015). Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(2), 132–137. <https://doi.org/10.1038/nclimate2492>

Caldecott, B., Sartor, O., & Spencer, T. (2017). *Lessons from previous 'Coal Transitions'—High-level summary for decision-makers* (Part of 'Coal Transitions: Research and Dialogue on the Future of Coal' Project). IDDRI and Climate Strategies.

Cámara de Representantes - República de Colombia. (2022, April 21). Debate de control político sobre el impuesto al Carbono, realizó la Comisión Quinta. *Comisión V*. <https://www.camara.gov.co/debate-de-control-politico-sobre-el-impuesto-al-carbono-realizo-la-comision-quinta>

Climate Watch. (2021). *Greenhouse Gas Emissions and Emissions Targets—Colombia*. <https://www.climatewatchdata.org/countries/COL>

Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J. G., & Vignati, E. (2019). Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries. *Luxemburg: Publication Office of the European Union*.

Devine-Wright, P. (2015). *Renewable energy and the public: From NIMBY to participation*.

Devine-Wright, P., Whitmarsh, L., Gatersleben, B., O'Neill, S., Hartley, S., Burningham, K., Sovacool, B., Barr, S., & Anable, J. (2022). Placing people at the heart of climate action. *PLOS Climate*, 1(5), e0000035. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000035>

Dreyer, M., Konrad, W., & Scheer, D. (2015). Partizipative Modellierung: Erkenntnisse und Erfahrungen aus einer Methodengenesse. In M. Niederberger & S. Wassermann (Eds.), *Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung* (pp. 261–285). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-01687-6_13

Dwivedi, C. (2018). Influence of Production and Investment Tax Credit on Renewable Energy Growth and Power Grid. *2018 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, 149–154. <https://doi.org/10.1109/GreenTech.2018.00035>

EDF. (n.d.). *UK Gas Boiler Ban – Everything You Need to Know*. <https://www.edfenergy.com/heating/advice/uk-boiler-ban>

Ernst, A., Biß, K. H., Shamon, H., Schumann, D., & Heinrichs, H. U. (2018). Benefits and challenges of participatory methods in qualitative energy scenario development. *Technological Forecasting and Social Change*, 127, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.09.026>

Farand, C. (2022, July 14). China's ambitious rooftop solar pilot helps drive 'blistering' capacity growth. *Climate Home News*. <https://www.climatechangenews.com/2022/07/14/chinas-ambitious-rooftop-solar-pilot-helps-drive-blistering-capacity-growth/>

Forbes Colombia. (2021, October 12). Falta de consultas previas frenan \$11 billones en proyectos solares y eólicos. *Forbes - Colombia*. <https://forbes.co/2021/10/12/actualidad/falta-de-consultas-previas-frenan-11-billones-en-proyectos-solares-y-eolicos/>

Furnaro, A., Herpich, P., Brauers, H., Oei, P.-Y., Kemfert, C., & Look, W. (2021). *German Just Transition: A Review of Public Policies to Assist German Coal Communities in Transition* (Report 21-13). RFF & DIW Berlin. <https://media.rff.org/documents/21-13-Nov-22.pdf>

Germanwatch. (2018). *GLOBAL CLIMATE RISK INDEX 2019. Who Suffers Most From Extreme Weather Events? Weather-related Loss Events in 2017 and 1998 to 2017*. Germanwatch. <https://doi.org/978-3-943704-04-4>

Giuffrida, A. (2022, April 13). Italy's superbonus 110% scheme prompts surge of green home renovations. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2022/apr/13/italys-superbonus-110-scheme-prompts-surge-of-green-home-renovations>

Gobierno de Colombia. (2021). *Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París*. <https://carbononeutral.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/E2050-.pdf>

González Posso, C., & Barney, J. (2019). *El Viento del Este llega con Revoluciones—Multinacionales y transición energética con energía eólica en territorio Wayúu* (2nd ed.). Heinrich Böll Stiftung; Indepaz. <https://co.boell.org/es/2019/12/05/el-viento-del-este-llega-con-revoluciones-multinacionales-y-transicion-con-energia>

Hauser, P., Görlach, B., Umpfenbach, K., Perez, R., & Gaete, R. (2021). *Phasing Out Coal in Chile and Germany*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Partnerpublikationen/2021/Energy_Partnership_Chile-Alemania_Phase-Out-Coal-Chile-Germany/20210614_CHL_Comparative_Study_Coal_Exit_CHL_GER_web.pdf

Henao, F., & Dyner, I. (2020). Renewables in the optimal expansion of colombian power considering the Hidroituango crisis. *Renewable Energy*, 158, 612–627. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.055>

Henao, F., Rodriguez, Y., Viteri, J. P., & Dyner, I. (2019). Optimising the insertion of renewables in the Colombian power sector. *Renewable Energy*, 132, 81– 627. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.055>

Henao, F., Rodriguez, Y., Viteri, J. P., & Dyner, I. (2019). Optimising the insertion of renewables in the Colombian power sector. *Renewable Energy*, 132, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.099>

IEA. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, & E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (Eds.), *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 32pp). World Meteorological Organization.

IPCC. (2022a). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 35.

IPCC. (2022b). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley, Eds.). Cambridge University Press.

IRENA. (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. International Renewable Energy Agency.

Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Cameron, M. A., Coughlin, S. J., Hay, C. A., Manogaran, I. P., Shu, Y., & von Krauland, A.-K. (2019). Impacts of Green New Deal Energy Plans on Grid Stability, Costs, Jobs, Health, and Climate in 143 Countries. *One Earth*, 1(4), 449–463. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.12.003>

Levenda, A. M., Behrsin, I., & Disano, F. (2021). Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies. *Energy Research & Social Science*, 71, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101837>

MADS. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)–2020*. <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Colombia%20First/NDC%20actualizada%20de%20Colombia.pdf>

McGookin, C., Ó Gallachóir, B., & Byrne, E. (2021). Participatory methods in energy system modelling and planning – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111504. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111504>

Mejía, E. (2021, July 29). Indígenas en la Alta Guajira protesta contra empresas de energía eólica. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/consultas-previas-guajira-protesta-contra-empresas-de-energia-eolica-606782>

Moallemi, E. A., & Malekpour, S. (2018). A participatory exploratory modelling approach for long-term planning in energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 35, 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.022>

Moffat, K., Lacey, J., Zhang, A., & Leipold, S. (2016). The social licence to operate: A critical review. *Forestry*, 89(5), 477–488. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv044>

Ngar-yin Mah, D., & Hills, P. (2014). Participatory governance for energy policy-making: A case study of the UK nuclear consultation in 2007. *Energy Policy*, 74, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.002>

PNUMA. (2021). *La oportunidad de negocio de la generación solar distribuida en Colombia: Mecanismos de financiación para la banca comercial*. Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente. <https://www.generacionsole.org/financiamiento-gsd-colombia/>

Portafolio. (2022, January 12). El país multiplicará por cien su capacidad en energías renovables. *Portafolio*. <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/el-pais-multiplicara-su-capacidad-en-energias-renovables-560479>

Puerto-Chaves, L. M., & Corral-Montoya, F. (2022). The political economy of coal in light of climate and mineral-energy policies. In M. Jakob & J. C. Steckel, *The Political Economy of Coal* (1st ed., pp. 258–280). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003044543-18>

REN21. (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*. REN21 Secretariat. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf

Román, M. H., Insuasty, A., Valencia, J. F., & Zuluaga, H. A. (2020). *Proyecto Hidroituango. Historia de una tragedia*. Grupo de Investigación y Editorial Kavilando.

Ruiz-López, A., Corral-Montoya, F., Oei, P.-Y., Kemfert, C., Yepes, C., & Rendón, S. (2021). *Barreras a la Generación Distribuida de la Energía solar en Colombia* (No. 1–2021; TRAJECTS Working Paper). TU Berlin; DIW Berlin. <https://coaltransitions.org/publications/barreras-a-la-generacion-distribuida-de-la-energia-solar-en-colombia/>

Rystad Energy. (2022, March 14). *Rooftop solar installations to almost double by 2025, capacity approaching 95 GW on incentives and friendly policies*. Rystad Energy - Press Releases. <https://www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/rooftop-solar-installations-to-almost-double-by-2025-capacity-approaching-95-gw-on-incentives-and-friendly-policies/>

Schwartz, P. (1996). *The art of the long view: Paths to strategic insight for yourself and your company; [planning for the future in an uncertain world]*. Currency Doubleday.

Ulloa, A. (2021). Transformaciones radicales ambientales frente a la destrucción renovada y verde, La Guajira, Colombia. *Revista de Geografía Norte Grande*, 80, 13–34. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022021000300013>

UPME. (2017). *Plan de Expansión de Referencia Generación Transmisión 2017-2031* (p. 198). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Plan+de+Expansi?n+de+Referencia+:+Generaci?n+Transmisi?n+2009-2023#0>

UPME. (2021). Plan Energético Nacional 2020-2050: “*La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible.*” UPME. <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Plan-Energetico-Nacional-2050.aspx>

UPME. (2022, August). *Informe Dinámico de Registro de Proyectos de Generación de Energía Eléctrica*. Sistema de Información Eléctrico Colombiano. <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generaci%C3%B3n/Inscripci%C3%B3ndeProyectosdeGeneraci%C3%B3n/tabid/113/Default.aspx>

Vega-Araújo, J., & Heffron, R. J. (2022). Assessing elements of energy justice in Colombia: A case study on transmission infrastructure in La Guajira. *Energy Research & Social Science*, 91, 102688. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102688>

Zapata, S., Castaneda, M., Garces, E., Franco, C. J., & Dyner, I. (2018). Assessing security of supply in a largely hydroelectricity-based system: The Colombian case. *Energy*, 156, 444–457. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.118>

Anexos

Anexo 1. Desarrollo de los Escenarios

Primer taller :

Durante este primer encuentro se tiene como objetivo identificar las circunstancias relevantes para alcanzar un sector energético cada vez más renovable en Colombia, empezando por una matriz eléctrica 100 % renovable para el año 2030.

Para conseguir los objetivos de la investigación, se busca estudiar las circunstancias relevantes para alcanzar escenarios 100% renovables en electricidad para el año 2030, ampliando el consumo eléctrico en transporte e industria. Esto requiere reflexionar sobre las tendencias predeterminadas que podrían contribuir (o impedir) con una matriz eléctrica 100% renovable. Así mismo, implica seleccionar las incertidumbres que podrían contribuir con una matriz eléctrica 100% renovable.

En un segundo momento, se enmarca en la Socialización de la metodología de trabajo con escenarios. La metodología por usar es la propuesta por Schwartz (The Art of The Long View), que consiste en la identificación de las fuerzas motrices (predeterminados e incertidumbres) y la posterior priorización de estas últimas para determinar los ejes principales de escenarios futuros. Para la identificación de los predeterminados e incertidumbres se propusieron las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las circunstancias que podrían llevar a Colombia a una canasta eléctrica 100% renovable en el año 2030, buscando incorporación importante de electrificación en transporte e industria?
- ¿Cuáles aspectos pueden influir positiva o negativamente esto?

Dando como resultado la identificación de cuatro escenarios, así como una descripción construida de manera conjunta.

Segundo taller :

Para el segundo taller realizado se inició una recapitulación de la metodología y los resultados del primer taller en donde se llegaron a los cuatro escenarios teniendo en cuenta los factores políticos y sociales, donde se tuvieron en cuentas las siguientes preguntas: ¿Cuáles son las circunstancias que podrían llevar a Colombia a una canasta eléctrica 100% renovable en el año 2030, buscando incorporación importante de electrificación en transporte e industria? y ¿Cuáles aspectos pueden influir positiva o negativamente esto?

