

**MODELO DINÁMICO PARA EL ANÁLISIS DE LOS EFECTOS AMBIENTALES
DERIVADOS DE LA INCLUSIÓN DE HIDRÓGENO OBTENIDO A PARTIR DE
CARBÓN EN EL SISTEMA ENERGÉTICO COLOMBIANO**

JENIFFER GUADALUPE INSUASTY REINA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
CALI
2022**

**MODELO DINÁMICO PARA EL ANÁLISIS DE LOS EFECTOS AMBIENTALES
DERIVADOS DE LA INCLUSIÓN DE HIDRÓGENO OBTENIDO A PARTIR DE
CARBÓN EN EL SISTEMA ENERGÉTICO COLOMBIANO**

JENIFFER GUADALUPE INSUASTY REINA

**Trabajo de Investigación para optar al título de
Magíster en Ingeniería, énfasis Ingeniería Industrial**

**Director
Juan Carlos Osorio Gómez
Dr. Ingeniería Industrial**

**Codirector
Diego Fernando Manotas Duque
Dr. Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
CALI
2022**

Nota de Aceptación:

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Santiago de Cali, 15 de julio de 2022.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios, por la vida y esta oportunidad, por su guía, sabiduría y fuerza para seguir logrando objetivos. A mis padres por todo su apoyo, cada logro es y será por y para ellos. A mi familia, amigos y compañero de vida por estar siempre allí.

A mis directores, por todo su conocimiento transmitido durante el desarrollo de este trabajo y por su valiosa guía. Y finalmente, a la Universidad del Valle y los diferentes docentes del programa por todas las enseñanzas y esta oportunidad para continuar con mi crecimiento personal, académico y profesional.

Jeniffer I.

CONTENIDO

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	9
REVISIÓN DE LA LITERATURA	16
Hidrógeno y Sector Energético en Colombia.....	16
Gasificación de Carbón	18
Análisis de Efectos Ambientales.....	20
1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO COLOMBIANO, INCLUYENDO LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE HIDRÓGENO.....	22
1.1 Caracterización del Sistema Energético en Colombia.....	23
1.2 Caracterización del proceso de Gasificación de Carbón	26
1.3 Caracterización del proceso de Generación de Energía Eléctrica a partir de Hidrógeno	28
1.4 Principales indicadores de los efectos ambientales relacionados con las tecnologías estudiadas	29
2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	30
2.1 Diagrama de Influencias	31
2.2 Formulación del modelo	35
2.3 Validación del Modelo.....	42
3. ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES EFECTOS AMBIENTALES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA CON HIDRÓGENO.....	43
3.1 Definición de Escenarios	44
3.2 Explotación del modelo y análisis de resultados	46
4. CONCLUSIONES.....	50
REFERENCIAS	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de electricidad por sectores en Colombia (1990-2018)	10
Figura 2. Capacidad efectiva instalada de generación de energía en Colombia ..	10
Figura 3. Enfoque metodológico general	15
Figura 4. Sistema Interconectado Nacional vs. Zonas no Interconectadas.....	24
Figura 5. Proceso de gasificación de carbón	27
Figura 6. Proceso de generación de energía en una turbina de combustión a gas	29
Figura 7. Diagrama de influencias – Sistema energético	32
Figura 8. Bucle de realimentación – Gasificación de Carbón y Captura de CO2 ..	33
Figura 9. Bucle de realimentación – Consumo de agua.....	33
Figura 10. Bucles de realimentación – Emisiones CO2 y Producción de EE con Plantas Térmicas y con Carbón	34
Figura 11. Bucles de realimentación – Consumo de agua y Producción de EE con Plantas Térmicas y con Carbón	34
Figura 12. Bucles de realimentación – Carbón e Hidrógeno Disponible vs. Procesos de producción	35
Figura 13. Principales variables Diagrama de Flujo - Vensim	35
Figura 14. Diagrama de Flujo – Demanda y generación de Energía Eléctrica.....	37
Figura 15. Diagrama de Flujo – Producción y distribución de Carbón e Hidrógeno	37
Figura 16. Diagrama de Flujo – Emisiones de CO2	38
Figura 17. Diagrama de Flujo – Consumo de agua.....	39
Figura 18. Producción EE con Carbón vs. H2 – Escenarios Base – Bajo – Alto...	46
Figura 19. Emisiones CO2 - Todos los Escenarios.....	47
Figura 20. Agua consumida - Todos los Escenarios	48
Figura 21. Costos por emisiones y consumo de agua	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características carbón tipo térmico bituminoso28

Tabla 2. Variables de Nivel Principales40

Tabla 3. Variables de flujo40

Tabla 4. Variables auxiliares (Datos).....40

Tabla 5. Variables auxiliares (Ecuaciones).....41

Tabla 6. Parámetros fijos.....44

Tabla 7. Resumen de Escenarios.....45

RESUMEN

En las últimas décadas, se ha observado un incremento en la demanda de energía eléctrica a nivel mundial, en gran parte debido al evidente aumento poblacional. La generación de esta energía, proveniente aún en mayor parte de recursos fósiles, como el petróleo, carbón y gas natural, ha sido causante de una alta emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, potenciando y haciendo más evidentes con el tiempo los impactos del cambio climático.

Para hacer frente a las problemáticas expuestas, el hidrógeno se ha presentado recientemente como una alternativa que conlleva múltiples ventajas para el sector energético, debido a que es un vector altamente eficiente en la generación de energía y si es utilizado en su estado más puro, no produce emisiones nocivas al ambiente. Una de las alternativas destacadas para la producción de este hidrógeno es la gasificación de carbón, una de las opciones más económicas, principalmente en países donde se cuenta con altas reservas de este recurso mineral. Es por esto, que a nivel de Colombia esto representa una apuesta de interés con la cual el carbón, un recurso abundante en el territorio, pueda seguir siendo aprovechado de una manera alternativa, seguir aportando al sistema energético y constituir una propuesta ambientalmente más limpia.

Con base en lo anterior, el presente proyecto analiza por medio de un modelo de dinámica de sistemas los efectos ambientales de la inclusión de hidrógeno generado a partir de gasificación de carbón en el sistema energético colombiano. Este modelo permite analizar estos efectos a mediano y largo plazo considerando aspectos técnicos y contrastando los resultados con los efectos que actualmente tiene la utilización del carbón en la matriz energética. El proyecto ofrece una base de análisis ambiental de la tecnología de gasificación de carbón para aportar a la toma de decisiones relacionada con la inclusión de hidrógeno como vector energético en el país.

Palabras clave: producción de hidrógeno, gasificación de carbón, sistema energético, impactos ambientales, dinámica de sistemas.

INTRODUCCIÓN

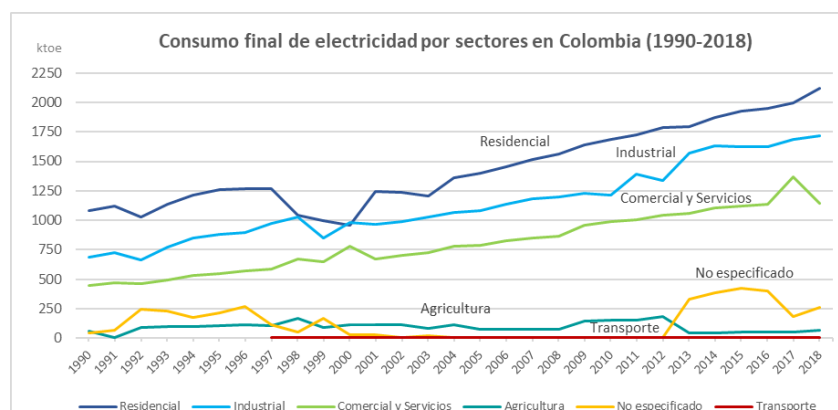
Con el tiempo, el aumento de la tasa de crecimiento demográfico ha traído consigo el aumento mismo de la demanda energética a nivel mundial. Esta energía cuenta a hoy con diversas fuentes de procedencia, sin embargo, la mayor fuente de generación de energía en el mundo aún proviene de fuentes no renovables o combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural. La utilización de estas fuentes por tanto tiempo han hecho cada vez más evidentes los efectos nocivos para el ambiente de su extracción, procesamiento y utilización (Keçebaş & Kayfeci, 2019).

Actualmente, dentro de los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se cuenta con un objetivo específico para adoptar medidas que combatan el cambio climático y sus efectos a nivel mundial. Este busca una reducción ‘urgente’ de los niveles de dióxido de carbono (CO₂) que se generan y liberan hoy en día a la atmósfera. Datos destacables muestran que estas emisiones han aumentado alrededor de un 50% desde el año 1990 y que, debido a estas, se prevé un aumento en la temperatura global en los próximos años cuyas afectaciones serán percibidas por todos los sectores en el mundo (ONU, s.f.).

Por este motivo, distintos países han tomado iniciativas, se han formalizado consejos y organizaciones en conjunto para lograr este y otros objetivos dentro de las metas de desarrollo sostenible a nivel mundial. Los Gobiernos se han visto cada vez más comprometidos en realizar planificaciones energéticas hacia el futuro que permitan cubrir esta creciente demanda, considerando los impactos medioambientales que conllevan los actuales métodos de generación de energía utilizados.

En Colombia, el aumento en la demanda de energía eléctrica en los distintos sectores es evidente. En la Figura 1 se puede observar la tendencia creciente de esta demanda en el país desde el año 1990 hasta 2018 en los sectores residencial, industrial, comercial y de servicios, entre otros (IEA, 2018).

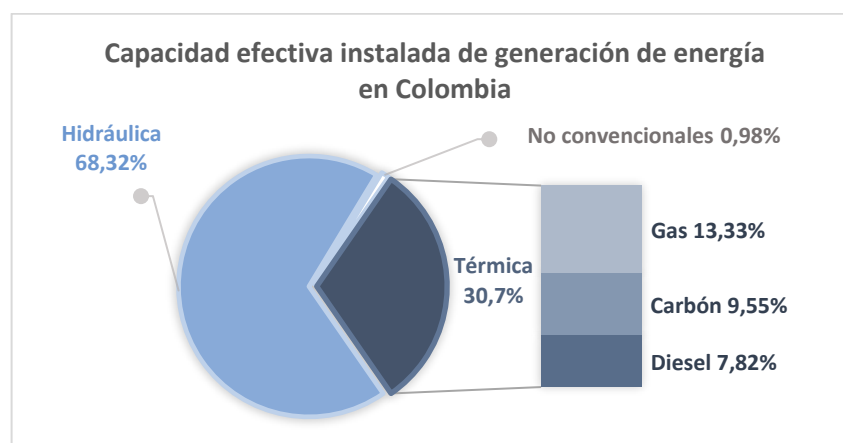
Figura 1. Consumo de electricidad por sectores en Colombia (1990-2018)



Fuente: (IEA, 2018)

Si bien, para la generación de esta energía, a nivel global prima el uso de fuentes no renovables, la mayor fuente en Colombia es hídrica, cubriendo más de un 68% del total demandado. Aproximadamente un 31% es cubierto por medio de fuentes térmicas como gas natural, carbón y diésel y apenas un 1% por fuentes no convencionales como eólica, solar y de biocombustible (Grupo Bancolombia, 2019). En la Figura 2 se observa la distribución de la capacidad instalada de energía eléctrica en Colombia.

Figura 2. Capacidad efectiva instalada de generación de energía en Colombia



Fuente: (Grupo Bancolombia, 2019)

De acuerdo con esto, el país se caracteriza por tener una de las matrices energéticas más limpias. Sin embargo, la alta dependencia de la fuente hídrica representa una vulnerabilidad de la matriz energética debido a que esta fuente depende de condiciones climáticas asociadas a la intensidad del régimen de lluvias. De esta manera, cuando se presentan fenómenos climatológicos como “El Niño”, con el cual disminuyen considerablemente las precipitaciones, esto hace que no se cuente con la misma capacidad de generación de energía de esta fuente (World Energy Council, 2017, como se citó en Jiménez-García et al., 2019). Cuando esto ocurre, la demanda energética del país debe ser satisfecha por medio de fuentes térmicas, que como se ha mencionado, son más nocivas con el medio ambiente.

En principio, esto expone la necesidad de diversificación de la canasta energética del país y aunado a la creciente demanda energética, se requiere la búsqueda de nuevas alternativas para la generación de energía. La Unidad de Planeación Energética Nacional (UPME) en un reciente estudio afirma este requerimiento, convirtiéndose en el principal objetivo específico para el sector energético del Ideario Nacional del Sector a 2050. Adicional a esto, se enfatiza en la necesidad de una articulación de esfuerzos entre sectores en procesos de investigación, incluyendo aspectos técnicos, financieros y administrativos para el análisis de las estrategias planteadas (UPME, 2015).

Dentro de las alternativas que se han estudiado, la incorporación de hidrógeno como vector energético ha ganado recientemente mayor atención en muchos países. Esto debido a que es un elemento abundante en la naturaleza, simple, ligero, que funciona como un combustible y generador de energía altamente eficiente y que además no produce emisiones nocivas al ambiente. En este sentido, cuenta con ventajas en términos tecnológicos, de rendimiento, medioambientales, de mercado, entre otros (Aguilar, 2017). Además, sus fuentes de generación son muy diversas, desde combustibles fósiles, como fuentes de energía renovables, haciendo que se caracterice por tener un gran potencial energético hacia el futuro (Nastasi, 2019).

Una particularidad del hidrógeno es que, si bien es predominante en la naturaleza, no se encuentra en su forma pura y por ello existen múltiples procesos que permiten la extracción y obtención de este elemento. Dentro de estos se encuentra la Termólisis, Electrólisis, Reformado y Gasificación. Estas generalmente tienen una relación inversa entre las emisiones que pueden llegar a generar y los costos en los que incurren. Es decir que las más favorables para el medio ambiente suelen ser a cierta escala económicamente insostenibles y, por el contrario, las alternativas más económicas, que son en efecto las más utilizadas, son las que han causado un mayor daño ambiental en el transcurso de los años.

Otro aspecto a tener en cuenta es que dependiendo de la fuente con la que se obtiene el hidrógeno, este puede ser catalogado como gris, azul o verde. El hidrógeno gris proviene de combustibles fósiles y se caracteriza por tener altas emisiones de CO₂, pero bajos costos. El hidrógeno azul proviene igualmente de

estos combustibles, pero los procesos utilizados son acompañados de una captura de CO₂, evitando que este afecte la atmósfera, sin embargo, los costos debido a este proceso son más altos. Finalmente, el hidrógeno verde es el más favorable en términos ambientales ya que utiliza fuentes completamente renovables y genera cero emisiones de CO₂, pero en este mismo sentido los costos de su generación son muy elevados en comparación con los anteriores métodos (World Energy Council, 2019).

Una de las formas que lideran la producción de hidrógeno azul hoy en día es la gasificación de carbón. Esta tecnología, que por muchos años ha sido ampliamente utilizada para la producción de gas de síntesis y energía eléctrica, actualmente se caracteriza por tener un alto desarrollo y bajos costos en comparación con otras tecnologías de producción de hidrógeno (Moreno & Vargas, 2013). Esto se da en mayor parte en regiones donde se cuenta con una relativa abundancia de su insumo principal, el carbón. Y aunque al igual que otras tecnologías que utilizan fuentes fósiles sigue teniendo la desventaja de una alta generación de CO₂ en el proceso, actualmente se acompaña de procesos desarrollados de captura y almacenamiento de carbono, que permiten generar, como se mencionaba anteriormente, un hidrógeno azul bajo en emisiones (Hydrogen Council, 2020).

Diversos estudios como el desarrollado por Ren et al., (2015), basados en un análisis multicriterio, encuentran que la gasificación de carbón con captura de CO₂ es una de las mejores opciones de producción de hidrógeno en China, uno de los países pioneros en la implementación de esta tecnología. Por su parte, Verma et al., (2015), así como Mandal et al., (2020), estudian una variante del proceso de gasificación de carbón de forma subterránea y le reconocen como beneficiosa tanto ambiental como económicamente.

Reportes de diversas organizaciones y estudios de investigación mencionan que un primer acercamiento a la producción de hidrógeno azul, como el que se obtendría con el proceso de gasificación de carbón, se encuentra conveniente en términos de costos e inversión inicial (Kovač et al., 2021). Esto debido a que las tecnologías para generación de energía con fuentes no convencionales aún se encuentran emergiendo y su desarrollo enfrenta un gran reto en términos de viabilidad técnica y económica.

