

ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA DISMINUCIÓN  
DEL IMPACTO AMBIENTAL EN LOS PROCESOS DE RECONVERSIÓN  
INDUSTRIAL PARA LA ESTACIÓN ACACIAS DE ECOPETROL

DIEGO FELIPE MESA GONZÁLEZ

PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL

DIRECTOR  
JAVIER FUENTES  
INGENIERO MECÁNICO.

CODIRECTOR  
OSCAR LIBARDO LOMBANA  
INGENIERO QUÍMICO, MENG.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C

2022

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Nombre del director

Firma del Director

---

Nombre

Firma del presidente Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

---

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. septiembre de 2022

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada Garcia-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macias Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora de programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1 MARCO REFERENCIAL	16
1.1 Huella de carbono	16
1.2 Eficiencia energética	16
1.3 Economía circular	17
1.4 Indicadores ambientales	17
1.5 Producción de acero	17
1.6 Producción de fibra de vidrio	18
1.7 Economía verde	19
2 DIAGNÓSTICO Y GENERALIDADES DE LA ESTACIÓN ACACIAS	20
2.1 Localización del sitio	20
2.2 Descripción del proceso	21
2.3 Diagnóstico	24
2.3.1. <i>Implementación de materiales.</i>	24
2.3.2. <i>Procesos de unión y fijación de materiales.</i>	25
2.3.3. <i>Implementación de equipos de alto consumo energético.</i>	25
3 TECNOLOGÍAS APLICABLES AL PROCESO DE RECONVERSIÓN	26
3.1 Antecedentes	26
3.2 Masificación tecnológica	27
3.3 Tipo de celdas a intervenir	28
3.4 Variables del proceso – implementación de la tecnología	28
3.5 Diseño y fabricación de internos	29
3.6 Descripción general del proceso	29
4 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES CLAVE DE MEDICIÓN	31
4.1 Cambio climático	33
4.2 Uso de recursos naturales	35
5 PLANTEAMIENTO DE ESTRATEGIAS CLAVES PARA LA MEDICIÓN DE INDICADORES	37

5.1	Emisión de dióxido de carbono equivalente por tonelada de acero al carbón producido	37
5.2	Emisión de dióxido de carbono equivalente por tonelada de fibra de vidrio producido	40
5.3	Emisión de dióxido de carbono equivalente por kwh de energía producido	41
5.4	Consumo de energía eléctrica de los nuevos sistemas hidráulicos o bombas que se van a implementar	43
5.5	Índice de circularidad	44
	5.5.1. <i>Cables.</i>	45
	5.5.2. <i>Tubería Conduit.</i>	46
	5.5.3. <i>Tubería de acero al carbón.</i>	46
	5.5.4. <i>Obras Civiles (Concreto).</i>	46
6	CONCLUSIONES	47
	BIBLIOGRAFÍA	48

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
<b>Figura 1</b> Ubicación Estación Acacias de Ecopetrol.	20
<b>Figura 2</b> Celdas de flotación STAP 1, 2, 3, 4 y 5.	22
<b>Figura 3</b> Estación Acacias de Ecopetrol.	23
<b>Figura 4</b> Herramienta virtual para el cálculo de las emisiones de CO <sub>2</sub> por kWh generado.	42

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Principios de Economía Verde-Aporte a la Sostenibilidad.	26
<b>Tabla 2</b> Parámetros a considerar del agua.	28
<b>Tabla 3</b> Matriz de selección de las temáticas para categorizar los posibles indicadores ambientales medibles.	31
<b>Tabla 4</b> Especificaciones de emisividad de dióxido de carbono de tubería de acero al carbón.	39



## LISTA DE ECUACIONES

	<b>pág.</b>
<b>Ecuación 1</b> Determinación de las emisiones de CO <sub>2</sub> en la producción de acero al carbón.	37
<b>Ecuación 2</b> Determinación del consumo de combustibles fósiles.	38
<b>Ecuación 3</b> Determinación del consumo de carbón.	38
<b>Ecuación 4</b> Determinación del secuestro parcial de productos de carbono.	38
<b>Ecuación 5</b> Determinación de la potencia utilizable (kWh).	43
<b>Ecuación 6</b> Parámetro alfa del índice de circularidad.	44
<b>Ecuación 7</b> Parámetro beta del índice de circularidad.	45