En entre los ejes resultantes se expusieron los siguientes:

• Político – legal

Alto grado de centralización en la administración pública y la planeación minero-energética.

Alto grado de polarización política, así como la fragmentación de los partidos y movimientos políticos.

• Tecnológico-ambiental

Alta dependencia de inversión y financiamiento extranjero en FNCER debido a la dependencia en importaciones de tecnología en este sector.

Continúa la caída de costos de tecnologías de energía renovables como la fotovoltaica o la eólica a nivel internacional, relativo a tecnologías convencionales.

Reducción de la demanda de carbón y petróleo (internacional) para 2030 en comparación con 2021.

Avances en la electrificación de la economía (en industria y transporte).

Tendencias de tercerización, digitalización y automatización.

H2 no es producido a gran escala en Colombia para 2030.

• **Económico-social**

Alto grado de desigualdad y pobreza se mantiene

Alto grado de informalidad y desempleo se mantiene

Retorno al crecimiento del PIB pre pandemia con 2-5 años de retraso

No cambio en la posición externa (déficit comercial y de cuenta corriente)

Crecimiento poblacional se mantiene

Aumento de la vulnerabilidad de comunidades por degradación ambiental y pérdida de autonomías

En diferentes grupos se realizó una actividad en la cual los participantes realizaban una descripción detallada de las características y una propuesta del nombre para cada escenario y finalmente se expuso la hipótesis dinámica para una expansión eléctrica 100% renovable.

Tercer taller :

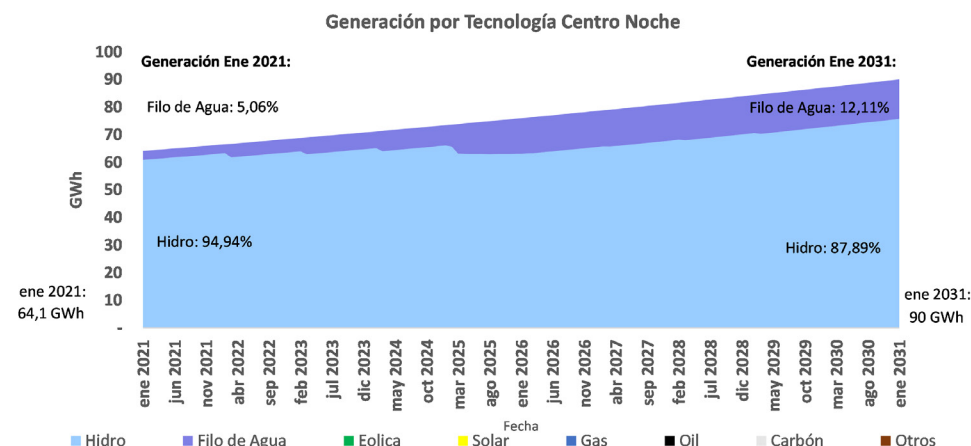
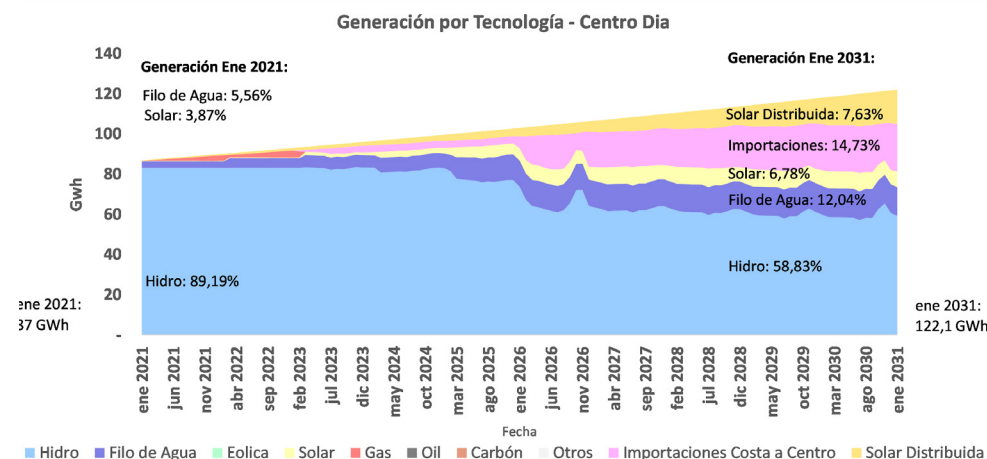
Para el último taller se inicia con una recapitulación de los talleres anteriores y se exponen los nombres de cuatro escenarios: Democracia verde, Extractivismo de energías renovables, Greta y La Casa en Llamas, así como las características teniendo en cuenta los ejes del segundo taller posterior a esto se presentan las simulaciones preliminares para dos escenarios y la explicación de los resultados obtenidos mediante el modelado.

Anexos 2.