De esta manera, se menciona que poder aprovechar los recursos disponibles y la infraestructura de las tecnologías actuales representaría un gran avance en países en desarrollo, mientras se avanza en la implementación de las alternativas relacionadas con la utilización de fuentes renovables para la generación ideal tanto de energía como de hidrógeno verde. Además, se alude que, apostar en el mediano plazo a mejorar los procesos de captura de CO₂ en la producción de este hidrógeno azul, conllevaría otro tipo de ventajas en términos ambientales y referentes incluso al aprovechamiento de esta captura de carbono.

A nivel de Colombia y al día de hoy, si bien estas tecnologías aún no se encuentran desarrolladas, se estima que su implementación pueda ser viable considerando las grandes reservas de carbón con las que cuenta. De acuerdo con un estudio desarrollado por la UPME, el país tiene las mayores reservas de carbón a nivel de Latinoamérica y hacia el 2005 se ubicaba en el sexto lugar en cuanto a nivel de exportación de este recurso a nivel mundial (UPME, 2005). Hacia el 2016, estas reservas se estimaban por 4.881 millones de toneladas, lo cual, considerando niveles de producción (y reservas) en el país constantes, indica una disponibilidad del recurso para 54 años (Ministerio de Minas y Energía, 2017).

En este sentido, se estima una oportunidad investigativa y potencial para analizar el posible desarrollo e implementación de la tecnología de gasificación de carbón para la producción de hidrógeno en el país. Esto como una alternativa que permita diversificar la canasta energética, cubrir la demanda futura de energía que se encuentra en crecimiento, aprovechar los recursos minerales del país de una forma más limpia y aportar a la disminución de emisiones nocivas que están afectando al ambiente desde el sector energético.

El Gobierno nacional, desde el Ministerio de ciencia, tecnología e innovación, en conjunto con la UPME, ha invitado a la comunidad investigativa por medio de su convocatoria en energía sostenible y su aporte a la planeación minero energética para el 2020, a tratar la temática para evaluar los posibles impactos que la implementación de esta tecnología tendría en el sector energético a largo plazo (MINCIENCIAS, 2020).

Analizando la problemática en su conjunto, se puede identificar la necesidad de modelos de planeación energética más robustos que permitan analizar este tipo de alternativas en el tiempo y en el contexto nacional. Se debe buscar que estos tengan en cuenta las diferentes técnicas de generación de energía y capturen las interacciones entre el sector energético y el sistema económico, social y ambiental a largo plazo (Deenapanray & Bassi, 2015).

Mediante la revisión de diversos estudios, se ha identificado una herramienta que ha permitido el análisis de sistemas energéticos en diferentes países a través de su modelación. Esta herramienta es la dinámica de sistemas, la cual facilita el análisis de sistemas complejos, la interacción entre sus elementos y permite estimar los efectos a largo plazo que puede llegar a tener un cambio dentro de todo el sistema. En el caso del sector energético ha sido útil para estudiar la implementación de nuevas alternativas, sus efectos y su comportamiento en el tiempo.

Autores como Mutingi et al., (2017) presentan arquetipos de dinámica de sistemas para la gestión de sistemas energéticos y demuestran la importancia de tener en cuenta un enfoque sistémico y de retroalimentación al tomar decisiones relacionadas con la planificación de matrices energéticas. Momodu & Kivuti-Bitok, (2018) y Moumouni & Shari, (2020) por su parte, desarrollan estudios en distintos

países y analizan por medio de esta herramienta, la planificación energética, la gestión de capacidades y la medición de impactos medioambientales a lo largo del tiempo de las tecnologías utilizadas en este sector.

Dada su pertinencia, se utiliza la dinámica de sistemas como herramienta metodológica para tratar la problemática desde la perspectiva ambiental. De esta manera, inicialmente se desarrolla un modelo que representa la estructura actual del sistema energético colombiano, incluyendo las tecnologías mencionadas de generación de hidrógeno por medio de gasificación de carbón, así como la generación de energía a partir de este hidrógeno. Seguidamente, mediante escenarios de simulación se analizan los principales efectos ambientales a largo plazo que tendría la utilización de carbón en la generación de hidrógeno por medio de gasificación y se contrastan estos efectos con los de su utilización actual dentro de la matriz energética nacional.

De acuerdo con el anterior planteamiento, la pregunta de investigación que se pretende responder es: **¿Qué efectos ambientales se estiman a largo plazo, mediante un modelo de dinámica de sistemas, de la inclusión de hidrógeno proveniente de gasificación de carbón en el sector energético colombiano?**

Para dar respuesta a este interrogante, se plantearon como objetivos del presente trabajo los siguientes:

Objetivo general

Evaluar mediante un modelo de dinámica de sistemas los principales efectos ambientales a largo plazo derivados de la inclusión de hidrógeno obtenido a partir de gasificación de carbón en el sistema energético colombiano.

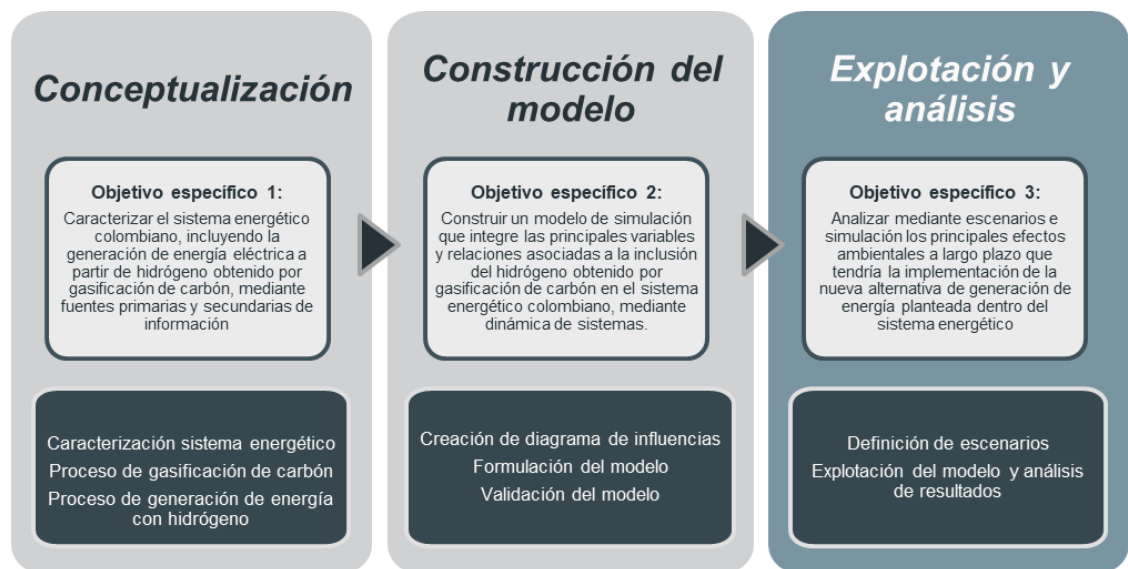
Objetivos específicos

- Caracterizar el sistema energético colombiano, incluyendo la generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno obtenido por gasificación de carbón, mediante fuentes primarias y secundarias de información.
- Construir un modelo de simulación que integre las principales variables y relaciones asociadas a la inclusión del hidrógeno obtenido por gasificación de carbón en el sistema energético colombiano, mediante la dinámica de sistemas.
- Analizar mediante escenarios de simulación, los principales efectos ambientales a largo plazo que tendría la implementación de la nueva alternativa de generación de energía planteada dentro del sistema energético, considerando sus posibles efectos económicos.

El enfoque para llevar a cabo el presente trabajo se basa en la metodología de pensamiento sistémico cuyas actividades integran la identificación del problema, planteamiento de una hipótesis dinámica, creación de un diagrama de influencias, creación de un diagrama de flujo, estimación de parámetros, validación del modelo, explotación del modelo y análisis de resultados (Bala et al., 2017).

El desarrollo del trabajo se divide entonces en 3 grandes fases que abarcan las actividades anteriormente descritas, estas fases son la 'conceptualización', 'construcción del modelo' y 'explotación y análisis'. Cada una de estas se enmarca dentro de un objetivo específico planteado en el proyecto. En la Figura 3, se puede observar a qué objetivo específico responde cada fase y qué actividades abarca en su desarrollo.

Figura 3. Enfoque metodológico general



Fuente: Elaboración propia

A continuación, en el orden del documento se encuentra preliminarmente una revisión de la literatura general por temas comprendidos en el proyecto seguida por tres capítulos principales donde se desarrollan cada uno de los objetivos específicos respectivamente. Dentro de cada uno de estos capítulos se presenta el enfoque metodológico específico para su desarrollo, los resultados y una discusión alrededor de los mismos. Finalmente, en el cuarto y último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones finales del trabajo de investigación.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

El presente trabajo se fundamenta en los siguientes ejes: sistema energético, producción de hidrógeno, gasificación de carbón, análisis de impactos ambientales y dinámica de sistemas. Con el fin de conocer el estado de la investigación alrededor de la problemática que se aborda, se realizó una revisión y análisis de la literatura considerando las temáticas mencionadas.

Preliminarmente, se realizó una consulta del estado actual de la investigación por cada uno de los temas por medio de la herramienta wizdom.ai. Esto permitió conocer las principales editoriales, revistas y autores que han publicado recientemente en estos temas, así como su tendencia. Seguidamente, de acuerdo con la información consultada se procedió a realizar las búsquedas en diversas bases de datos locales, nacionales e internacionales, utilizando operadores de búsqueda que permitieron relacionar las temáticas en conjunto, así como abordar los términos equivalentes a estas.

Se encontraron desde tesis de pregrado, maestría y doctorado, así como artículos de investigación, libros, reportes e informes de organizaciones. Los estudios por destacar en la presente sección se caracterizan por tratar varias de las temáticas abordadas y por generar aportes significativos para la presente investigación. Sin embargo, cabe mencionar que no se encontraron trabajos que desarrollen la totalidad de estos temas en conjunto y por lo cual se reconoce el nivel de novedad y aporte a la literatura en el proyecto a desarrollar.

A continuación, se presentan los estudios más relevantes encontrados mediante una clasificación por las temáticas más representativas tratadas en los mismos: “Hidrógeno y Sector Energético en Colombia”, “Gasificación de Carbón” y “Análisis de Efectos Ambientales”. En este último, se articulan los temas de producción de hidrógeno, gasificación de carbón, sector energético en general y cómo se han abordado estas temáticas desde la dinámica de sistemas.

Hidrógeno y Sector Energético en Colombia

Inicialmente, se destaca una tesis de maestría desarrollada en Colombia por los autores Moreno & Vargas, (2013), titulada “La tecnología del hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia”. Los autores analizan la situación de la matriz energética colombiana e investigan la tecnología del hidrógeno como una nueva alternativa que pueda ser incorporada en este sector. Esto se realiza mediante una revisión a nivel internacional de las formas que lideran la producción de hidrógeno, así como un análisis estructural del sistema energético colombiano, enfatizando la identificación de sus principales actores.

Los resultados de este estudio presentan la necesidad de una primera actuación por parte del Gobierno, para la creación de la normatividad necesaria que influya en las decisiones empresariales en cuanto a la implementación de nuevas tecnologías y en particular la del hidrógeno en el sector. Seguidamente, la participación de la Universidad, entendida como grupo de actores en áreas de investigación, se estima primordial para sentar las bases de investigación en el tema en el país.

En años posteriores a este primer documento desatacado, se evidencia en efecto un aumento en la investigación alrededor de la tecnología de hidrógeno y las posibilidades de implementación en el país. En este transcurso, Aguilar, (2017) desarrolla su tesis de maestría “Evaluación de alternativas para potencializar el uso de hidrógeno como vector energético”. Hacia este año, y por medio de este trabajo se puede evidenciar el avance en términos de modelación y diseño de procesos de producción y almacenamiento de hidrógeno, desde las ciencias y considerando aspectos técnicos.

Se estima la electrólisis como el proceso de producción de hidrógeno con mayor potencial y el más investigado, debido a su acople con la generación de energía con fuentes renovables. Con base en los resultados, también se estima el gran potencial del hidrógeno en el campo energético debido a las múltiples formas de producción y almacenamiento que hasta el momento se han estudiado. Se destaca además la utilización de software especializado para la simulación de procesos para el análisis de esta tecnología. Sin embargo, se concluye que el tema en términos generales aún se encuentra en desarrollo y requiere seguir siendo abordado desde diferentes perspectivas.

En el transcurso del estudio de oportunidades para la implementación de la tecnología del hidrógeno en el país, y dentro de los documentos más recientes, se encuentra un artículo de investigación desarrollado por Sanchez, (2019), “Energía Renovable: Hidrógeno como Vector Energético”. Aquí se analiza la evolución de la tecnología del Hidrógeno y sus potencialidades en Colombia, desde una mirada analítica y descriptiva, como lo realizaron Moreno y Vargas en el 2013. Si bien, a este año, aún no se estima claramente la utilización real del hidrógeno para la generación de energía, se destacan sus beneficios considerando muchas más variables, desde lo técnico, económico y ambiental.

Uno de los aportes de este trabajo es que despliega las principales limitaciones existentes a la fecha, en términos técnicos, sociales y económicos, para la implementación de esta tecnología. Dentro de estas, se pueden mencionar el vacío sobre el potencial de las fuentes renovables de energía, la falta de planificación o la realización de esta sin considerar un sistema totalmente integrado, las altas inversiones requeridas y externalidades. Esto finalmente aporta para direccionar mejor las planificaciones futuras desde los distintos actores involucrados, Gobierno, Empresa y Universidad.

Los trabajos destacados en este documento logran hallar relaciones importantes que permiten estimar la posibilidad cercana de implementación de ciertas tecnologías estudiadas de generación de hidrógeno en el país. Aunque, si bien, se encuentra que cada vez se han estudiado diferentes métodos de generación, se puede identificar aún un vacío en cuanto al estudio de las tecnologías que permitan obtener energía de este o que permitan aprovecharlo. En la revisión hecha es difícil aún apreciar un panorama claro con relación a este aspecto al interior del país.

Sin embargo, cabe destacar que, en la actualidad, diversos medios han dado a conocer el avance que está dando el Gobierno en Colombia desde sus ministerios, hacia la descarbonización y la creación de la hoja de ruta de transición energética, entendida como el camino hacia el desarrollo y puesta en marcha de la generación de energía por medio de fuentes renovables. En los anuncios, cabe destacar la consideración de la implementación de hidrógeno a mediano y largo plazo en esta hoja de ruta.

Esto, aunado a las iniciativas recientes del Gobierno para promover la investigación alrededor de tecnologías con las que se pueda llevar a cabo la inclusión del hidrógeno en el sistema energético, permite estimar que en el momento se encuentren en marcha estudios desde diferentes ámbitos que permitan aportar a la toma de decisiones con respecto a este tema en el país.

Gasificación de Carbón

En cuanto al proceso de gasificación de carbón para la producción de hidrógeno, se encuentran estudios principalmente a nivel internacional y se desatacan artículos de investigación. Se conoce que esta tecnología data de comienzos del siglo XX y a través del tiempo se han evidenciado desarrollos que han mejorado su eficiencia, siendo al día de hoy una de las alternativas más utilizadas tanto para la generación de energía como para la producción de hidrógeno en varios países.

Un primer estudio, no es muy reciente, pero sí muy cercano a Colombia y se desarrolla en Chile. Se trata de una tesis de maestría titulada “Gasificación de carbón en Chile, para obtención de hidrógeno y electricidad en planta de ciclo combinado” por Díaz, (2007). El autor analiza una situación en su país referente a la necesidad de encontrar alternativas para el sector energético y se presenta la oportunidad de estudiar el aprovechamiento del recurso carbonífero de manera alternativa, del cual poseen altas reservas utilizables. En este sentido, la gasificación aparece como una tecnología atractiva para este fin y en este estudio aportan hacia los criterios de diseño y construcción de un gasificador requerido para llevar a cabo este proceso en un escenario en particular.

Más recientemente, en el año 2017, los autores Gnanapragasam & Rosen, (2017), realizan una revisión de los procesos de producción de hidrógeno con base en carbón, biomasa y otros combustibles sólidos. En este estudio se analizan estos procesos de generación de hidrógeno y se realizan comparaciones teniendo en cuenta sus costos y sus efectos medioambientales. Referente al proceso de gasificación de carbón se encuentra que presenta una ventaja frente a la combustión de este mismo recurso para la generación de energía. Y esto, básicamente, porque bajo las condiciones que este primer proceso se da, el gas combustible que se obtiene conserva una mayor parte de energía inicial, además que constituye un proceso más limpio unificado con procesos de captura y secuestro de carbono.