## ABREVIATURAS

<b>%</b>	Porcentaje
<b>CFD</b>	Fluidodinámica Computacional (Computational Fluid Dynamics)
<b>CO</b>	Monóxido de Carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>Etc</b>	Entre otros
<b>FCV</b>	Válvula de Control de Fluido (Fluid Control Valve)
<b>GEI</b>	Gases de Efecto Invernadero
<b>gr</b>	Grado
<b>hp</b>	Caballos de Potencia (Horse Power)
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<b>IEA</b>	Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency)
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<b>BWPD</b>	Barriles de Agua por Día (Barrels Water Produced per Day)
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>km</b>	Kilómetro
<b>kWh</b>	Kilowatt-Hora
<b>lb</b>	Libra
<b>MJ</b>	Megajulios
<b>Mm<sup>3</sup></b>	Millones de metros cúbicos
<b>MW</b>	Megawatt
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Nitrógeno
<b>O<sub>3</sub></b>	Ozono
<b>O/W</b>	Oil & Water
<b>PCV</b>	Válvula de Control de Presión (Pressure Control Valve)
<b>PFVR</b>	Plástico Reforzado en Fibra de Vidrio
<b>PM</b>	Material Particulado
<b>ppm</b>	Partes Por Millón
<b>PVC</b>	Policloruro de Vinilo (Polivynil Chloride)
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Azufre
<b>STAP</b>	Sistema de Tratamiento de Agua de Producción
<b>TSS</b>	Total de Sólidos en Suspensión (Total Suspended Solids)

## RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo fue plantear metodologías para la medición de indicadores ambientales posterior al proceso de reconversión industrial en la Estación Acacias bajo los principios de economía verde. Esto se realizó mediante una serie de consultas bibliográficas e información técnica relevante.

Para el desarrollo del presente trabajo se tuvo en cuenta en primer lugar las generalidades y la operación actual de la estación previa al proceso de reconversión tecnológica llevando a cabo así, un primer diagnóstico técnico y ambiental del proceso. En segundo lugar, se especificó el alcance técnico del proceso de reconversión y las tecnologías específicas y aplicables que se van a tener en cuenta dentro de la intervención, a partir de esta información y alineados a los principios u objetivos ambientales fijados por Ecopetrol se definieron los indicadores medibles a partir de una base de datos estipulada por el IDEAM haciendo uso de una matriz que permitió la identificación de los mismos. Finalmente, se determinaron ciertos métodos aplicables que permitirán determinar estos indicadores estipulados.

Una vez determinada esta metodología de medición de indicadores, se estima que solo con la implementación de la fibra de vidrio se puede disminuir hasta en un 46% la huella de carbono y en general, el impacto ambiental mediante la intervención planeada disminuirá considerablemente.

**Palabras clave:** Reconversión tecnológica, huella de carbono, principios de economía verde.

## INTRODUCCIÓN

Hoy por hoy, el mundo atraviesa una incertidumbre por la situación del cambio climático y en consideración a esto, se han desarrollado las bases técnicas y operativas necesarias para avanzar en la gestión del cambio climático en los diferentes sectores y territorios a nivel local, nacional e internacional. Desde la inauguración de la Estación Acacias en el año 2014 y en línea con los objetivos y compromisos ambientales estratégicos que Ecopetrol ha fijado para disminuir el impacto ambiental en sus procesos operativos, se han desarrollado ciertas iniciativas que aportan e integran soluciones en pro de la mitigación del cambio climático. Dentro de las iniciativas se pueden mencionar la instalación y puesta en marcha del Parque Solar Castilla el cual tiene una potencia instalada de 21 megavatios (MWp), el inicio de pruebas de potencial de energía eólica en Cartagena, la implementación de estrategias de reconversión industrial y su más reciente y consolidado proyecto, el inicio de producción de hidrógeno verde con el electrolizador ubicado en la refinería de Cartagena, aportando así a la meta ambiciosa de lograr cero emisiones netas de carbono en 2050 y otras más.