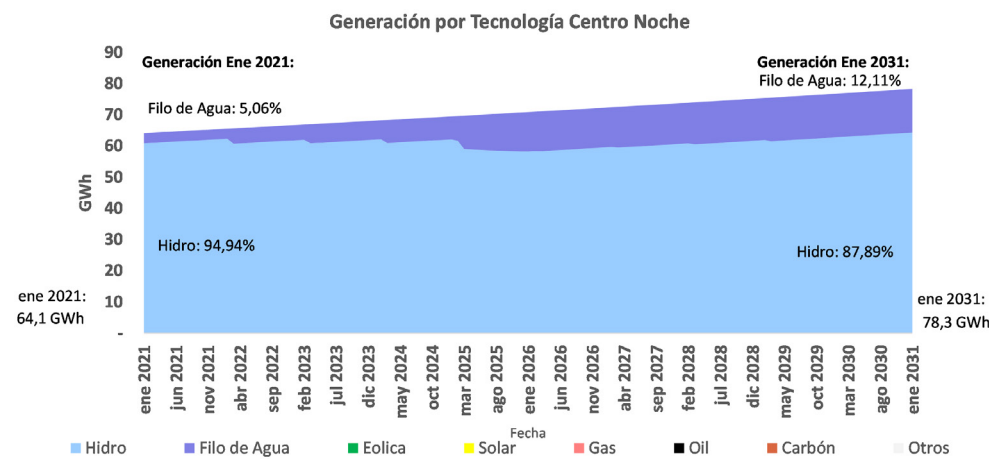
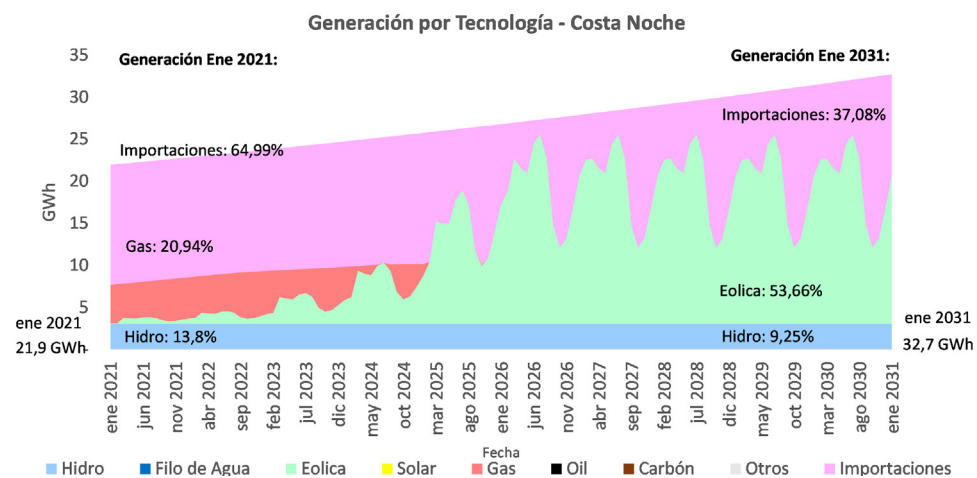
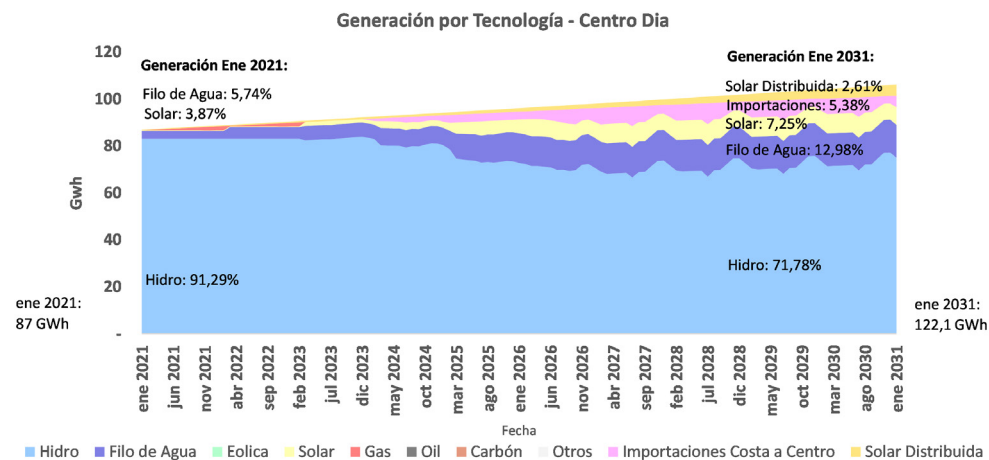
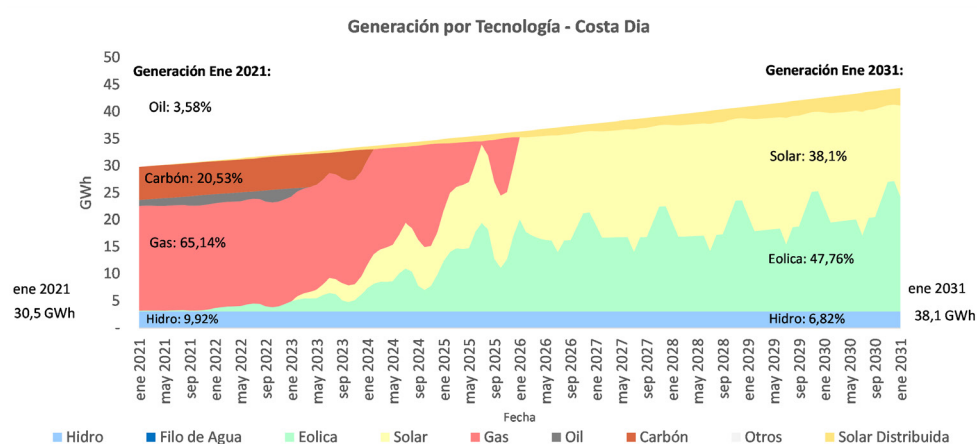
Generación e importaciones día y noche para cada escenario

A continuación, se presentan las simulaciones de la generación e importaciones para cada escenario considerado en este estudio.