Aquí se encuentra que el proceso de gasificación se puede realizar de manera superficial o subterránea. Los autores Verma et al., (2015) y Mandal et al., (2020) describen este último proceso y desarrollan modelos para estimar la eficiencia y emisiones obtenidas en casos aplicados, considerando la co-generación de energía eléctrica. Aquí evalúan y destacan el proceso de captura de CO₂ como una tecnología que no puede eludirse en el proceso de gasificación debido a las emisiones que se generan en este de cualquier forma.

En los anteriores trabajos también se observa que el proceso de gasificación de carbón puede traer múltiples ventajas si se consideran y aprovechan los procesos intermedios asociados. Múltiples gases que se generan, además del CO₂, pueden ser capturados y luego destinados a otros usos de tipo industrial o incluso pueden ser utilizados para la generación de energía o calor requerido en el mismo proceso. Se observa, en este sentido, que existen oportunidades investigativas en este ámbito.

Hasta ahora, se ha abarcado la problemática del análisis de nuevas alternativas para aportar al sector energético tanto a nivel nacional, como a nivel internacional, desde un punto de vista mayormente técnico y económico. Sin embargo, en la mayoría de estos, se menciona la importancia de considerar dentro de los análisis los aspectos ambientales y sociales a mayor detalle, y que estos se tengan en cuenta a la hora de tomar decisiones en relación con proyectos a mediano y largo plazo. Y esto, precisamente, ya que los efectos ambientales negativos evidenciados a hoy, se deben a una planificación del sector energético sin haberlos tenido mayormente en cuenta.

Esto abre paso a revisar el tema específico que se abordará en el presente trabajo y es la valoración del aspecto ambiental, particularmente en el marco de la inclusión de hidrógeno en la matriz energética nacional como una nueva alternativa, así como en el proceso de gasificación de carbón.

Análisis de Efectos Ambientales

A continuación, se presentan trabajos recientes desarrollados alrededor del análisis de efectos ambientales en el sector energético, en los procesos de generación de hidrógeno y en la utilización del carbón. En esta sección se destacan artículos de investigación a nivel internacional. En la revisión se pudo observar que este es un tema que está siendo investigado recientemente a mayor escala y se encuentran documentos más actuales que en las secciones anteriores.

Con respecto a los efectos ambientales en el sector energético, se encuentra un estudio realizado por Bamisile et al., (2021) quienes investigan las causas y tendencias de las crecientes emisiones de CO₂ en diversos países de África. Se encuentra una correlación entre las emisiones y el desarrollo económico de cada país. Además, el sector energético aquí como a nivel global toma gran parte en la situación. En el estudio se busca plantear posibles soluciones a la reducción de emisiones a largo plazo, sin que esto afecte en gran medida el sector económico.

La metodología usada consiste en analizar la tendencia de las emisiones y su correlación con variables económicas por medio de modelos de redes neuronales y teniendo en cuenta datos históricos. Seguidamente, se analiza el impacto que la producción de hidrógeno integrada a las tecnologías de energía renovables tendría en el sector energético y en la reducción de estas emisiones. Finalmente, se encuentra un potencial en la integración de esta tecnología de generación de hidrógeno para incentivar la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables.

La temática de análisis de efectos ambientales también ha sido ampliamente abordada en el contexto del sector energético mediante dinámica de sistemas. Una herramienta de modelación y simulación que ha permitido representar los sistemas energéticos de diversos países y evaluar la implementación de nuevas alternativas a largo plazo considerando variables técnicas, económicas, políticas, ambientales y sociales.

En uno de los trabajos más recientes se realiza un modelo de dinámica de sistemas para la planeación energética y estimación de CO₂ en la matriz energética de Nigeria. Aquí se evalúan mediante diversos escenarios de simulación distintas alternativas, considerando los efectos ambientales y económicos que tendrían cada una de ellas en el largo plazo (Shari & Moumouni, 2020). Finalmente, se consigue analizar las alternativas más promisorias para abordar las problemáticas puntuales de esta matriz energética.

Laimon et al., (2020), también presentan un artículo de investigación en el que realizan un análisis mediante dinámica de sistemas del desarrollo del sector energético en Australia. Esta herramienta permite reconocer el evidente crecimiento

poblacional, de demanda de energía, y de consumo de fuentes fósiles para el cubrimiento de la misma. Mediante el modelo desarrollado se pueden estimar las emisiones relacionadas con el consumo de estos recursos y cuánto tiempo podrían durar dados unos estimados de reservas en el país.

Los anteriores dos trabajos, son los que más se acercan y aportan al propósito de la presente investigación, debido a que permiten replicar determinados arquetipos dentro del modelo de simulación que pueden aplicarse en el contexto de Colombia. Además, aportan un camino metodológico que permite evaluar, desde una perspectiva ambiental, una nueva alternativa dentro de un sistema energético a largo plazo.

Otros estudios alrededor de esta temática son desarrollados por los autores Momodu & Kivuti-Bitok, (2018) y Deenapanray & Bassi, (2015). En sus trabajos se desarrollan modelos de dinámica de sistemas para la planeación energética y el cambio climático, considerando la interacción económica, social y ambiental dentro del sistema. Mediante escenarios y comparación de alternativas, se encuentra medidas que aportan a una planificación energética a mediano y largo plazo de manera integral.

En cuanto al análisis de efectos ambientales específicamente para la producción de hidrógeno, se encuentra un trabajo desarrollado por Mehmeti et al., (2018). La problemática aquí es abordada desde la metodología de análisis de ciclo de vida. El objetivo en este trabajo es calcular la huella de carbono de distintos procesos de producción de hidrógeno, considerando las emisiones en cada una de sus etapas. Este trabajo permite conocer los indicadores ambientales más relevantes a tener en cuenta para estimar los efectos que tienen los diferentes métodos de producción de hidrógeno, incluyendo el proceso de gasificación de carbón.

Otros autores a mencionar que han estudiado las rutas de producción de hidrógeno y sus impactos ambientales son: Siddiqui & Dincer, (2019) mediante una metodología CML 2001 que permite el análisis y comparación de impactos en los procesos; y Valente et al., (2020) y Sadeghi et al., (2020) mediante análisis de ciclo de vida. Los autores Burmistrz et al., (2016) y Liu & Liu, (2021), han realizado análisis de ciclo de vida específicamente para el proceso de gasificación de carbón para la producción de hidrógeno.

Por su parte, Wang et al., (2021), en su artículo de investigación realizan un estudio de ciclo de vida específicamente en la cadena de suministro de carbón para la generación de energía eléctrica. Este es desarrollado en China, el país de mayor producción y uso de este recurso en el mundo. Se consideran las etapas de minería, transporte y combustión y luego de este análisis, los mayores efectos ambientales encontrados son las emisiones de CO₂. Estas son analizadas a mayor detalle mediante análisis de sensibilidad con el propósito de ver escenarios en los cuales estas emisiones puedan ser reducidas.

En los anteriores trabajos se abordó el análisis de efectos ambientales en el sector energético, en los procesos de generación de hidrógeno, así como en la cadena del carbón y el proceso de gasificación desde distintas metodologías, como redes neuronales, análisis de ciclo de vida y dinámica de sistemas. Los trabajos destacados a detalle aportan en gran medida al presente trabajo, desde la contextualización de los procesos a analizar, como en el camino metodológico a seguir para su desarrollo. Finalmente, dadas las características del problema y los antecedentes analizados, la dinámica de sistemas se confirma como herramienta idónea para abordarlo.

1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO COLOMBIANO, INCLUYENDO LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE HIDRÓGENO

En este primer capítulo se aborda el primer objetivo específico propuesto en el trabajo: Caracterizar el sistema energético colombiano, incluyendo la generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno obtenido por gasificación de carbón, mediante fuentes primarias y secundarias de información.

Inicialmente, se presenta cómo se encuentra conformado el sistema energético y se describen los diferentes procesos identificados. Se identifican las principales variables, características y actores del sistema, buscando comprender su estructura y funcionamiento. Esto se lleva a cabo mediante una revisión de fuentes de información como reportes de entidades gubernamentales e industrias del sector energético a nivel nacional.

En segundo lugar, se identifican y describen las actividades y elementos principales del proceso de gasificación de carbón para la generación de hidrógeno. Para esto, se realiza una consulta de fuentes de información secundaria a nivel internacional donde se encuentre mayormente desarrollado el proceso y permita comprender sus etapas y parámetros relevantes.

Seguidamente, se caracteriza el proceso de generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno, mediante la descripción de sus fases y considerando las condiciones particulares definidas de la actividad anterior. Esta actividad se realiza consultando fuentes de información externas al país donde se implementa el proceso.

Y finalmente, se presentan los principales indicadores de los efectos ambientales relacionados con las tecnologías estudiadas.

1.1 Caracterización del Sistema Energético en Colombia

En Colombia se encuentra establecido el Sector Minero Energético que abarca las actividades relacionadas con el aprovechamiento de los recursos energéticos del país. Este sector se encuentra conformado por 3 subsectores: subsector de energía eléctrica, subsector de minería y subsector de hidrocarburos; y está encabezado por el Ministerio de Minas y Energía, máxima autoridad del sector. Para esta sección se considera únicamente el sector de energía eléctrica, al cual se llama en general “sistema energético”.

El sistema energético en Colombia se encuentra conformado por cuatro principales procesos: generación, transmisión, distribución y comercialización, en conjunto estos integran el conocido Sistema Interconectado Nacional (SIN). En cada uno de ellos participan distintos actores y subprocesos que permiten generar la energía mediante diversas tecnologías y desde distintas fuentes y llevarla hasta los hogares e industrias.

El SIN, al integrar todos los procesos de la cadena de energía en el país, garantiza el suministro de energía a todas las regiones, las 24 horas y todos los días del año. Más de treinta empresas componen el SIN en todos los procesos y existen alrededor de 209 plantas de generación de energía de diferentes fuentes (CELSIA, 2019). Las zonas de difícil acceso que no se encuentran interconectadas al SIN reciben el nombre de ZIN. Estas corresponden al 52% del territorio presentan una atención particular de la cual se encarga el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no interconectadas (IPSE) (Ingeniería y Construcciones SAS, 2021).

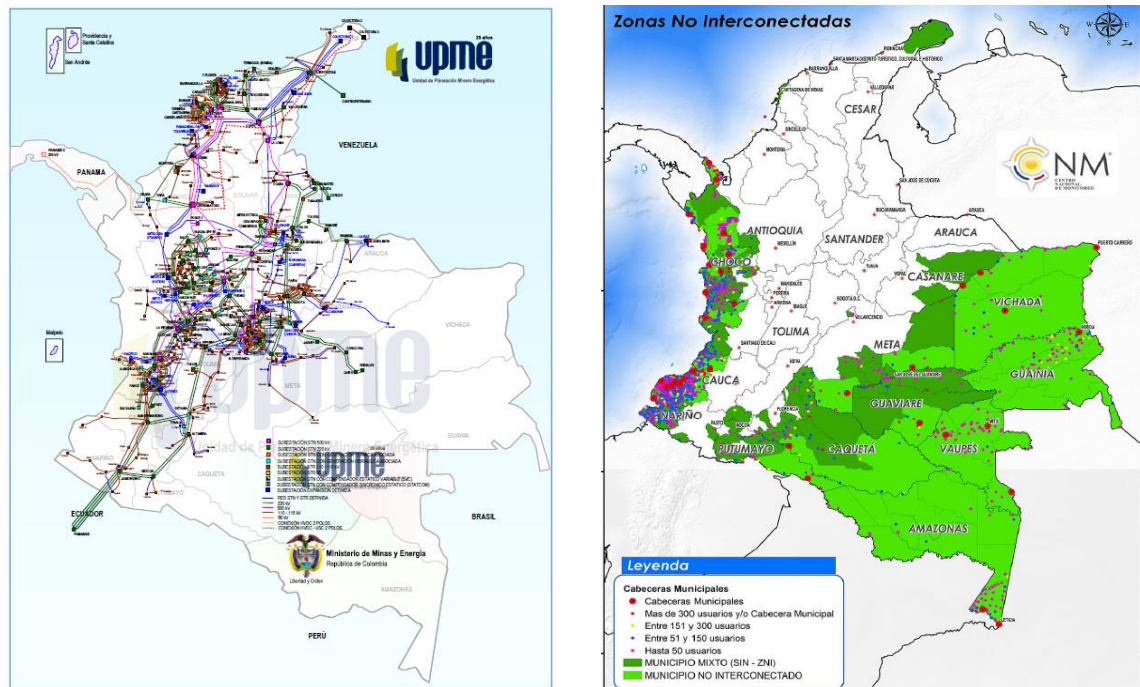
En la Figura 4 se presentan dos gráficos, el primero muestra la cobertura del Sistema Interconectado Nacional y el segundo presenta las Zonas no Interconectadas en el país.

Dentro del SIN, el proceso de generación hace referencia a la producción de energía eléctrica a partir de diversas fuentes. De acuerdo con la Ley 1715 de 2014 estas fuentes se pueden clasificar en Fuentes Convencionales de Energía, que corresponden a las más utilizadas tales como hidroeléctrica y termoeléctrica; y Fuentes no Convencionales de Energía (FNCE) que utilizan generalmente recursos renovables, pero cuentan con una baja participación, estas son eólica, solar, biomasa etc. Para el presente trabajo se prestará mayor atención a este proceso de generación, sin embargo, se describen brevemente los demás procesos que conforman el sistema.

El proceso de transmisión hace referencia al transporte de la energía eléctrica mediante redes de alta tensión, conectando las plantas generadoras con los grandes centros de consumo dentro del sistema interconectado. El proceso de

distribución hace posible el transporte de la energía hacia los consumidores finales, por medio de redes de menor tensión. Y finalmente la comercialización, como su nombre lo indica, es el proceso mediante el cual se factura la energía eléctrica a los usuarios finales (Ministerio de Minas y Energía, 2019).

Figura 4. Sistema Interconectado Nacional vs. Zonas no Interconectadas



Fuente: (RAP-E, 2020)

Retomando el proceso de generación, el país se caracteriza por sus grandes cualidades geográficas y su riqueza hídrica a nivel mundial. Por esta razón, la principal tecnología para la generación de energía en el país es hidroeléctrica, cubriendo un 68,3% del total demandado. Al utilizar en su mayoría un recurso renovable como lo es el agua, esto hace que cuente con una de las matrices energéticas más limpias. A esta tecnología le sigue la térmica, la cual cubre un 30,7% de la demanda y a hoy utiliza fuentes fósiles como gas natural (13,3%), carbón (9,6%) y diésel (7,8%). Finalmente, en una pequeña escala, le siguen determinadas tecnologías energéticas limpias como solar y fotovoltaica que hacen uso de fuentes renovables no convencionales y cubren el otro 1% de la demanda energética en el país (Grupo Bancolombia, 2019).

La distribución de las tecnologías de generación, permiten evidenciar una alta dependencia del sistema en la fuente hidroeléctrica. Por esta razón, es pertinente mencionar que la capacidad efectiva de esta fuente durante el año puede llegar a

ser muy variable al depender del régimen de lluvias al interior del país. Cuando llegan temporadas de sequía, la demanda de energía que no puede ser cubierta mediante fuentes hidroeléctricas, procede a ser satisfecha por fuentes térmicas.

De esta manera, el cubrimiento de la demanda de energía eléctrica dentro del país se lleva a cabo de la siguiente manera: inicialmente se aprovecha la energía generada por las fuentes no convencionales como solar y eólica que se tenga disponibles, aprovechando la capacidad efectiva de estas tecnologías al máximo mientras estas generen, ya que son totalmente dependientes de recursos renovables intermitentes como el sol y el viento. Seguidamente, la demanda de energía pasa a ser cubierta por la capacidad disponible de plantas hidroeléctricas, que como se mencionaba cuentan con la mayor capacidad de generación, pero a su vez esta es variable durante el año ya que depende del recurso hídrico disponible; y finalmente para cubrir la demanda de energía restante se acude a las fuentes térmicas disponibles (carbón, gas).

Como entidades que cumplen papeles importantes dentro del sistema energético en este sentido se encuentran: XM S.A., encargada de garantizar la operación del Sistema Interconectado Nacional y la administración del Mercado de Energía Mayorista Colombiano (MEM); la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) que lleva a cabo la planificación dentro del sistema para el mejor aprovechamiento de los recursos; y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), encargada principalmente de funciones de regulación en la prestación de los servicios del sector (Ministerio de Minas y Energía, 2019).