Bajo esta premisa, uno de los problemas más frecuentes dentro de los sistemas operativos que maneja Ecopetrol radica en la implementación de tecnologías, que no contemplan una base operativa ambientalmente amigable desde su instalación, momento cero en el cual se hace uso de materiales muy poco sostenibles, equipos de consumo altamente energético, maniobras operativas de altas emisiones como el uso de soldaduras, entre otros. De seguir implementando este tipo de alternativas, se verá muy poco ratificada la responsabilidad de Ecopetrol con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y, el propósito de limitar el calentamiento global a mediano y largo plazo no tendrá acciones que le apunten a las metas de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y en general, a las rutas o estrategias encaminadas al cumplimiento y planeación ambiental.

A nivel estadístico, es posible afirmar que para el año 2020 la producción de cada tonelada métrica de acero generó 1.85 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> que fueron liberadas

a la atmosfera (Kamczyc, 2021). Para el mismo año y teniendo en cuenta este indicador, se produjeron 1860 millones de toneladas métricas de acero y las emisiones totales fueron de 2600 millones de toneladas métricas del mismo gas contaminante (Kamczyc, 2021). Ahora bien, en el caso de la fibra de vidrio, es posible afirmar que la huella de carbono en términos numéricos se aproxima a la cifra de 1.7 kg de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por cada kg de fibra de vidrio producido (de Beus, Carus, & Barth, 2019). A partir de esta estadística se puede inferir que, para el proceso de reconversión en la implementación de las nuevas tecnologías, solo con la implementación de fibra de vidrio se puede disminuir hasta en un 46% la huella de carbono reduciendo así el impacto ambiental en el proceso operativo y en general durante la vida útil de la estación corroborando con la disminución de la contaminación y apuntándole a los objetivos de desarrollo sostenible siete, doce y trece.

La toma de indicadores o monitoreo de los gases de efecto invernadero en procesos industriales y demás se está realizando a nivel mundial y se está expresando a través de la huella de carbono, término que está siendo comercializado en todos los ámbitos de la economía y en general de la vida, sobre el cual no existen muchos estudios acertados que puedan asegurar una medición de este principio (Pandey , Agrawal, & Pandey, 2011). Todas las metodologías o técnicas para llevar a cabo la medición de este tipo de indicadores se encuentran en proceso de desarrollo y están apareciendo como una herramienta importante para gestionar y tomar acciones sobre las emisiones de este gas contaminante. Los estándares de contabilidad de gases de efecto invernadero son los recursos comunes utilizados en los cálculos de la huella, aunque es importante mencionar que no existe una disposición obligatoria de verificación de la huella. La huella de carbono pretende ser una herramienta para orientar la disminución de emisiones y verificaciones, por lo que es necesaria su estandarización a nivel internacional (Pandey , Agrawal, & Pandey, 2011).

Uno de los más inminentes problemas en la emisión de dióxido de carbono lo sostiene la industria del hierro y del acero, es por ello que para 2018 esta industria era la tercera más grande generadora de emisiones de este gas contaminante. A partir de esto, se

llevó a cabo un estudio para la determinación de la huella de carbono basados en datos reales de producción de fábricas típicas en China (Zhao, Zuo, She, Wang, & Wang, 2018) y a su vez, fue posible generar un factor de emisión a partir de métodos de medición para cada proceso dentro del modelo de producción del hierro y del acero que permite generar métodos de contingencia para fijar la atención en aquellos procesos de producción más contaminantes.

Otro caso de estudio se presenta en los últimos resultados de la EIA (Energy Information Administration). Las cifras son contundentes al enunciar que para el año 2020 la generación de electricidad total por parte de la industria de la energía eléctrica de 4.01 billones de kWh de todas las fuentes resultó en la emisión de 1550 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono (Energy Information Administration (EIA), 2021). De acuerdo a estas cifras es posible enunciar que el equivalente por cada kWh de energía producido es de aproximadamente 2.58 toneladas métricas de dióxido de carbono.