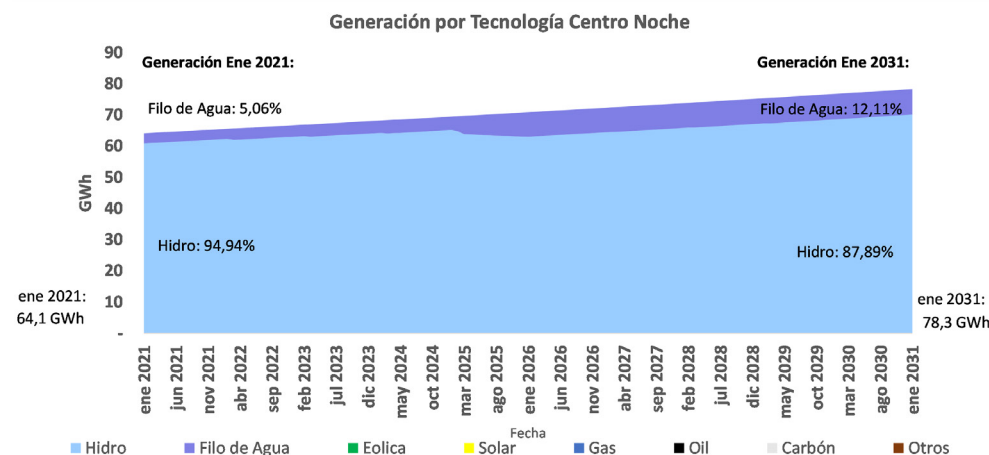
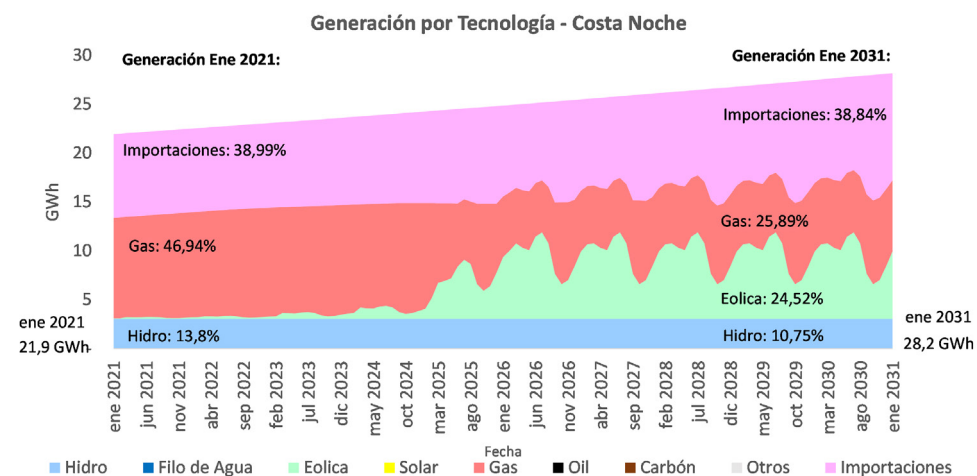
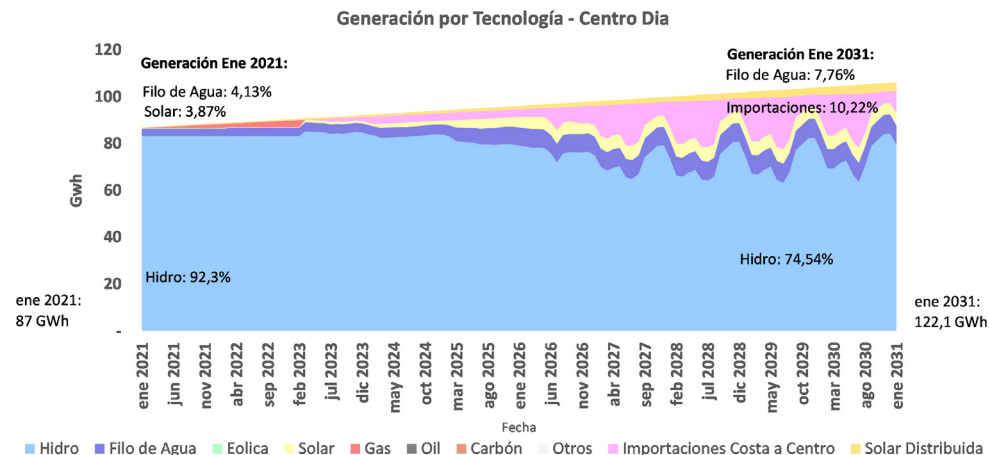
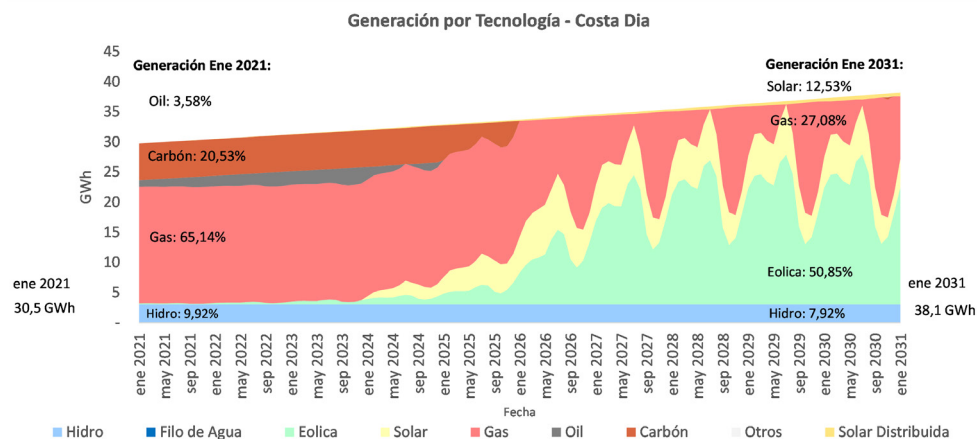
Anexo 2.1 Democracia Verde