Adicional a estas entidades, existen diversas más con funciones de apoyo en investigación, administración, operación, vigilancia, control y asesoría en cada uno de los procesos dentro del sistema. Así como también gremios importantes dentro del sector tales como Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones (ANDESCO), Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (ACOLGEN), Asociación Nacional de Empresas Generadoras (ANDEG), Asociación Colombiana de Distribuidores de Energía Eléctrica (ASOCODIS) y la recientemente creada Asociación de Energías Renovables (SER).

Cabe mencionar que recientemente se ha venido desarrollando la planificación de la transición energética al interior del país, con lo cual se apuesta por la implementación de tecnologías alternativas para la generación de energía eléctrica y de esta manera incrementar y balancear la distribución de capacidad instalada en el sector.

La planeación actual dentro del sistema considera ahora muchos más aspectos que antes, y se puede evidenciar un compromiso con el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible a nivel mundial. Esto implica que el sistema de energía eléctrica se enfrenta al reto de diversificación del portafolio de generación

considerando temas como la descarbonización del sector y el control de emisiones, entre los aspectos ambientales que más se destacan.

El modelo a desarrollar pretende ser una representación del sistema energético colombiano actual que incluya las principales variables analizadas dentro del proceso de generación de energía, así como sus relaciones, con el fin de analizar cómo afectaría al sistema la inclusión de una nueva fuente de energía. Y en este caso, esta nueva fuente consiste en el hidrógeno como vector energético que se pueda obtener a partir del carbón.

1.2 Caracterización del proceso de Gasificación de Carbón

En esta sección se identifican y describen las actividades y elementos principales del proceso de gasificación de carbón para la generación de hidrógeno. Para esto, se realizó una consulta de fuentes de información secundaria a nivel internacional donde se encuentra mayormente desarrollado el proceso permitiendo comprender sus etapas y parámetros relevantes.

Inicialmente, la gasificación es un proceso termoquímico en el que se convierte un material sólido o líquido en gas mediante la aplicación de calor y un agente gasificante u oxidante (como oxígeno o agua). El proceso de gasificación de carbón por su parte es uno de los procesos más utilizados hoy en día para la obtención de gas de síntesis, mezcla principalmente compuesta por monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno, entre otros componentes, que ha sido históricamente utilizada como combustible. De este proceso de gasificación puede entonces obtenerse la mezcla mencionada o sus compuestos de forma separada, como lo es el hidrógeno, interés puntual en este trabajo.

En la Figura 5 se puede observar un proceso típico de gasificación de carbón. En este, ingresa un carbón previamente pulverizado en un gasificador, el cual, tras la aplicación de oxígeno y vapor, genera una reacción convirtiéndose en la mezcla anteriormente mencionada, gas de síntesis. Si bien este se compone principalmente por H_2 , CO y CO_2 , sus características y composición pueden variar dependiendo de varios aspectos, dentro de los cuales está la tecnología de gasificación y las características del carbón que se utilice. De esta manera se tiene en cuenta que este gas puede contener cantidades significativas de metano y trazas de ácido sulfhídrico y amoníaco, componentes que se hace necesario remover o separar mediante procesos complementarios al proceso de gasificación para purificar la mezcla o componente requerido (Stiegel & Ramezan, 2006).

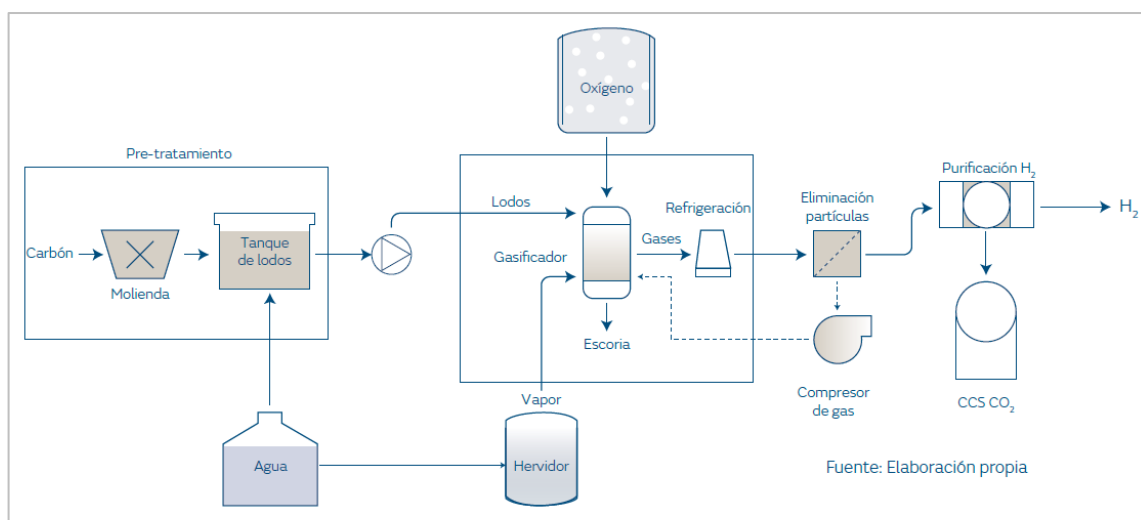
Otro aspecto a tener en cuenta es que, independientemente al procesar carbón se genera una mezcla con alto contenido de CO_2 , lo cual hace indispensable un proceso de captura de este gas para evitar sus emisiones al ambiente. En la

actualidad, los procesos de gasificación de carbón permiten la incorporación de tecnologías desarrolladas de captura de este componente de manera que pase a ser destinado para su almacenamiento o posterior aprovechamiento industrial (Morante et al., 2020).

Adicionalmente, existen varios parámetros para determinar la eficiencia de conversión y emisiones generadas en el proceso, como el tipo de agente gasificador, la presión y la temperatura de trabajo. Además, se deben tener en cuenta qué tipo de reactores se utilizarán.

De esta manera, el proceso de gasificación de carbón supuesto en el presente trabajo utiliza como agente gasificador oxígeno y vapor de agua, la temperatura del proceso se encuentra en un rango de 1000 – 1500 °C y la presión de trabajo se encuentra entre 30 – 70 bar (Damen et al., 2006).

Figura 5. Proceso de gasificación de carbón



Fuente: (Morante et al., 2020)

En cuanto al tipo de reactor, se tiene en cuenta que estos se clasifican de acuerdo con los regímenes de flujo. En este caso, se utilizará un reactor de flujo de arrastre que se caracteriza por hacer fluir el carbón pulverizado a altas velocidades en la misma corriente que el oxidante. Este demanda temperaturas y cargas de oxígeno elevadas, sin embargo, en comparación con otro tipo de reactores, con este se obtiene una mayor cantidad de gas de síntesis limpio (Benavides, 2015).

Además de los parámetros mencionados, uno de los aspectos más determinante son las características del insumo de este proceso: el carbón. Dependiendo de sus

características se puede conseguir determinada eficiencia y así mismo se generarán emisiones al ambiente. Para el presente modelo se asume la utilización de un carbón tipo térmico bituminoso, cuyas características se encuentran dentro de los rangos que se presentan en la Tabla 1. Cabe mencionar que las características del carbón catalogado como genérico en Colombia por la UPME se encuentran dentro de estos rangos.

Tabla 1. Características carbón tipo térmico bituminoso

Carbón tipo térmico bituminoso	
Carbón fijado	60%-80%
Materia volátil	16%-37%
Ceniza	5%-10%
Humedad	2%-15%

Fuente: (UPME, 2018)

Dada la descripción del proceso de gasificación de carbón se asume que al final se obtiene un hidrógeno libre de CO₂, principal componente a analizar. Por lo cual, para el presente trabajo, en la utilización de este hidrógeno posteriormente para la generación de energía eléctrica, no se consideran emisiones de este gas al ambiente.

1.3 Caracterización del proceso de Generación de Energía Eléctrica a partir de Hidrógeno

Finalmente, se caracteriza el proceso de generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno, mediante la descripción de sus fases y considerando las condiciones particulares definidas de la actividad anterior. Esta actividad se realiza consultando fuentes de información externas al país donde se implementa el proceso.

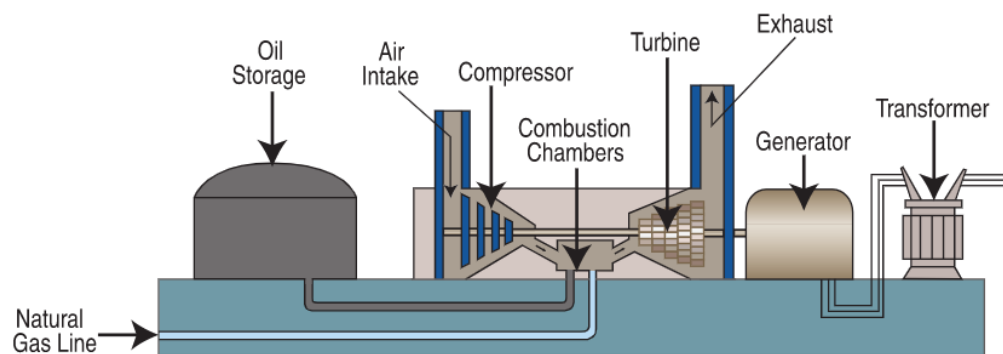
Una vez se dispone de Hidrógeno, este puede ser destinado a diferentes usos o aprovechamiento dentro de la industria química, en la generación de energía, en la industria metalúrgica u otras aplicaciones (Benavides, 2015). En cuanto a la generación de energía, se destacan la producción de electricidad mediante pilas de combustible, generación de calor mediante motores de gas y generación de electricidad por medio de turbinas de gas, las cuales son utilizadas típicamente en las centrales térmicas (Morante et al., 2020).

Para este trabajo se considera que este recurso sería utilizado como combustible para la producción de energía eléctrica por medio de turbinas de gas. Estas son

máquinas térmicas que cuentan con un sistema de combustión donde se convierte la energía de un fluido en energía mecánica o eléctrica. La figura 6. Ilustra la estructura de una planta de generación de energía con turbinas de gas.

En este proceso, el hidrógeno lleva una eficacia elevada en comparación con otros combustibles y se destaca que el producto final de su combustión correspondería a vapor de agua dadas sus características obtenidas en el proceso anterior de generación. De esta manera, se evitan totalmente las emisiones de CO₂ al ambiente.

Figura 6. Proceso de generación de energía en una turbina de combustión a gas



Fuente: (TVA, 2022)

1.4 Principales indicadores de los efectos ambientales relacionados con las tecnologías estudiadas

Para determinar los principales indicadores que permiten evidenciar los efectos ambientales dentro de la matriz energética dada la incorporación de las tecnologías estudiadas en el presente trabajo, se lleva a cabo una revisión de la literatura. Se consideraron diversos artículos en donde se abordan temas relacionados con planeación energética considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales, análisis por medio de dinámica de sistemas de la incorporación de nuevas tecnologías en matrices energéticas, así como análisis de ciclo de vida y de efectos ambientales en procesos de generación de energía. Algunos estudios y autores para destacar se presentan a continuación.

Los autores (Mehmeti et al., 2018) analizan el uso de los recursos en los procesos de producción de hidrógeno mediante un análisis de ciclo de vida y huella hídrica. Presentan una revisión de los métodos convencionales a las tecnologías más emergentes. Por su parte, (Feng et al., 2021) realizan una comparación de los

impactos ambientales del proceso de gasificación de carbón subterráneo con o sin captura y almacenamiento de carbono.

En un estudio desarrollado por (Cao et al., 2019) se menciona la importancia de abordar los impactos ambientales de las actividades a lo largo de toda la cadena de suministro de una termoeléctrica, considerando no sólo emisiones, si no también residuos sólidos, consumo de agua, agotamiento de recursos abióticos, etc. Los autores (C. Wang & Mu, 2014), por su parte estudian los impactos ambientales en una cadena de suministro de electricidad y carbón en China.

Y en esta misma línea, un artículo a destacar desarrollado por los autores (Benítez-Cortéz et al., 2021) estudia específicamente el consumo de agua en los procesos de generación de energía en centrales termoeléctricas en Cuba.

Después de haber realizado la revisión se encuentra que se menciona mayormente la emisión de gases de efecto invernadero como principal indicador ambiental. Si bien, esto abarca diversos tipos de gases contaminantes que son liberados a la atmósfera, se hace mención, de manera particular a la emisión de CO₂, siendo este el más crítico. Además, se consideran como efectos ambientales relevantes, el consumo y contaminación de agua, el consumo de energía, así como la generación de residuos contaminantes.

Para efectos de alcance del presente trabajo y con base en la revisión de indicadores ambientales relevantes relacionados con los procesos de gasificación de carbón para la producción de hidrógeno, como del proceso de generación de energía con hidrógeno y fuentes térmicas, se considera como principales indicadores ambientales: la generación de **emisiones de CO₂** y el **consumo de agua**.

2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El segundo capítulo consiste en abordar el segundo objetivo específico propuesto en el trabajo: Construir un modelo de simulación que integre las principales variables y relaciones asociadas a la inclusión del hidrógeno obtenido por gasificación de carbón en el sistema energético colombiano, mediante la dinámica de sistemas. Para esto se hará uso del software de simulación Vensim DSS.

Siguiendo el enfoque metodológico general planteado y con la información obtenida en la etapa anterior, se procede con la creación de un diagrama causal o de influencia del sistema energético de Colombia. En él se incorporan las principales

variables identificadas del sistema, así como las variables relacionadas con los procesos de generación de energía con hidrógeno y generación de hidrógeno por medio de gasificación de carbón.

Seguidamente, se realiza la formulación del modelo, que consiste en desarrollar un diagrama de flujo o de Forrester a partir del diagrama causal. El diagrama se construye a partir de las variables y las relaciones encontradas en el paso anterior que ahora proceden a ser formuladas y adicionalmente, se asignan valores a los parámetros requeridos. Los datos utilizados en el modelo son extraídos de fuentes de información de actores dentro del sector energético a nivel nacional, así como de revisión de la literatura.

Al final, se lleva a cabo una etapa de evaluación, en la cual se procede a validar el modelo para corroborar su consistencia, buen comportamiento y resultados acordes con tendencias y datos históricos disponibles.

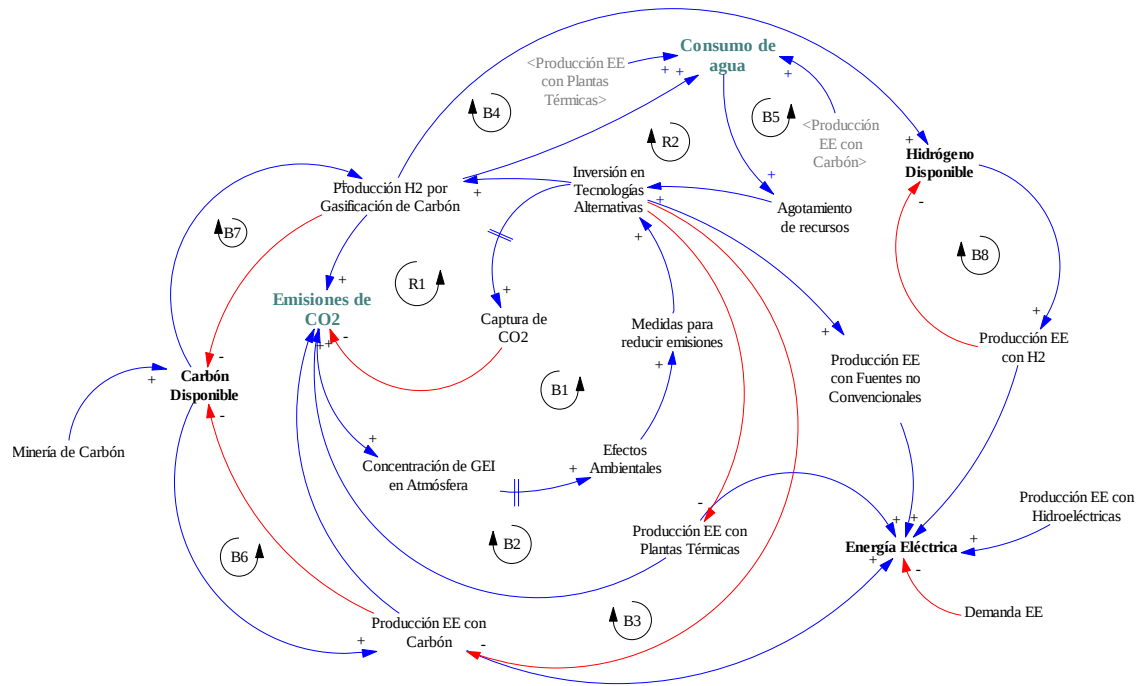
2.1 Diagrama de Influencias

A continuación, se plasma el sistema a estudiar mediante un diagrama causal generado por medio del software Vensim. En este se identifican las principales variables que se van a estudiar y se hallan las relaciones de causalidad entre ellas. Las líneas azules representan causalidad directa, mientras que las líneas rojas entre las variables representan una causalidad inversa.