Como se había mencionado anteriormente, son varios los esfuerzos que se han alineado para mitigar la emisión de estos gases contaminantes. Hallazgos sugieren que indagar en alternativas que corroboren y optimicen la eficiencia energética en diferentes procesos industriales permitirán mitigar las emisiones de dióxido de carbono. Los resultados de estudios demuestran que aumentar la eficiencia energética es el principal contribuyente a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y le apuntan a lograr el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima) (Mirza, Sinha, Rehman Khan, Kalugina, & Zafar, 2022). Por otro lado, estrategias de economía circular, que permitan generar nuevos modelos de producción y consumo garantizarán un crecimiento sostenible en el tiempo donde, se disminuirán los procesos industriales altamente contaminantes aprovechando al máximo los recursos materiales de los cuales disponemos alargando el ciclo de vida de los productos en general.

El objetivo general de esta monografía es desarrollar una metodología de medición de indicadores ambientales posterior al proceso de reconversión industrial en la Estación

Acacias de Ecopetrol bajo los principios de economía verde. Los objetivos específicos son:

- Diagnosticar el estado actual de la Estación Acacias de Ecopetrol en relación a la reconversión industrial.
- Revisar las funciones operativas de las tecnologías aplicables a los procesos de reconversión industrial en la Estación Acacias de Ecopetrol.
- Identificar las variables clave en la implementación de la reconversión industrial en la EAE considerando los principios de la economía verde.
- Plantear estrategias de medición de indicadores ambientales de la reconversión industrial en la Estación Acacias de Ecopetrol en términos de la economía verde.

La presente investigación tiene como propósito llevar a cabo un estudio bibliográfico para poder determinar el efecto de la masificación e implementación de tecnologías a través de métodos que permitan cuantificar y medir indicadores ambientales para la Estación Acacias de Ecopetrol sobre las unidades de separación de aceites por inducción de gas que actualmente operan en sitio y sobre las cuales se pretende ejecutar un proyecto de reconversión industrial bajo parámetros de economía verde, enfocado en la utilización de nuevas alternativas de materiales de alta durabilidad y que tienen menor impacto ambiental, disminución de emisiones a la atmosfera en los procesos de soldaduras, reducción del consumo energético mediante la implementación de nuevos sistemas hidráulicos y automatización de la operación, reutilización de materiales ya existentes como ductos de tuberías y acometidas eléctricas, entre otros.

## **1 MARCO REFERENCIAL**

### **1.1 Huella de carbono**

Este término ha cobrado fuerza en los últimos 10 años en respuesta a los problemas ambientales y cambio climático a manera de generar conciencia. El concepto se relaciona directamente con la preocupación por el aumento de los niveles de dióxido de carbono en el planeta. Partiendo de esto se define entonces el término de “huella de carbono” como una medida directa de las emisiones de gases de efecto invernadero expresada en toneladas de dióxido de carbono equivalente causadas por una determinada actividad definida. Como mínimo, esta medición incluye las emisiones resultantes de las actividades bajo el control o propiedad del emisor y las emisiones indirectas resultantes del uso de la electricidad comprada (Growcom, 2018).

Son innumerables las prácticas que se han venido ejecutando que contribuyen con el proceso de transición energética hacia una economía de bajas emisiones de carbono, esto asegura una resiliencia de las actividades económicas de todos los países frente a la problemática del cambio climático.

### **1.2 Eficiencia energética**

La eficiencia energética hace referencia al menor uso de energía sobre una misma tarea, disminuyendo totalmente o parcialmente el desperdicio de energía. La eficiencia energética trae consigo una variedad de beneficios a mencionar: la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y el impacto ambiental, se reduce de manera considerable la demanda de importaciones de energía y reduce los costos a nivel económico en cualquier tipo de proceso doméstico o industrial que se ejecute (Environmental and Energy Study Institute, 2021).