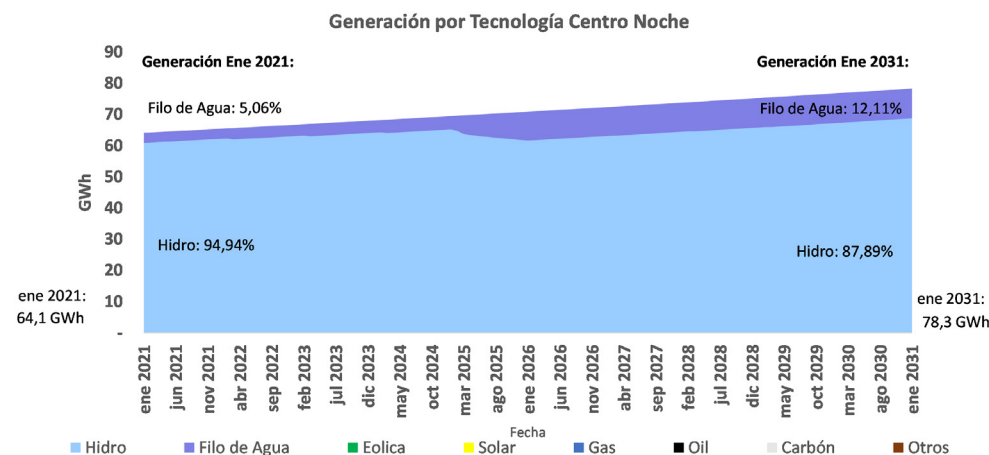
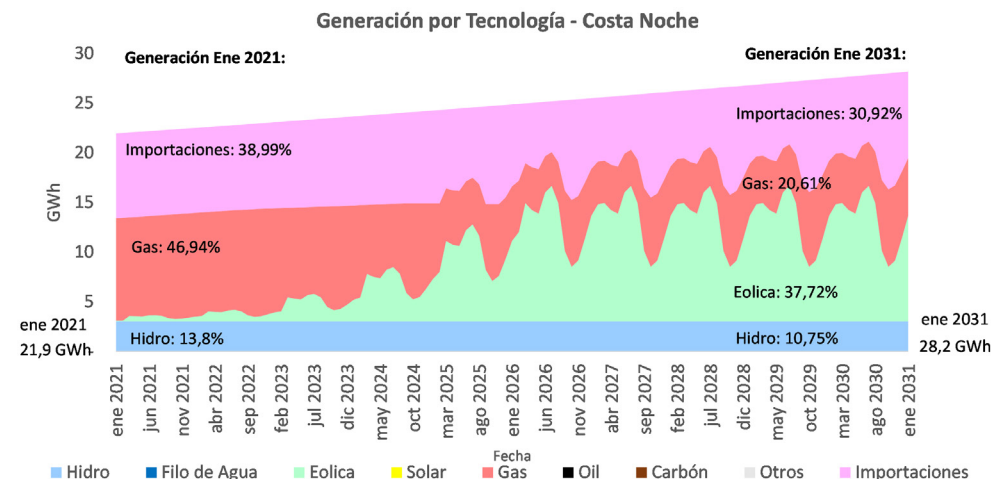
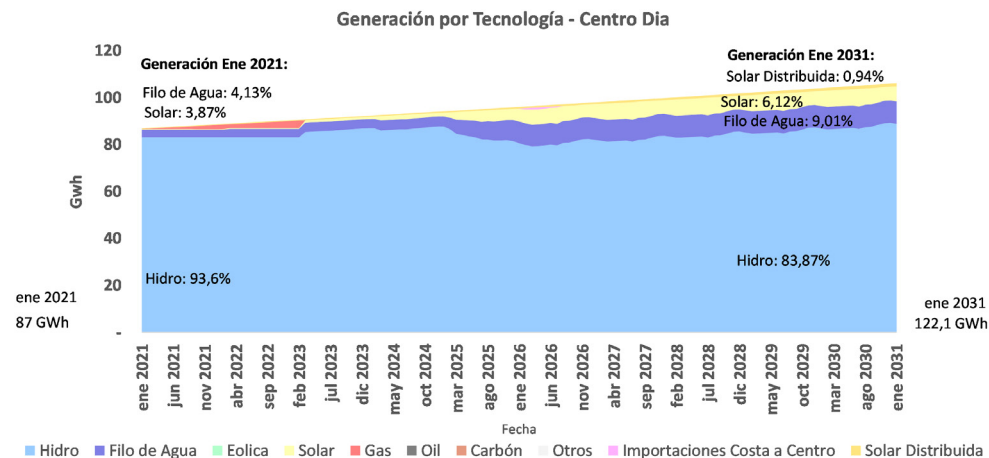
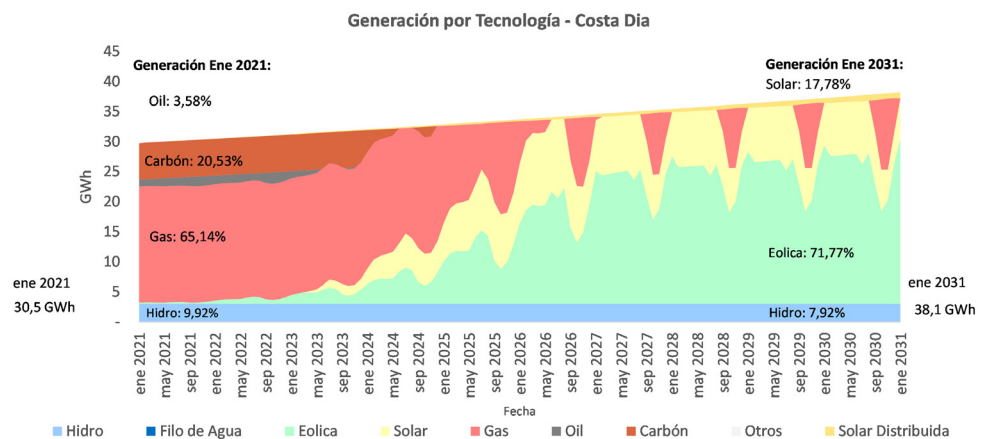
Anexo 2.2 Greta