En la Figura 7 se puede ver este diagrama en donde se destacan como variables principales: el Carbón disponible, el Hidrógeno disponible, la Energía Eléctrica, las Emisiones de CO₂ y el consumo de agua. Es pertinente mencionar que la producción de energía eléctrica con plantas térmicas en este modelo excluye la energía generada en plantas a carbón, puesto que esta variable se estudia por aparte.

Dentro de este diagrama se puede evidenciar que en la influencia de una variable a otra se van formando ciclos de realimentación de refuerzo (R) y/o compensación o balance (B). Esto muestra que la acción sobre una de las variables puede llegar a afectarse a sí misma con el tiempo y una de las ventajas de la dinámica de sistemas es que permite tener presente estas retroalimentaciones en el tiempo. En las figuras más adelante se plasman de manera más concreta los bucles de retroalimentación presentes en el sistema para su análisis.

Figura 7. Diagrama de influencias – Sistema energético

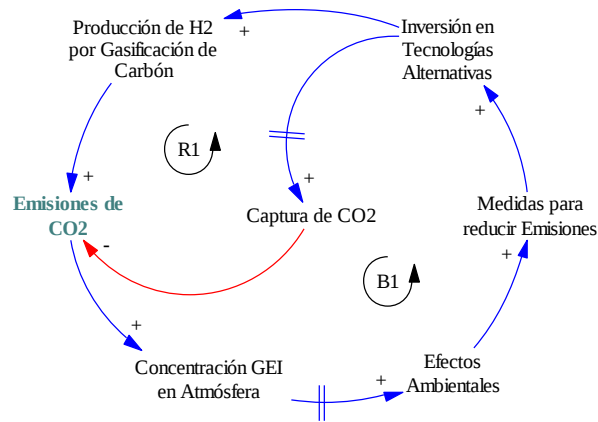


Fuente: Elaboración propia

Bucles de Realimentación

Dos primeros bucles de realimentación se pueden observar en la Figura 8. La generación de emisiones de CO2 que causa una concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera, a su vez ha incrementado los efectos ambientales. Esto, al hacerse evidente ha aumentado la preocupación de gobiernos para aumentar las medidas para reducir estas emisiones, lo cual aumenta la inversión en tecnologías alternativas. Las que se destacan en este trabajo son la gasificación de carbón y la captura de CO2. Con la primera se estaría utilizando el carbón de una manera alternativa y más limpia, sin embargo, este proceso seguiría generando ciertas emisiones, por lo que aquí se cierra un bucle de refuerzo (R1), mientras que, si se desarrolla la tecnología de captura de CO2, esto finalmente ayudaría a reducir las emisiones generadas por la utilización del carbón en el proceso de gasificación, creando un bucle de compensación o balance (B1).

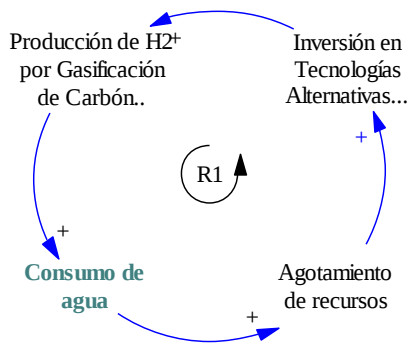
Figura 8. Bucle de realimentación – Gasificación de Carbón y Captura de CO2



Fuente: Elaboración propia

Otro bucle de refuerzo (R2) se encuentra relacionado con el consumo de agua, puede observarse en la Figura 9. Este impacta en el agotamiento y/o contaminación de recursos naturales, lo cual conlleva, al igual que en los anteriores bucles, a potenciar las medidas para reducir estos impactos ambientales. Dentro de estas medidas se encuentra la inversión en tecnologías alternativas como la producción de H2 por gasificación de carbón. Sin embargo, al final, la implementación de este proceso también genera un consumo de agua.

Figura 9. Bucle de realimentación – Consumo de agua

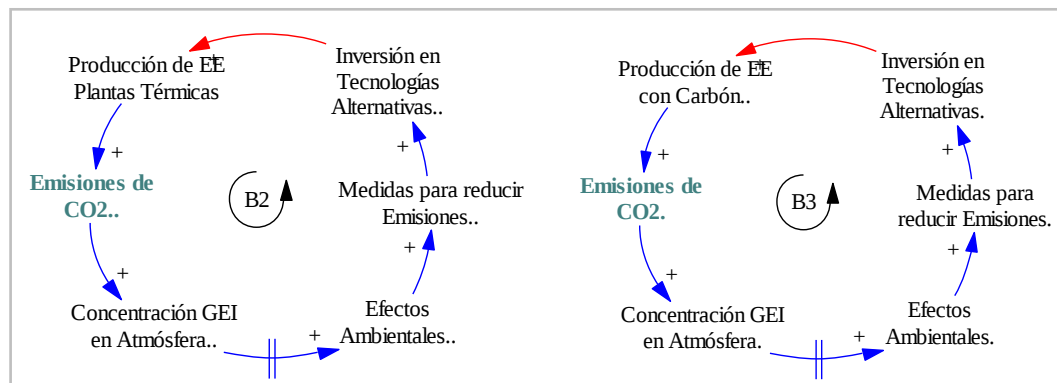


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 10, se ven dos bucles de realimentación de tipo compensación (B2 y B3). La situación es similar a la inicial, pero aquí la inversión en tecnologías alternativas desplazaría y por lo tanto reduciría la producción de energía que se hace directamente con fuentes térmicas como carbón y otras. Se aclara que la

Producción de EE con Plantas Térmicas en el presente trabajo hace referencia a la utilización de fuentes térmicas exceptuando el Carbón, ya que esta se tiene aparte por ser una de las principales variables de análisis del modelo.

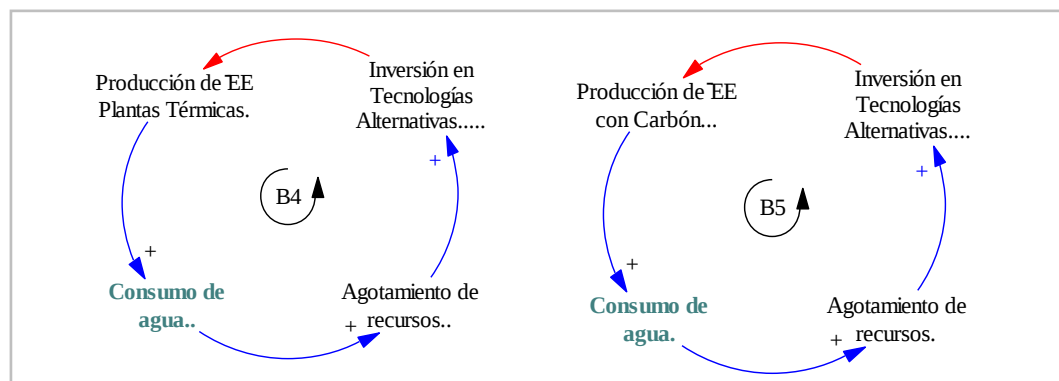
Figura 10. Bucles de realimentación – Emisiones CO2 y Producción de EE con Plantas Térmicas y con Carbón



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se observan nuevamente 2 bucles de compensación (B4 y B5) que siguen la misma dinámica que los anteriores, pero involucrando esta vez el segundo indicador ambiental, que es el consumo de agua. Se refuerza que la inversión en tecnologías alternativas tendería a disminuir la producción de energía eléctrica con fuentes convencionales que afectan el ambiente.

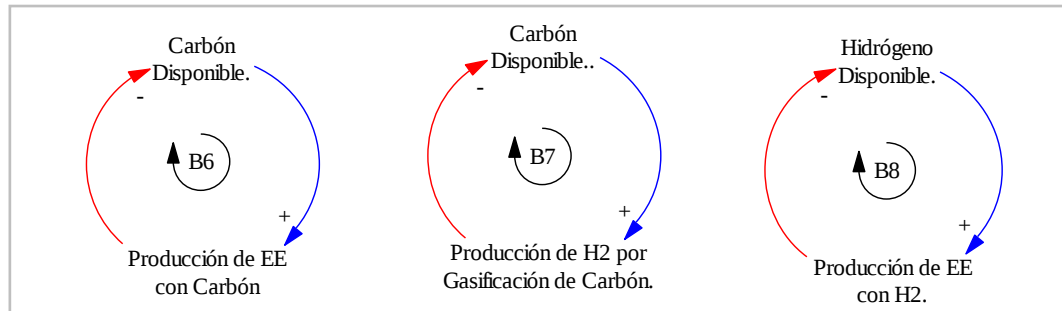
Figura 11. Bucles de realimentación – Consumo de agua y Producción de EE con Plantas Térmicas y con Carbón



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 12, se observan 3 bucles de compensación (B6, B7, y B8) que se dan debido al uso de unos recursos disponibles como es el Carbón y el Hidrógeno. A mayor disponibilidad de estos recursos, se pueden llevar a cabo más procesos a partir de estos, y al hacer uso de estos recursos, habrá menos disponibilidad de los mismos.

Figura 12. Bucles de realimentación – Carbón e Hidrógeno Disponible vs. Procesos de producción

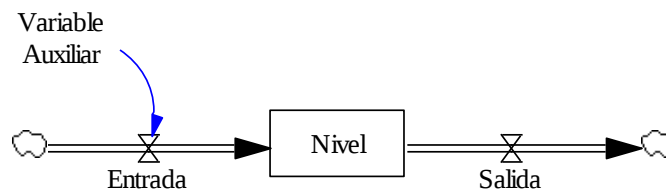


Fuente: Elaboración propia

2.2 Formulación del modelo

La formulación del modelo consiste en desarrollar un diagrama de flujo o de Forrester a partir del diagrama causal. Este diagrama representa el sistema en términos de inventarios y flujos y permite tener una estructura física del sistema para ser simulado teniendo en cuenta su comportamiento dinámico mediante ecuaciones diferenciales. Las variables utilizadas en este diagrama son variables de nivel, de flujo (de entrada, o salida) y variables auxiliares. La representación gráfica de estas variables principales en el software Vensim se observa en la Figura 13.

Figura 13. Principales variables Diagrama de Flujo - Vensim



Fuente: Elaboración propia

En la ecuación (1) se presenta la relación principal entre las variables de nivel y de flujo.

$$Nivel(t) = \int_{t_0}^t [Entrada(s) - Salida(s) + Nivel(t_0)] \quad (1)$$

Este diagrama se construye entonces a partir de las variables y las relaciones encontradas en el paso anterior que ahora proceden a ser formuladas y adicionalmente, se asignan valores a los parámetros requeridos. El diagrama de Forrester o de flujo del presente trabajo se ha dividido en tres secciones para su mejor comprensión y visualización: 'Demanda y generación de Energía Eléctrica', 'Producción y distribución de Carbón e Hidrógeno' e 'Indicadores ambientales' (Emisiones de CO₂ y Consumo de energía).

Diagramas de Flujo

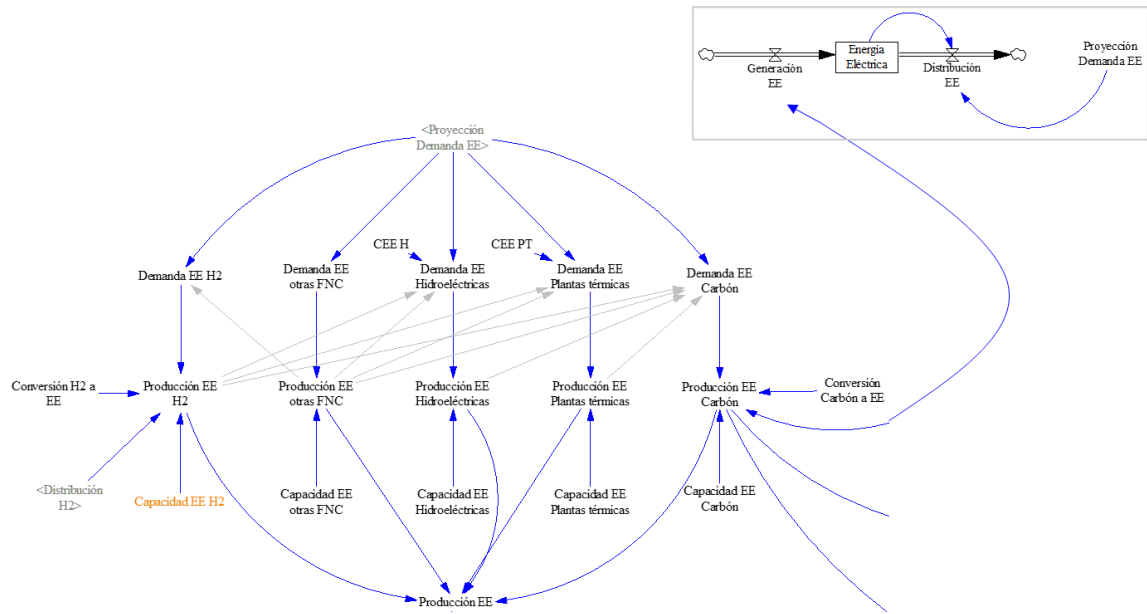
Demanda y generación de Energía Eléctrica

En la Figura 14 se presenta la sección del modelo en la cual se proyecta la demanda de energía eléctrica y la producción de esta por medio de las diferentes tecnologías activas en Colombia para su satisfacción. Se recuerda que la demanda de energía en Colombia primeramente es cubierta por medio de fuentes no convencionales como solar y eólica, seguidamente se asume que procedería a ser cubierta por la energía generada con hidrógeno, luego el restante y la mayor parte de esta demanda es cubierta por fuentes hidroeléctricas y finalmente por fuentes térmicas (como gas y diésel) y carbón.

Producción y distribución de Carbón e Hidrógeno

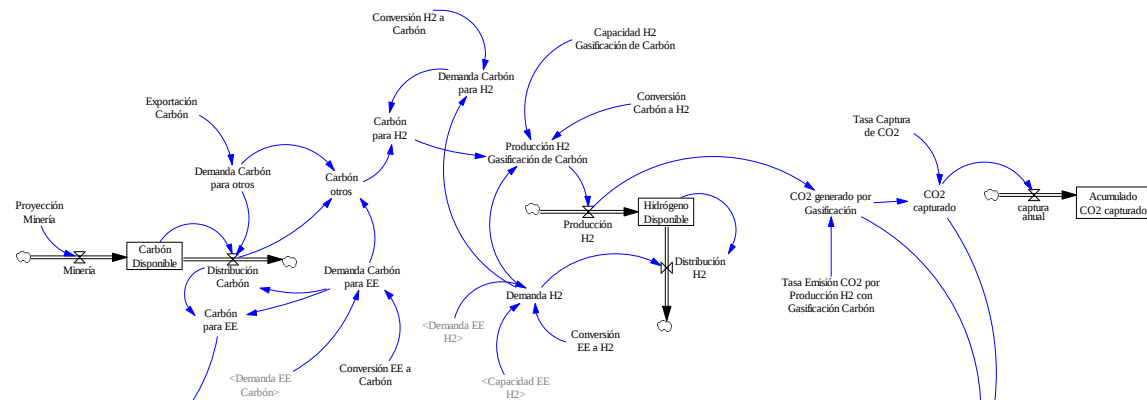
En la Figura 15 se muestra otra sección del modelo que corresponde a la producción de carbón y su distribución, así como a la producción y distribución de Hidrógeno. En el proceso de producción de hidrógeno por medio de gasificación de carbón, se generan unas emisiones de CO₂ que permiten dar lugar al proceso de captura de estas, uno de los puntos de análisis del presente trabajo.