### **1.3 Economía circular**

El modelo de economía circular parte del modelo de economía lineal que se ha mantenido como el modelo dominante y estándar desde el inicio de la revolución industrial. Este término implica una transformación de nuestros actuales patrones de producción y consumo, que se traducen en un impacto directo en la economía al reutilizar materias primas que ya se han utilizado, en el medio ambiente al no generar el mismo volumen de desecho y finalmente en la sociedad. Generar políticas que permitan abordar y comprender los impactos directos de este principio requiere desarrollar un conocimiento profundo en el concepto de economía circular y sus efectos esperados en los sectores y cadenas de valor (Arno, Katja, & Vasileios, 2017). Por otro lado, existe una serie de indicadores que permiten la medición y aproximación de este principio y que serán abordados a lo largo del estudio.

### **1.4 Indicadores ambientales**

Estos indicadores permiten monitorear los impactos y el desempeño de los diferentes procesos industriales para identificar acciones puntuales que permitan disminuir el cambio climático y reducir variables cuantificables tales como la huella de carbono y la emisión de gases asociada.

Bajo estos valores cuantitativos es posible corroborar el aporte ambiental de cualquier intervención de mejora en procesos industriales. Estos indicadores se determinan a partir de métodos ya establecidos que pueden tener o no cierto grado de incertidumbre, pero brindan una aproximación bastante acertada.

### **1.5 Producción de acero**

La industria siderúrgica provoca efectos significativos en los medios ambientales: aire, agua y suelo. En las plantas de sinterización, las emisiones dominantes generadas por el manejo de materiales, el escape de la caja de viento, el extremo de descarga y la

pantalla fría son emisiones de partículas, principalmente óxidos de hierro, óxidos de azufre, óxidos de calcio, hidrocarburos, compuestos carbonosos y cloruros (Doushanov, 2018).

La fabricación de acero es el método de desarrollar acero a partir de mineral de hierro (generalmente hematita) y chatarra. Las impurezas como nitrógeno, azufre, silicio, fósforo y el exceso de carbono se separan del hierro bruto y se añaden elementos de aleación como níquel, manganeso, vanadio, molibdeno y cromo para impartir diferentes propiedades al acero. La tecnología de fabricación de acero ha hecho grandes avances con el tiempo. Este documento describe las tecnologías modernas utilizadas en una planta siderúrgica al mismo tiempo que revisa los procesos convencionales (Mondol, 2016).

## **1.6 Producción de fibra de vidrio**

La fabricación de fibra de vidrio es la conversión a alta temperatura de diversas materias primas (principalmente borosilicatos) en una masa fundida homogénea, seguida de la fabricación de esta masa fundida en fibras de vidrio. Los 2 tipos básicos de productos de fibra de vidrio, textiles y lana, se fabrican mediante procesos similares. La producción de fibra de vidrio se puede segmentar en 3 fases: manejo de materias primas, fusión y refinación de vidrio, y formación y acabado de fibra de vidrio de lana, siendo esta última fase ligeramente diferente para la producción de fibra de vidrio de lana y textil. El componente principal de la fibra de vidrio es la arena, pero también incluye cantidades variables de feldespato, sulfato de sodio, bórax anhidro, ácido bórico y muchos otros materiales (Wallenberger, 2010).

El dióxido de carbono liberado durante el proceso de fabricación de la fibra de vidrio es menos de la mitad del del hormigón y un tercio del del acero. Por lo tanto, la fibra de vidrio tiene una huella de carbono menor que la mayoría de los materiales, lo que la hace ecológica. Apenas se liberan o crean subproductos nocivos durante la producción de fibra de vidrio. La producción de metales como el aluminio y el acero tiene más impactos

negativos en el medio ambiente que la fibra de vidrio. La resina utilizada para fabricar fibra de vidrio se produce a partir de petróleo crudo refinado, por lo que es completamente orgánica y ecológica (Conserve Eenergy Future, 2020).

## **1.7 Economía verde**

Este concepto surge a raíz de la necesidad de crear una estrategia global que permita enfrentar la crisis ambiental y económica que sufren hoy en día las sociedades y en general el mundo. Este concepto entonces, puede aportar al mantenimiento del ambiente sano y al uso adecuado de los servicios ecosistémicos tanto para la generación presente como para la futura.