Anexo 2.3 Extractivismo renovable



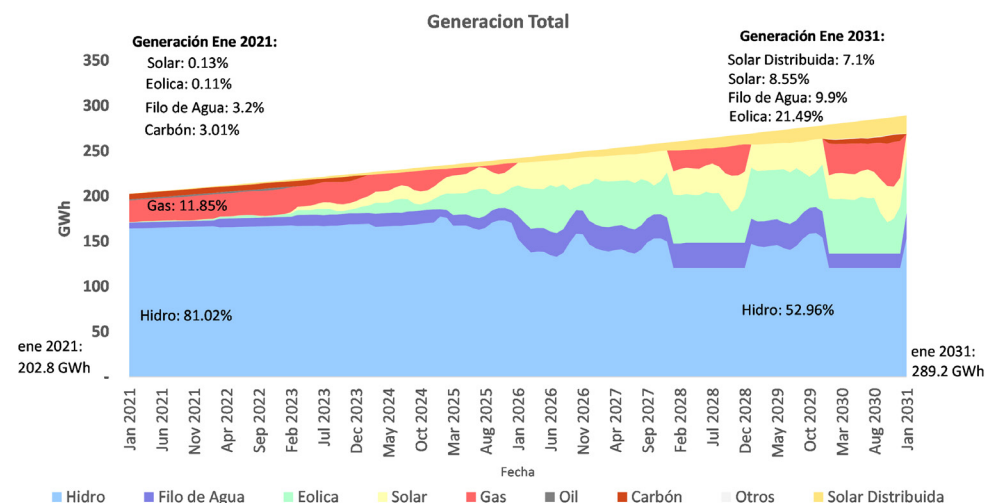
Anexo 2.4 La casa en llamas



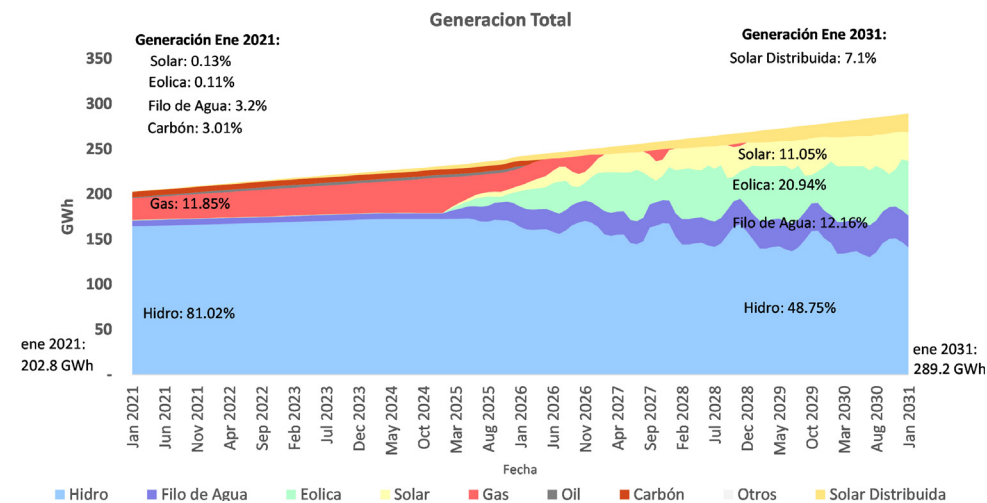
Anexo 3.

Análisis de sensibilidades y retardos de proyectos

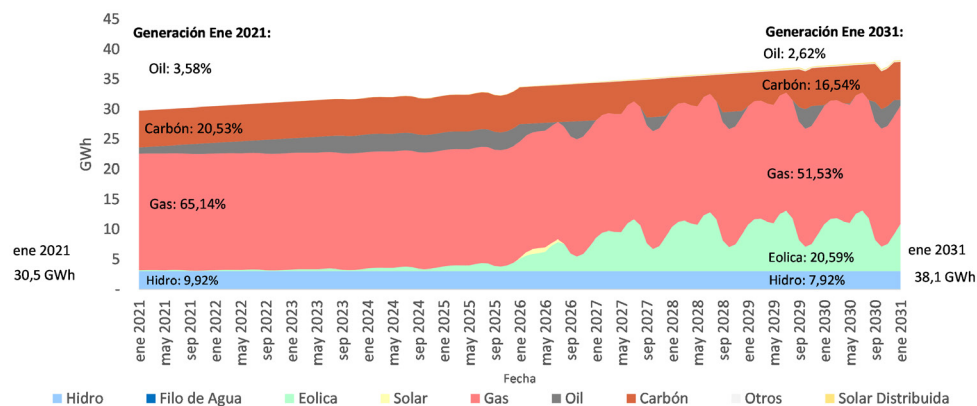
En el escenario democracia verde, enfrentando fenómenos del Niño



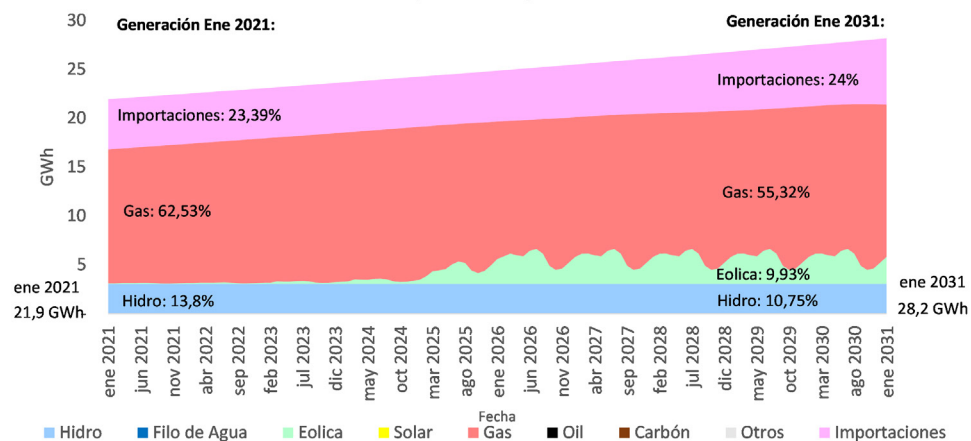
En el escenario democracia verde, retraso plantas renovables de 3 años



Generación por Tecnología - Costa Día



Generación por Tecnología - Costa Noche



Anexo 4.