Figura 14. Diagrama de Flujo – Demanda y generación de Energía Eléctrica



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Diagrama de Flujo – Producción y distribución de Carbón e Hidrógeno



Fuente: Elaboración propia

Indicadores ambientales

Luego de tener la estructura principal del modelo, se proceden a agregar los indicadores relevantes para el análisis de los efectos ambientales del desarrollo de todos los procesos involucrados en el sistema en el tiempo. Como indicador principal se tienen las emisiones de CO2 que se generan en los procesos. Este

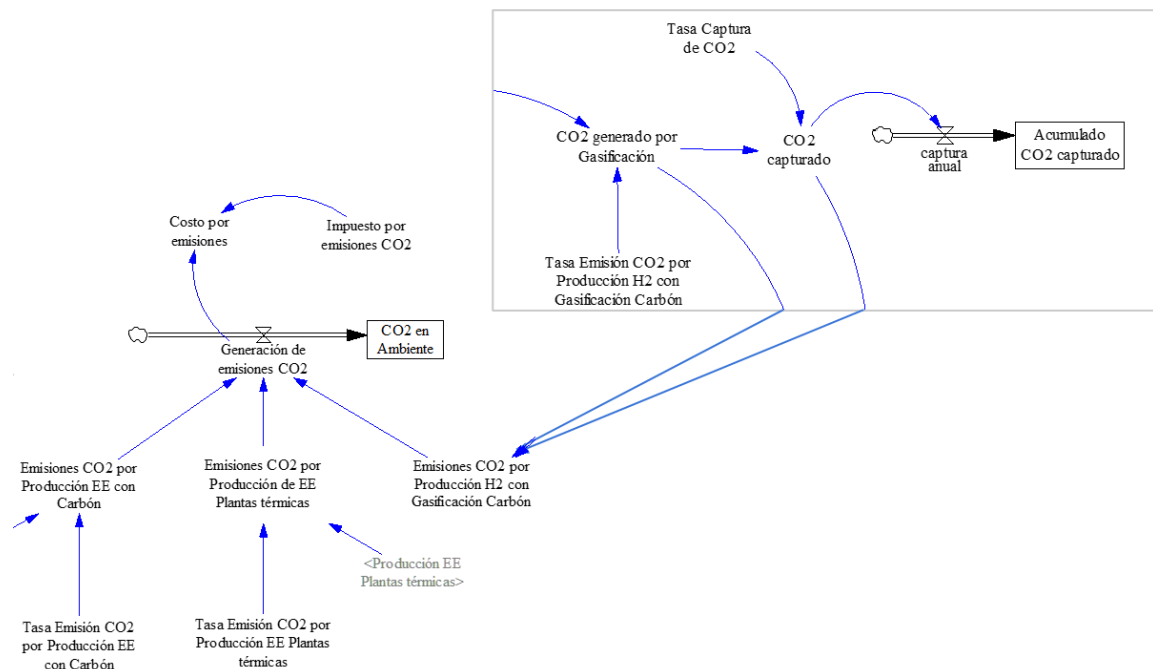
indicador es el que mayor relevancia y atención ha adquirido al pasar del tiempo debido a sus efectos negativos en el ambiente tal y como se mostró en el planteamiento del problema.

Seguido a este, se tiene un segundo indicador ambiental que refleja el consumo de agua de los procesos y puntualmente pretende servir como base para realizar una comparación entre el consumo de este recurso en la generación de energía por medio de combustión de carbón y la generación de hidrógeno como vector energético.

Emisiones de CO2. En varios de los procesos de producción analizados en el modelo se tienen unos niveles de emisiones de CO2. En la Figura 16 se muestra la sección del modelo que contiene estas principales emisiones en el sistema, alimentando una cantidad de CO2 en el ambiente, principal indicador del trabajo.

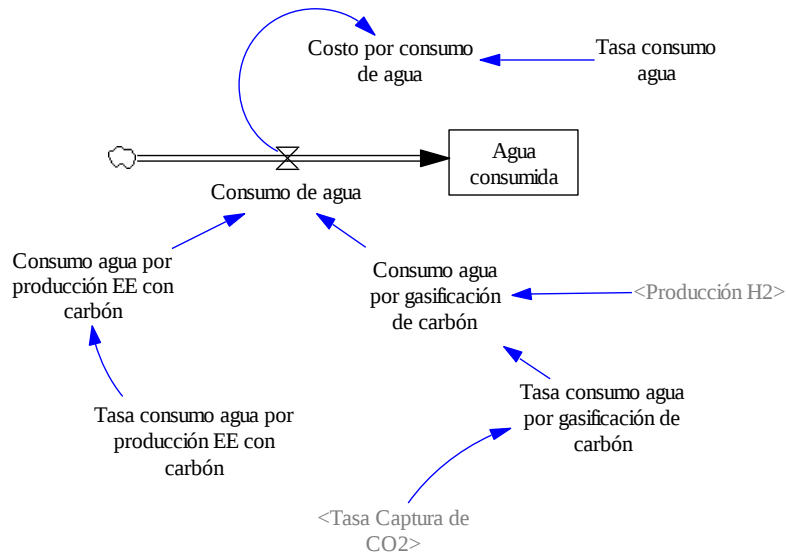
Consumo de agua. Adicionalmente, en los procesos se cuenta con un nivel de consumo de agua. A continuación, en la Figura 17, se presenta la sección del modelo que permite analizar el agua consumida por la utilización de carbón en sus dos rutas analizadas en el trabajo, por una parte, en la generación de energía por combustión y por otra en la generación de hidrógeno como vector energético por medio de gasificación de carbón.

Figura 16. Diagrama de Flujo – Emisiones de CO2



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Diagrama de Flujo – Consumo de agua



Fuente: Elaboración propia

Cuantificación del modelo

Para la cuantificación del modelo se utilizaron fuentes de datos principalmente nacionales para la demanda de energía eléctrica, proyección de la capacidad de las tecnologías actuales y la conversión de algunos parámetros. Además, fue necesario consultar fuentes externas referentes tanto al proceso de gasificación de carbón para la producción de hidrógeno, como para el proceso de generación de energía con el hidrógeno. Esto debido a que son tecnologías que no se han desarrollado al interior del país.

En las Tablas 2-5 se presentan las variables de nivel principales, las variables de flujo, las variables auxiliares con requerimiento de datos externos y las variables auxiliares que apoyan el modelo mediante ecuaciones. En la Tabla 3 se presentan además las referencias de los datos utilizados. Algunas de las variables fueron abreviadas por temas de espacio en el presente documento (Dem: demanda; Pn: producción; Distr: distribución).

Tabla 2. Variables de Nivel Principales

Variables de Nivel	Unidades	Ecuación	Valor Inicial
Energía Eléctrica	[GWh]	<i>Generación EE-Distribución EE</i>	76327.1
Carbón Disponible	[Ton]	<i>Minería-Distribución Carbón</i>	8.94+07
Hidrógeno Disponible	[Ton]	<i>Producción H2-Distribución H2</i>	0
CO2 en Ambiente	[Ton]	<i>Generación de emisiones CO2</i>	0
Acumulado CO2 capturado	[Ton]	<i>Captura anual</i>	0
Agua consumida	[m3]	<i>Consumo de agua</i>	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Variables de flujo

Variables de Flujo	Unidades	Ecuación
Generación EE	[GWh]	<i>Producción EE</i>
Distribución EE	[GWh]	<i>MIN(Energía Eléctrica, Proyección Demanda EE)</i>
Minería	[Ton]	<i>Proyección Minería</i>
Distribución Carbón	[Ton]	<i>MIN(Carbón Disponible, Dem Carbón para EE + Dem Carbón para otros)</i>
Producción H2	[Ton]	<i>Producción H2 Gasificación de Carbón</i>
Distribución H2	[Ton]	<i>MIN(Hidrógeno Disponible, Demanda H2)</i>
Captura anual	[Ton]	<i>CO2 capturado</i>
Generación de emisiones CO2	[Ton]	<i>Emisiones CO2 por PN EE Plantas térmicas + Emisiones CO2 por PN EE Carbón + Emisiones CO2 por PN H2 con Gasificación Carbón</i>
Consumo de agua	[m3]	<i>Consumo agua por gasificación de carbón + Consumo agua por pn EE con carbón</i>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Variables auxiliares (Datos)

Variables Auxiliares (Datos)	Unidades	Ecuación	Fuente
Proyección Demanda EE	[GWh]	<i>:=GET XLS DATA</i>	(UPME, 2019c), (UPME, 2020)
CEE H (cubrimiento de energía eléctrica)	%	<i>0.7409</i>	(IEA, 2021)
CEE PT (cubrimiento de energía eléctrica)	%	<i>0.174</i>	(IEA, 2021)
Capacidad EE otras FNC	[GWh]	<i>:=GET XLS DATA</i>	(ACOLGEN, 2021), (GeoLCOE, 2021)
Capacidad EE H2*	[GWh]	<i>0</i>	(ACOLGEN, 2021), (GeoLCOE, 2021)
Capacidad EE Hidroeléctricas	[GWh]	<i>:=GET XLS DATA</i>	(ACOLGEN, 2021), (GeoLCOE, 2021)
Capacidad EE Plantas Térmicas	[GWh]	<i>:=GET XLS DATA</i>	(ACOLGEN, 2021), (GeoLCOE, 2021)
Capacidad EE Carbón	[GWh]	<i>:=GET XLS DATA</i>	(ACOLGEN, 2021), (GeoLCOE, 2021)
Conversión H2 a EE	[GWh/Ton H2]	<i>1/83.79888</i>	(Verma, Olateju, Kumar, et al., 2015)

Variables Auxiliares (Datos)	Unidades	Ecuación	Fuente
Conversión EE a H2	[Ton H2/GWh]	83,79888	(Verma, Olateju, Kumar, et al., 2015)
Conversión Carbón a EE	[GWh/Ton]	1/349.64763	(UPME, 2018), (Kumar et al., 2019)
Conversión EE a Carbón	[Ton/GWh]	34.964.763,00000	(UPME, 2018), (Kumar et al., 2019)
Conversión Carbón a H2	[Ton H2/Ton]	1/7.33	(Burmistrz et al., 2016)
Conversión H2 a Carbón	[Ton/Ton H2]	7.33	(Burmistrz et al., 2016)
Proyección Minería	[Ton]	:=GET XLS DATA	(UPME, 2019b)
Exportación de Carbón	[Ton]	:=GET XLS DATA	(UPME, 2019a)
Capacidad H2 Gasificación de Carbón*	[Ton]	0	(Laborde et al., 2010)
Tasa Captura de CO2*	%	0	(Verma, Olateju, Kumar, et al., 2015), (Morante et al., 2020)
Tasa Emisión CO2 por pn H2 con Gasif de Carbón	[Ton CO2/Ton H2]	19,424	(Verma, Olateju, Kumar, et al., 2015)
Tasa Emisión CO2 por pn EE con Carbón	[Ton CO2/Gwh]	88.629.032	(UPME, 2018)
Tasa Emisión CO2 por pn EE Plantas Térmicas	[Ton CO2/Gwh]	66.471.774	(UPME, 2018)
Tasa consumo agua por pn EE con carbón	[m3/GWh]	47.2	(Benítez-Cortéz et al., 2021)
Tasa consumo agua por gasificación de carbón	[m3/Ton H2]	(10.524*Tasa Captura de CO2)+3.2665	(Cormos, 2012)
Impuesto por emisiones CO2	[\$/Ton]	17660	(Calendario Tributario, 2021)
Tarifa consumo agua	[\$/m3]	13.76	(MINAMBIENTE, 2022)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Variables auxiliares (Ecuaciones)

Variables Auxiliares	Unidades	Ecuación
Demanda EE otras FNC	[GWh]	<i>Proyección Demanda EE*CEE FNC</i>
Demanda EE H2	[GWh]	<i>Proyección Demanda EE-Producción EE otras FNC</i>
Demanda EE Hidroeléctricas	[GWh]	<i>(Proyección Demanda EE-Producción EE otras FNC-Producción EE H2)*CEE H</i>
Demanda EE Plantas Térmicas	[GWh]	<i>(Proyección Demanda EE-Producción EE otras FNC-Producción EE H2)*CEE PT</i>
Demanda EE Carbón	[GWh]	<i>Proyección Demanda EE-Producción EE otras FNC-Producción EE H2-Producción EE Hidroeléctricas-Producción EE Plantas térmicas</i>
Producción EE	[GWh]	<i>Pn EE H2+Pn EE otras FNC+Pn EE Hidroeléctricas+Pn EE Plantas térm+Pn EE Carbón</i>
Producción EE otras FNC	[GWh]	<i>MIN(Capacidad EE otras FNC, Demanda EE otras FNC)</i>
Producción EE H2	[GWh]	<i>MIN(Capacidad EE H2, MIN(Demanda EE H2, Distribución H2*Conversión H2 a EE))</i>
Producción EE Hidroeléctricas	[GWh]	<i>MIN(Capacidad EE Hidroeléctricas, Demanda EE Hidroeléctricas)</i>
Producción EE Plantas Térmicas	[GWh]	<i>MIN(Capacidad EE Plantas térmicas, Demanda EE Plantas térmicas)</i>
Producción EE Carbón	[GWh]	<i>MIN(Capacidad EE Carbón, MIN(Demanda EE Carbón, Carbón para EE*Conversión Carbón a EE))</i>
Demanda Carbón otros	[Ton]	<i>Exportación Carbón</i>
Demanda Carbón para EE	[Ton]	<i>Demanda EE Carbón*Conversión EE a Carbón</i>

Variables Auxiliares	Unidades	Ecuación
Carbón otros	[Ton]	<i>IF THEN ELSE(Distr Carbón>=(Dem Carbón para EE+Dem Carbón para otros), Dem Carbón para otros, IF THEN ELSE(Distr Carbón>=Dem Carbón para EE, Distr Carbón-Dem Carbón para EE, 0))</i>
Carbón para EE	[Ton]	<i>MIN(Distribución Carbón, Demanda Carbón para EE)</i>
Carbón para H2	[Ton]	<i>MIN(Carbón otros, Demanda Carbón para H2)</i>
Demanda Carbón para H2	[Ton]	<i>Demanda H2*Conversión H2 a Carbón</i>
Demanda H2	[Ton]	<i>Demanda EE H2*Conversión EE a H2</i>
Producción H2 Gasificación de Carbón	[Ton]	<i>MIN(Capacidad H2 Gasif de Carbón, MIN(Dem H2, Carbón para H2*Conversión Carbón a H2))</i>
CO2 generado por Gasificación	[Ton]	<i>Producción H2*Tasa Emisión CO2 por Producción H2 con Gasificación Carbón</i>
CO2 capturado	[Ton]	<i>CO2 generado por Gasificación*Tasa Captura de CO2</i>
Emisiones CO2 por Producción H2 con Gasif Carbón	[Ton]	<i>CO2 generado por Gasificación-CO2 capturado</i>
Emisiones CO2 por Producción EE con Carbón	[Ton]	<i>Producción EE Carbón*Tasa Emisión CO2 por Producción EE con Carbón</i>
Emisiones CO2 por Producción de EE PT	[Ton]	<i>Producción EE Plantas térmicas*Tasa Emisión CO2 por Producción EE Plantas térmicas</i>
Costo por emisiones	[\$]	<i>Generación de emisiones CO2*Impuesto por emisiones CO2</i>
Consumo agua por pn EE con carbón	[m3]	<i>Pn EE Carbón*Tasa consumo agua por pn EE con carbón</i>
Consumo agua por gasificación de carbón	[m3]	<i>Pn H2*Tasa consumo agua por gasificación de carbón</i>
Costo consumo de agua	[\$]	<i>Consumo de agua*Tarifa consumo agua</i>

Fuente: Elaboración propia

2.3 Validación del Modelo

Un modelo siempre comprenderá menos que el sistema que representa, por esta razón, se dice que ningún modelo es 100% preciso o válido. La dinámica de sistemas, sin embargo, no busca encontrar valores o resultados específicos de las variables de un sistema, sino más bien conocer y entender su comportamiento (Bala et al., 2017).

En este sentido, luego de haber cuantificado el modelo y con el propósito de verificar la validez de sus resultados se realizaron test estructurales y de comportamiento. Primeramente, en cuanto a estructura, se validó la consistencia de las unidades de cada una de las variables en el modelo. Esto se realizó asignando la unidad de medida a cada variable dentro del modelo, así como fuera del mismo (en Excel), con esto se validó que las unidades resultantes de las ecuaciones existentes dentro del modelo fueran congruentes. Las unidades para cada una de las variables se encuentran en las Tablas 2 a 5.

Por otra parte, los datos del modelo fueron soportados en fuentes diversas pero consistentes en su contexto. Estos vienen principalmente de fuentes

gubernamentales y principales organizaciones en el análisis de datos de generación de energía. Estas fuentes se encuentran en la Tabla 4. Lo anterior permite tener una confianza de los datos de entrada del modelo.

Adicionalmente, para la validación del comportamiento del modelo, se realizaron corridas de prueba en las que se variaron parámetros importantes con valores extremos con los cuales se esperaba un determinado comportamiento inmediato de algunas variables. Como ejemplo, se establece un parámetro importante del modelo como lo es la producción/suministro de carbón a 0 como mínimo extremo, y se procede a ver su efecto en la simulación. Con este cambio se observa que efectivamente no habría producción de energía eléctrica con este recurso, ni generación de hidrógeno en este caso, debido a que sería su principal insumo.

De la misma manera se realizan simulaciones de prueba en las que se varían otros parámetros tales como las capacidades de generación tanto de hidrógeno como de energía eléctrica y se procede a analizar la posterior producción de las distintas tecnologías, dado que dichas capacidades la deben restringir. Después de las pruebas realizadas, fue posible ajustar algunas restricciones dentro del modelo para asegurar estos comportamientos inmediatos dentro de algunos procesos y finalmente, se evidenció un comportamiento del modelo acorde al sistema real.

Adicionalmente, utilizando datos de referencia históricos, se realizaron corridas y se compararon los resultados con los datos disponibles actuales y/o proyectados. Finalmente, se encuentra congruencia y coherencia en los resultados que el modelo arroja y su tendencia, evidenciando que estos son cercanos a los datos reales disponibles.

3. ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES EFECTOS AMBIENTALES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA CON HIDRÓGENO

El tercer capítulo aborda el tercer objetivo específico propuesto en el trabajo: Analizar mediante escenarios de simulación, los principales efectos ambientales a largo plazo que tendría la implementación de la nueva alternativa de generación de energía planteada dentro del sistema energético, considerando sus posibles efectos económicos.

Este se enmarca en el enfoque metodológico correspondiente a la explotación del modelo planteado y análisis de los resultados. Una vez que el modelo se encuentra terminado y validado, se procede a plantear los diferentes escenarios de simulación que permitan reconocer el comportamiento de los indicadores ambientales

considerados, emisiones de CO₂ y consumo de agua, tanto de los procesos actuales de generación de energía dentro del sistema energético, como las que se generarían con la implementación del proceso de gasificación de carbón. Adicionalmente, se busca analizar de qué manera puede influir el proceso de captura de CO₂ en el análisis.

Antes de proceder con la definición de escenarios, cabe señalar algunos parámetros importantes que se consideraron en el modelo. En la Tabla 6 se muestran los parámetros fijos de factor de planta de las distintas tecnologías, así como los factores de cubrimiento de la demanda de energía por cada una.

Tabla 6. Parámetros fijos

Tecnología de generación de energía eléctrica	Factor de Planta	Cubrimiento de demanda
FNC	37,3%	<i>Total capacidad</i>
Hídrica	64,54%	75,2%
Térmica	54,7%	17,7%
Carbón	51,1%	<i>Demanda restante</i>

Fuente: Elaboración propia

3.1 Definición de escenarios de simulación

A continuación, se describirán las consideraciones para crear cada escenario. Luego, en la Tabla 7, se puede observar un resumen de los parámetros utilizados en cada uno de ellos.

Escenario Base. Este escenario representa la situación actual de generación de energía en Colombia en donde aún no se produce hidrógeno. Por lo tanto, los parámetros iniciales para la capacidad de producción de hidrógeno por gasificación, como la generación de energía eléctrica con hidrógeno son 0. Así mismo la tasa de captura tampoco se activa en este primer escenario.

Escenario Bajo – Cmin. Para este escenario se tiene en cuenta la producción de hidrógeno y la generación de energía eléctrica a partir de este recurso. Teniendo en cuenta que este último proceso se realizaría por medio de turbinas de gas, se considera establecer la capacidad de generación como un porcentaje de la capacidad de las plantas térmicas (sin contar el carbón), que se asemeje a la capacidad actual instalada de fuentes renovables. Como su nombre lo indica se estiman valores bajos tanto de producción de hidrógeno, como de generación de energía a partir de este recurso. Adicionalmente, “Cmin” significa que se tiene en cuenta un nivel de captura de CO₂ mínimo en el proceso de gasificación de carbón.

Este nivel de captura mínimo es establecido con base en [13] donde se determina el máximo de emisiones de CO₂ del proceso de generación de hidrógeno para que este sea catalogado como azul, el cual se define como: “el hidrógeno generado de fuentes no renovables que emite menos de 4,37 kgCO₂eq/kgH₂”. De esta manera, conociendo las emisiones por kg H₂ en el proceso, se tiene un requerimiento de captura del 0,775.

Escenario Bajo – CM. Este escenario tiene las mismas condiciones que el anterior (Escenario Bajo - Cmin), sin embargo, se incrementa la tasa de captura al máximo posible encontrado en la literatura, este es de 0,99.

Escenario Alto – Cmin. En este escenario, la capacidad de generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno se aumenta en porcentaje, de manera que cubra un 50% de la capacidad con la que cuentan las plantas térmicas actualmente. Esto indica también que, con esta capacidad de generación de energía con hidrógeno, se cubriría aproximadamente lo que cubre el carbón en el sistema energético actual. De la misma forma que el Escenario Bajo – Cmin, se tuvo en cuenta un nivel de captura de CO₂ mínimo.

Escenario Alto – CM. Este escenario tiene las mismas condiciones que el anterior (Escenario Alto - Cm) y se considera una tasa de captura máxima.

Tabla 7. Resumen de Escenarios

Escenarios & Tecnologías	Capacidad instalada [MW]	Factor de Planta	Capacidad efectiva [MW]	Energía al año [GWh]	Capacidad instalada [Ton H ₂]	Tasa Captura CO ₂
Escenario Base						
Energía con Hidrógeno	0,00	0,0%	0,00	0,00		
Gasificación de carbón					0,00	0,00
Escenario Bajo - Cmin						
Energía con Hidrógeno	370,02	54,7%	202,30	1.772,16		
Gasificación de carbón					163.355,53	0,78
Escenario Bajo - CM						
Energía con Hidrógeno	370,02	54,7%	202,30	1.772,16		
Gasificación de carbón					163.355,53	0,99
Escenario Alto - Cmin						
Energía con Hidrógeno	1.850,12	54,7%	1.011,51	8.860,80		
Gasificación de carbón					816.777,66	0,78
Escenario Alto - CM						
Energía con Hidrógeno	1.850,12	54,7%	1.011,51	8.860,80		
Gasificación de carbón					816.777,66	0,99

Fuente: Elaboración propia

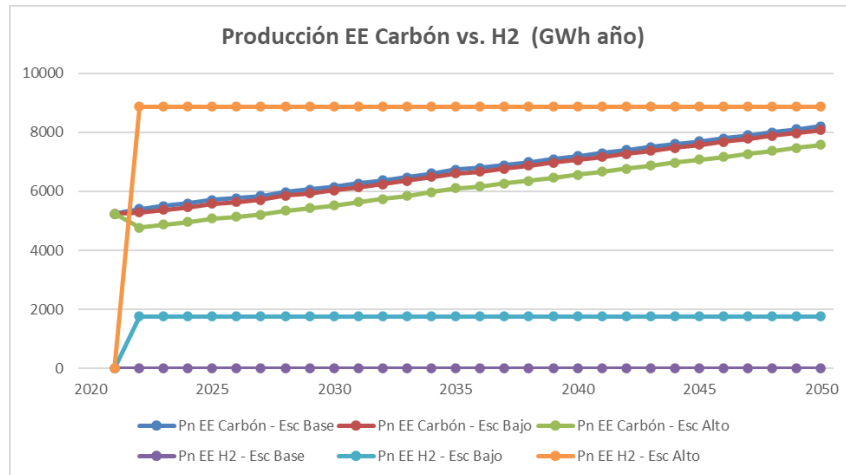
3.2 Explotación del modelo y análisis de resultados

En esta sección se procede a presentar los resultados de la simulación. Para ello se dividirá el análisis por secciones empezando por la producción de energía eléctrica con Carbón vs. Hidrógeno, los indicadores ambientales definidos, emisiones de CO₂ y consumo de agua y finalmente se analizarán los resultados relacionados con los costos asociados a cada uno de estos indicadores ambientales.

Producción de Energía Eléctrica con Carbón vs. H₂

La Figura 18 permite apreciar cómo sería la producción de energía eléctrica tradicional con carbón frente a la nueva alternativa planteada de hidrógeno para cada uno de los escenarios. Se observa que, a mayor participación de la nueva tecnología, se da una menor generación de energía con carbón de manera convencional, puesto que el carbón sería redireccionado hacia la nueva alternativa. Esto indica un reemplazo en el uso del recurso de la tecnología convencional a la nueva.

Figura 18. Producción EE con Carbón vs. H₂ – Escenarios Base – Bajo – Alto



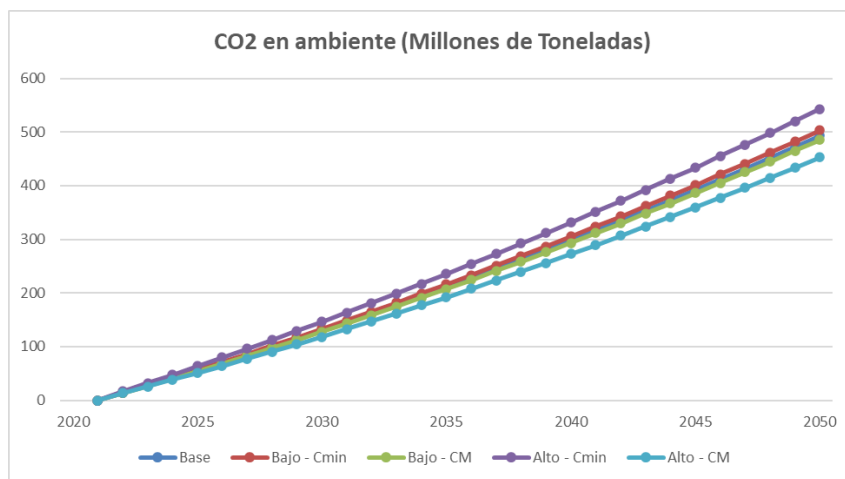
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, se observa que la producción de energía utilizando carbón de manera convencional, no varía significativamente entre los distintos escenarios. Esto puede deberse a que en el modelo se consideran unos porcentajes de participación de las distintas fuentes de generación que en el periodo estudiado no sufren una gran variación.

Emisiones CO2

En la Figura 19 se observa el nivel de CO2 emitido y acumulado cada año en la matriz energética para cada uno de los escenarios considerados. La escala presentada en el eje vertical corresponde a Millones de Toneladas.

Figura 19. Emisiones CO2 - Todos los Escenarios



Fuente: Elaboración propia

Se observa que el comportamiento de las emisiones está condicionado principalmente por el nivel de captura de CO2 de los escenarios. Las emisiones de los escenarios bajo y alto con una baja captura de CO2 se encuentran por arriba del escenario base, mientras que las emisiones generadas en los escenarios que cuentan con una mayor captura efectivamente se encuentran por debajo. Si bien, en el gráfico no se logra observar, una diferencia significativa entre escenarios, se debe tener en cuenta que la escala tratada corresponde a millones de toneladas, lo cual desde los escenarios Bajo – CM y Alto – CM puede representar un gran ahorro de emisiones.

Este ahorro puede ejemplificarse mediante equivalentes cotidianos. En el escenario Bajo – CM donde se tiene un nivel de producción mínimo de hidrógeno y energía con este nuevo recurso, y adicionalmente considerando un nivel de captura de CO2 máximo (de 99%), en comparación con el escenario base, se estarían dejando de emitir anualmente aproximadamente 0,3 Ton de CO2. Lo anterior equivale a las emisiones generadas por el consumo eléctrico de 52.955 viviendas al año, 58.641 vehículos a gasolina conducidos durante un año, así como a las emisiones evitadas por 74 turbinas eólicas al año o capturadas por 1.303 Km2 de bosque en un año (Environmental Protection Agency, 2022).

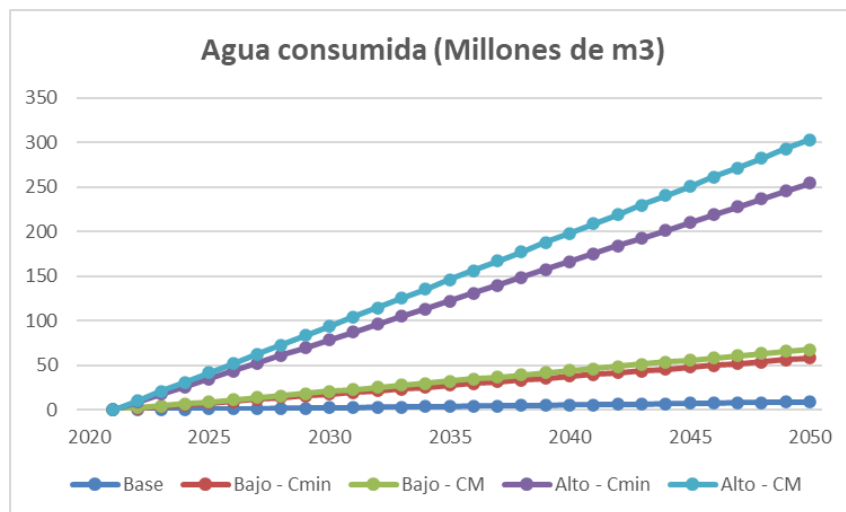
Sin embargo, lo anterior también indica que independientemente del nivel de producción que se tenga con la nueva alternativa estudiada, es totalmente relevante garantizar un nivel alto o máximo de captura de las emisiones de CO₂ en el proceso para poder considerarlo beneficioso a mediano o largo plazo en comparación con las tecnologías convencionales.

Se recuerda que el proceso de gasificación de carbón estudiado sigue siendo un gran generador de emisiones, y si no se cuenta con un proceso de captura eficiente, o aún, como se puede observar, capturando tan sólo el mínimo de emisiones legalmente establecido, será un proceso que no ofrezca beneficios dentro de la matriz energética.

Agua consumida

En la Figura 20 se observa el nivel de agua consumida y acumulada cada año en la matriz energética para cada uno de los escenarios considerados. La escala presentada en el eje vertical corresponde a Millones de m³.

Figura 20. Agua consumida - Todos los Escenarios



Fuente: Elaboración propia

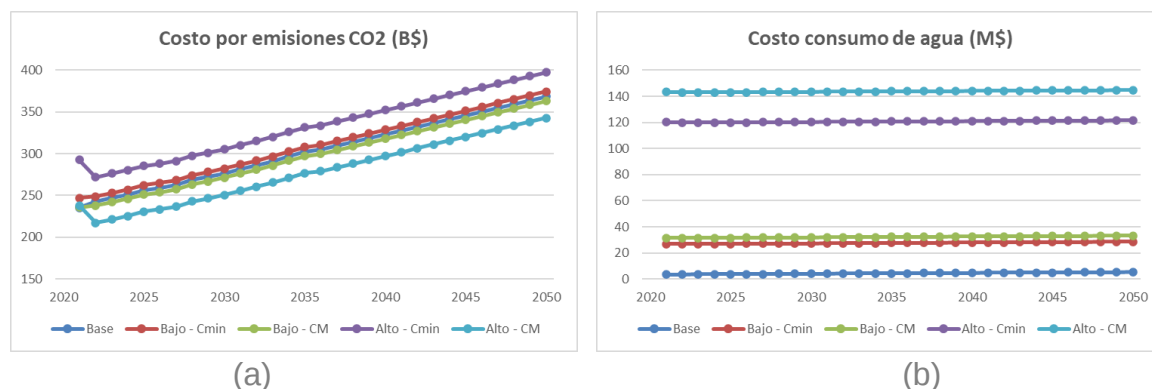
Para este indicador se observa que el nivel de consumo de agua depende principalmente del nivel de producción de la nueva tecnología, pero también del nivel de captura y en esta ocasión cada uno de los escenarios difiere considerablemente del escenario base.

Esta diferencia notable en el consumo de agua se debe a que el proceso de gasificación de carbón es un proceso complejo, que cuenta con diversas fases en donde se tiene un requerimiento considerable de agua. Adicionalmente, al ir acompañado de un proceso de captura de CO₂, aumenta su complejidad y su requerimiento en recursos de todo tipo, desde energía misma, agua, vapor, calor, entre otros. Esto, finalmente, también se verá reflejado en requerimientos económicos.

Costo por emisiones y consumo de agua

En la Figura 21 se observan dos gráficas, en la (a) se presentan los costos que se tendrían por las emisiones de CO₂ en los escenarios analizados y en la (b) se tienen los costos del consumo de agua. Se tiene en cuenta que en la primera gráfica los valores están dados en Billones de pesos al año, mientras que en la segunda gráfica se tratan Millones de pesos al año.