Análisis de sensibilidades y retardos de proyectos

Capacidades instaladas y transmisión por escenarios

Democracia verde

Democracia Verde					
	2022	2024	2026	2028	2030
Gas	3.036 MW	3.126 MW	3.299 MW	3.299 MW	3.299 MW
Com Fosiles	1.149 MW	1.149 MW	1.183 MW	1.183 MW	1.183 MW
Carbón	1.665 MW	1.665 MW	1.693 MW	1.693 MW	1.693 MW
Otros	175 MW	175 MW	231 MW	231 MW	231 MW
Eolico	245 MW	585 MW	4.366 MW	4.366 MW	4.366 MW
Hidrico	11.042 MW	12.542 MW	14.079 MW	14.079 MW	14.079 MW
Solar	1.054 MW	2.048 MW	6.592 MW	6.592 MW	6.592 MW
Filo de Agua	1.357 MW	1.690 MW	3.804 MW	3.964 MW	4.044 MW
Generación Distribuida	318 MW	524 MW	1.412 MW	2.456 MW	4.110 MW
Transmisión	500 MW	1672 MW	1800 MW	1800 MW	2300 MW

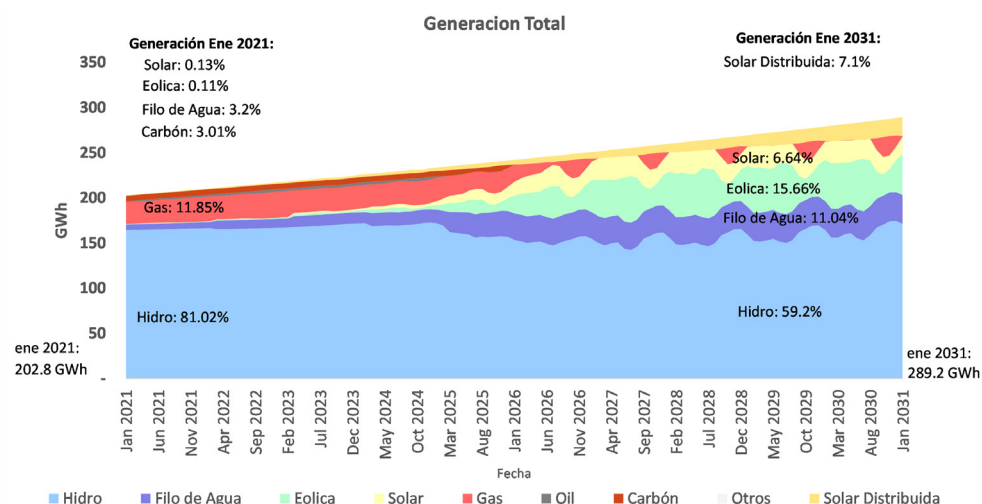
Generación	
Transmisión	

Greta

Greta					
	2022	2024	2026	2028	2030
Gas	3.090 MW	3.315 MW	3.702 MW	3.702 MW	3.702 MW
Com Fosiles	1.189 MW	1.189 MW	1.226 MW	1.226 MW	1.226 MW
Carbón	1.665 MW	1.665 MW	1.696 MW	1.696 MW	1.696 MW
Otros	175 MW	175 MW	230 MW	230 MW	230 MW
Eolico	188 MW	443 MW	2.413 MW	2.413 MW	2.413 MW
Hidrico	11.042 MW	12.542 MW	14.079 MW	14.079 MW	14.079 MW
Solar	701 MW	1.341 MW	3.976 MW	3.976 MW	3.976 MW
Filo de Agua	1.015 MW	1.098 MW	2.447 MW	2.487 MW	2.507 MW
Generación Distribuida	142 MW	204 MW	444 MW	678 MW	972 MW
Transmisión	500 MW	1672 MW	1800 MW	1800 MW	2300 MW

Generación	
Transmisión	

En el escenario democracia verde, retraso línea de transmisión 5 años



Extractivismo Renovable

Extractivismo Renovable					
	2022	2024	2026	2028	2030
Gas	3.072 MW	3.252 MW	3.564 MW	3.564 MW	3.564 MW
Com Fosiles	1.176 MW	1.176 MW	1.208 MW	1.208 MW	1.208 MW
Carbón	1.665 MW	1.665 MW	1.692 MW	1.692 MW	1.692 MW
Otros	175 MW	175 MW	220 MW	220 MW	220 MW
Eólico	58 MW	118 MW	1.964 MW	1.964 MW	1.964 MW
Hidricó	11.042 MW	12.542 MW	14.072 MW	14.072 MW	14.072 MW
Solar	814 MW	1.568 MW	4.831 MW	4.831 MW	4.831 MW
Filo de Agua	1.357 MW	1.690 MW	3.596 MW	3.756 MW	3.836 MW
Generación					
Distribuida	128 MW	187 MW	430 MW	704 MW	1.106 MW
Transmisión	500 MW	1672 MW	1800 MW	1800 MW	2300 MW

Generación	
Transmisión	

La casa en llamas

La Casa en LLamas					
	2022	2024	2026	2028	2030
Gas	3.113 MW	3.394 MW	3.884 MW	3.884 MW	3.884 MW
Com Fosiles	1.255 MW	1.255 MW	1.308 MW	1.308 MW	1.308 MW
Carbón	1.665 MW	1.665 MW	1.710 MW	1.710 MW	1.710 MW
Otros	175 MW	175 MW	237 MW	237 MW	237 MW
Eólico	37 MW	65 MW	810 MW	810 MW	810 MW
Hidricó	11.042 MW	12.542 MW	14.083 MW	14.083 MW	14.083 MW
Solar	461 MW	861 MW	2.854 MW	2.854 MW	2.854 MW
Filo de Agua	1.015 MW	1.098 MW	2.574 MW	2.614 MW	2.634 MW
Generación					
Distribuida	85 MW	104 MW	175 MW	242 MW	324 MW
Transmisión	500 MW	1672 MW	1800 MW	1800 MW	2300 MW

Generación	
Transmisión	