Figura 21. Costos por emisiones y consumo de agua



Fuente: Elaboración propia

Un primer análisis que se puede realizar es que el costo por penalización por generación de emisiones en los procesos de generación de energía analizados es mucho más alto que el costo del consumo de un recurso natural como es el agua.

Al igual como se analizaba en la gráfica de emisiones de CO₂ y teniendo en cuenta que los costos son proporcionales a la emisión al ambiente de este contaminante, se tiene que, a niveles menores de captura, se tendrán más altos costos debido a la penalización por emisión. Mientras que en los escenarios que se tiene un nivel de captura mayor (en este caso del 0,99), los costos por emisiones resultan ser menores que los que se tienen en el escenario base o actual de la matriz energética.

Aquí se abre un punto de interés para investigación relacionado con la posible comparación de costos de sostenimiento y operación que implicarían la nueva tecnología dentro del sistema energético en el contexto nacional. Esto incluiría todos los costos desde el proceso de gasificación de carbón para la generación de hidrógeno, hasta la generación de energía con este hidrógeno mediante turbinas de gas.

Por su parte, en la segunda gráfica, el comportamiento casi constante que se observa se debe a que en el modelo se incorporó una capacidad de generación de energía con hidrógeno constante durante todos los años. La creciente y leve tendencia aquí es el consumo de agua por generación de energía convencional tal cual se ve en el escenario base y esto se debe a que viene condicionada por la misma demanda de energía.

4. CONCLUSIONES

En el diagrama causal se observó que existe una interrelación entre la generación de emisiones de CO₂ al ambiente y el incentivo hacia la inversión en nuevas tecnologías de generación de energía, pero además se sabe que estos sucesos pueden tardar un tiempo en dar sus efectos. Por esta razón, se reconoce la importancia de conocer los posibles panoramas del sector a largo plazo de manera que se puedan apresurar estrategias que permitan hacer frente a las problemáticas futuras relacionadas con la expansión del portafolio energético y la mitigación de emisiones desde el sector.

El proceso de gasificación de carbón analizado en este trabajo puede ser visto como una alternativa de aprovechamiento de este recurso, en donde este pasa por un proceso en el que las emisiones nocivas al ambiente pueden ser controladas y capturadas, pudiendo obtener al final un vector energético puro como es el hidrógeno, además de un dióxido de carbono capturado y almacenado para su posible aprovechamiento o propia disposición. A diferencia del proceso de combustión, el proceso de gasificación permitiría generar o preparar el hidrógeno, el cual contiene un mayor poder calorífico y potencia de energía y almacenarlo para utilizarlo tiempo después en un proceso de combustión para generación de energía eléctrica, el cual estaría libre de emisiones.

Como se menciona, en este proceso, la Captura de CO₂ se vuelve un factor determinante y fue posible reconocerlo. En primera instancia para el cumplimiento de los requerimientos del proceso para la obtención de hidrógeno azul, el cual requiere que las emisiones generadas en el proceso no se liberen al ambiente. Por otra parte, y analizando la problemática desde el ámbito normativo y económico, las emisiones liberadas tendrían efectos económicos que pueden no favorecer la implementación de la tecnología. Mientras que, si se aborda el problema desde el aprovechamiento del CO₂ capturado, esto representaría diversas alternativas, que por el contrario pueden soportar el proceso y hacerlo más viable.

En cuanto al análisis de emisiones de CO₂ de la matriz energética para cada uno de los escenarios planteados, se observa que la implementación de la nueva tecnología traería beneficios únicamente para los escenarios que cuentan con un nivel de captura de CO₂ alta. Esto debido a que el proceso de gasificación de carbón es un proceso altamente generador de CO₂, por lo que, a mayor nivel de producción de hidrógeno mediante esta tecnología, mayor generación de contaminantes y mayor requerimiento de captura de estos.

En cuanto al consumo de agua, para todos los escenarios analizados en los que se implementa la nueva tecnología, se tendría mucho mayor consumo de este recurso y por lo tanto mayores costos relacionados con este indicador. Esto se debe también a que el proceso de gasificación de carbón junto con los procesos de captura de CO₂, no son procesos convencionales, son más complejos en el sentido en que requieren más etapas en el proceso de conversión y purificación del producto y por ende más recursos de todo tipo, que puede resumirse en más requerimientos técnicos y económicos.

Mencionando el tema económico, se pueden abordar algunas ventajas. Analizando los costos por penalización por emisiones que se tendrían, los escenarios en los que se contaba con una tasa de captura alta representaron un beneficio en comparación con el escenario base o actual de la matriz energética. Esto aunado al aprovechamiento del CO₂ capturado, es un punto de interés investigativo para un futuro análisis económico de la implementación del proceso de gasificación de carbón y generación de energía con hidrógeno en el país.

El presente trabajo abordó el problema principalmente desde una perspectiva ambiental, considerando dos indicadores más relevantes dentro de los procesos estudiados como lo son la generación de emisiones de CO₂ como el consumo de agua. Sin embargo, dada la complejidad técnica y los altos costos que puede llegar a tener la implementación de las tecnologías estudiadas, para futuros trabajos, se requiere abordar el problema desde el ámbito económico, considerando aspectos técnicos y normativos.

REFERENCIAS

- ACOLGEN. (2021). *Capacidad instalada en Colombia*. <https://www.acolgen.org.co/>
- Aguilar, R. I. (2017). *Evaluación de alternativas para potencializar el uso de hidrógeno como vector energético* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <http://www.bdigital.unal.edu.co/56757/>
- Bala, B. K., Arshad, F. M., & Noh, K. M. (2017). *System Dynamics*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2045-2>
- Bamisile, O., Obiora, S., Huang, Q., & Yimen, N. (2021). Impact of economic development on CO2 emission in Africa; the role of BEVs and hydrogen production in renewable energy integration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(2), 2755–2773. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.134>
- Benavides, P. (2015). *Optimización de producción de hidrógeno en el water gas shift reactor de una central térmica de gasificación integrada* [Universidad Carlos III de Madrid]. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/22984/TFG_Pablo_Benavides_Lopez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Benítez-Cortéz, I., Justiz-Casas, R. L., Justiz-Esquivel, I., Prieto-Montenegro, L. F., Barreto-Torrella, S. I., & Pérez-Sánchez, A. (2021). Uso Racional del Agua en Centrales Termoeléctricas. *Producción + Limpia*, 16(2), 92–111. <https://doi.org/10.22507/pml.v16n2a5>
- Burmistrz, P., Chmielniak, T., Czepirski, L., & Gazda-Grzywacz, M. (2016). Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification. *Journal of Cleaner Production*, 139, 858–865. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.112>
- Calendario Tributario. (2021). *Impuesto Nacional al Carbono*. <https://calendariotributario.org/impuesto-al-carbono/#:~:text=El impuesto al carbono para,la quema de los combustibles>
- Cao, Y., Zhao, Y., Wen, L., Li, Y., Li, H., Wang, S., Liu, Y., Shi, Q., & Weng, J. (2019). System dynamics simulation for CO2 emission mitigation in green electric-coal supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 232, 759–773. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.029>
- CELSIA. (2019). *Documento de trabajo sobre el Sistema Interconectado Nacional, SIN*. <https://www.celsia.com/wp-content/uploads/2021/02/Documento-de-trabajo-sobre-el-Sistema-Interconectado-Nacional.pdf>
- Cormos, C.-C. (2012). Integrated assessment of IGCC power generation technology with carbon capture and storage (CCS). *Energy*, 42(1), 434–445. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.025>
- Damen, K., Troost, M. Van, Faaij, A., & Turkenburg, W. (2006). A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO2 capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32(2), 215–246. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.11.005>
- Deenapanray, P. N. K., & Bassi, A. M. (2015). System Dynamics Modelling of the

- Power Sector in Mauritius. *Environmental and Climate Technologies*, 16(1), 20–35. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2015-0010>
- Díaz, F. A. (2007). *Gasificación de carbón en Chile, para obtención de hidrógeno y electricidad en planta de ciclo combinado* [Tesis de maestría]. Universidad de Chile.
- Environmental Protection Agency, U. S. (2022). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- Feng, Y., Yang, B., Hou, Y., Duan, T.-H., Yang, L., & Wang, Y. (2021). Comparative environmental benefits of power generation from underground and surface coal gasification with carbon capture and storage. *Journal of Cleaner Production*, 310(February), 127383. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127383>
- GeoLCOE. (2021). *Costos Nivelados de Generación de Electricidad en Colombia*. <http://www.geolcoe.siel.gov.co/results/1>
- Gnanapragasam, N. V., & Rosen, M. A. (2017). A review of hydrogen production using coal, biomass and other solid fuels. *Biofuels*, 8(6), 725–745. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1302662>
- Grupo Bancolombia. (2019). *Panorama energético de Colombia*. <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/especiales/especial-energia-2019/panomara-energetico-colombia>
- Hydrogen Council. (2020). *Path to hydrogen competitiveness: a cost perspective*. https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf
- IEA. (2018). *Electricity final consumption by sector, Colombia 1990-2018*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>
- IEA. (2021). *Electricity generation by source*. <https://www.iea.org/countries/colombia>
- Ingeniería y Construcciones SAS. (2021). *¿Sabes qué son las ZNI y cuáles son sus características?* <https://www.hgingenieria.com.co/sabes-que-son-las-zni-y-cuales-son-sus-caracteristicas/>
- Jiménez-García, F. N., Restrepo-Franco, A. M., & Mulcúe-Nieto, L. F. (2019). Estado de la investigación en energía en Colombia: una mirada desde los grupos de investigación. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(52), 9–26. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9651>
- Keçebaş, A., & Kayfeci, M. (2019). Hydrogen properties. In F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, & D. B. T.-S. H. P. Ferrero (Eds.), *Solar Hydrogen Production* (pp. 3–29). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00001-1>
- Kovač, A., Paranos, M., & Marciuš, D. (2021). Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10016–10035. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>
- Kumar, R., Jilte, R., Ahmadi, M. H., & Kaushal, R. (2019). A simulation model for thermal performance prediction of a coal-fired power plant. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14(2), 122–134. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cty059>

- Laborde, M. A., Lombardo, E. A., Noronha, F. B., Boaventura Filho, J. S., García, J. L., & González, M. P. (2010). Potencialidades del hidrogeno como vector de energia en Iberoamérica. In *Buenos Aires: Ediciones CYTED*. CYTED. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/109688>
- Laimon, M., Mai, T., Goh, S., & Yusaf, T. (2020). Energy sector development: System dynamics analysis. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/app10010134>
- Liu, H., & Liu, S. (2021). Life cycle energy consumption and GHG emissions of hydrogen production from underground coal gasification in comparison with surface coal gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(14), 9630–9643. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.096>
- Mandal, R., Maity, T., Chaulya, S. K., & Prasad, G. M. (2020). Laboratory investigation on underground coal gasification technique with real-time analysis. *Fuel*, 275(April), 117865. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117865>
- Mehmeti, A., Angelis-Dimakis, A., Arampatzis, G., McPhail, S., & Ulgiati, S. (2018). Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments*, 5(24), 1–19. <https://doi.org/10.3390/environments5020024>
- MINAMBIENTE. (2022). *Tarifa mínima utilización de agua*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/2.-Tarifa-Minima-Tasa-por-Utilizacion-de-Aguas-ONVS.pdf>
- MINCIENCIAS. (2020). *Convocatoria energía sostenible y su aporte a la planeación minero energética*. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_1_-_descripcion_lineas_tematicas_0.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo Minero con Horizonte a 2025*. 174. www.upme.gov.co
- Ministerio de Minas y Energía. (2019). *Guía para la incorporación de la dimensión minero energética en los planes de ordenamiento departamental*. https://www.upme.gov.co/CursoCajaHerramientas/guias/guia_departamental_upme.pdf
- Momodu, A. S., & Kivuti-Bitok, L. (2018). System dynamic modelling of electricity planning and climate change in West Africa. *AAS Open Research*, 1, 15. <https://doi.org/10.12688/aasopenres.12852.2>
- Morante, J. R., Andreu, T., García, G., Guiler, J., Tarancón, A., & Torrell, M. (2020). *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada* (2a ed.). Fundación Naturgy. <https://www.fundacionnaturgy.org/publicacion/hidrogeno-vector-energetico-de-una-economia-descarbonizada/>
- Moreno, L. G., & Vargas, C. E. (2013). La tecnología del hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia [Tesis de maestría, Universidad de Nuestra Señora del Rosario]. In *Tesis*. <http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3>
- Mutingi, M., Mbohwa, C., & Dube, P. (2017). System dynamics archetypes for capacity management of energy systems. *Energy Procedia*, 141, 199–205.

- <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.038>
- Nastasi, B. (2019). Hydrogen policy, market, and R&D projects. In F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, & D. B. T.-S. H. P. Ferrero (Eds.), *Solar Hydrogen Production* (pp. 31–44). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00002-3>
- RAP-E. (2020). Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central. In *Región Central*. <https://regioncentralrape.gov.co/matriz-energetica/>
- Ren, J., Gao, S., Tan, S., Dong, L., Scipioni, A., & Mazzi, A. (2015). Role prioritization of hydrogen production technologies for promoting hydrogen economy in the current state of China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1217–1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.028>
- Sadeghi, S., Ghandehariun, S., & Rosen, M. A. (2020). Comparative economic and life cycle assessment of solar-based hydrogen production for oil and gas industries. *Energy*, 208, 118347. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118347>
- Sanchez, K. (2019). Energía Renovable: Hidrógeno como Vector Energético. *Especialización En Gerencia Ambiental y Desarrollo Sostenible Empresarial*, 1–13.
- Shari, B. E., & Moumouni, Y. (2020). A system dynamics modelling for energy planning and carbon dioxide estimation of the Nigerian power sector. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 16(5/6), 470. <https://doi.org/10.1504/IJETP.2020.10029137>
- Siddiqui, O., & Dincer, I. (2019). A well to pump life cycle environmental impact assessment of some hydrogen production routes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(12), 5773–5786. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.118>
- Stiegel, G. J., & Ramezan, M. (2006). Hydrogen from coal gasification: An economical pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Coal Geology*, 65(3–4), 173–190. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.002>
- TVA. (2022). *How a combustion turbine plants works*. <https://www.tva.com/energy/our-power-system/natural-gas/how-a-combustion-turbine-plant-works>
- UPME. (2005). El Carbón Colombiano. Fuente de Energía para el mundo. In *Unidad de Planeación Minero Energética*. Digitos y Diseños.
- UPME. (2015). Plan Energetico Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. In *Unidad de Planeación Minero Energética*. http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf
- UPME. (2018). *Calculadora de Emisiones*. http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html
- UPME. (2019a). *Exportación de Carbón 2010-2019*. <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>
- UPME. (2019b). *Producción de Carbón 1970-2019*. <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>
- UPME. (2019c). *Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia*. 60.

- http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/Proyeccion_Demanda_Energia_Jul_2019.pdf
- UPME. (2020). *Proyección Demanda de Energéticos ante el Covid 19 (2020-2026)*. http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/UPME_Proyeccion_Demanda_Energia_Junio_2020.pdf
- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2020). Comparative life cycle sustainability assessment of renewable and conventional hydrogen. *Science of The Total Environment*, 144132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144132>
- Verma, A., Olateju, B., & Kumar, A. (2015). Greenhouse gas abatement costs of hydrogen production from underground coal gasification. *Energy*, 85, 556–568. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.070>
- Verma, A., Olateju, B., Kumar, A., & Gupta, R. (2015). Development of a process simulation model for energy analysis of hydrogen production from underground coal gasification (UCG). *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 10705–10719. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.149>
- Wang, B., He, L., Yuan, X., Sun, Z., & Liu, P. (2021). Carbon emissions of coal supply chain : An innovative perspective from physical to economic. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126377>
- Wang, C., & Mu, D. (2014). An LCA study of an electricity coal supply chain. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 10(1), 2014–2021. <https://doi.org/10.3926/jiem.1053>
- World Energy Council (WEC). (2017). *World Energy Scenarios 2017: Latin America & the Caribbean. Summary Report*. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/LAC-Scenarios_Full-Report_FINAL.pdf
- World Energy Council (WEC). (2019). *New Hydrogen Economy: Hope or Hype? In Innovation Insights Brief*. <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEInnovation-Insights-Brief-New-Hydrogen-Economy-Hype-or-Hope.pdf>