El nuevo pensamiento y el concepto propio de economía verde permite crear un enfoque que busque estrategias específicas para mitigar las diversas crisis que dificultaron el desarrollo de la sociedad en los últimos años, que, aunque no va a reemplazar la filosofía del desarrollo sostenible si va a cambiar el concepto de la clásica economía que no tiene en cuentas los problemas críticos sociales o el agotamiento de los recursos. En conclusión, como se mencionó anteriormente, la sostenibilidad seguirá siendo un objetivo de gran importancia y para alcanzarlo es necesario cambiar el pensamiento (Vargas Pineda, Trujillo González, & Torres Mora, 2017).

## 2 DIAGNÓSTICO Y GENERALIDADES DE LA ESTACIÓN ACACIAS

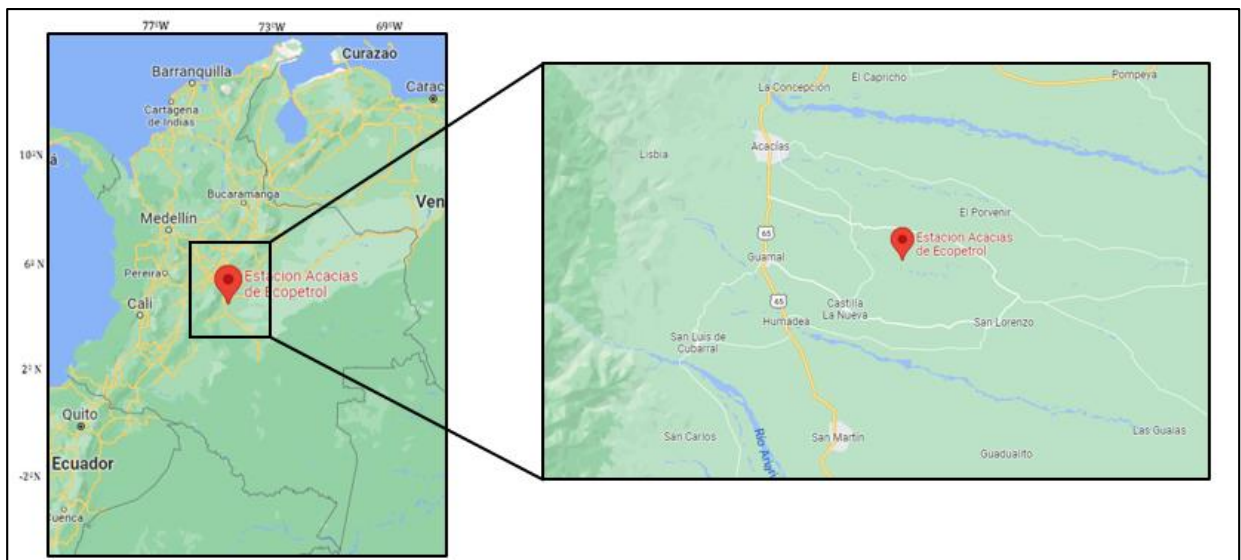
De acuerdo a lo establecido, se iniciará con un diagnóstico de la condición técnica actual sobre la cual el procedimiento de la estación opera. A partir de esto llevará a cabo un diagnóstico y/o primer acercamiento de la infraestructura y equipos de la estación, los materiales que constituyen esta configuración operativa y otro tipo de especificaciones que afectan el análisis ambiental que se va a desarrollar tal y como se muestra a continuación.

### 2.1 Localización del sitio

La ubicación de las actividades de ingeniería que se van a desarrollar tienen lugar en el Campo Castilla perteneciente a la Vicepresidencia Regional de Orinoquía de Ecopetrol. Este Campo se encuentra ubicado en el departamento del Meta, a una distancia aproximada de 20 o 25 kilómetros al sur del municipio de Acacias y 8 kilómetros al nororiente del municipio Castilla La Nueva, que está localizado al noroccidente del Departamento del Meta (Colombia), específicamente en la Estación Acacias. La **Figura 1** muestra el mapa de la geolocalización de la estación:

**Figura 1**

*Ubicación Estación Acacias de Ecopetrol*



**Nota.** Google Maps

## 2.2 Descripción del proceso

Para delimitar y llevar a cabo el primer acercamiento en las especificaciones técnicas y operativas bajo las cuales trabaja actualmente la Estación es preciso abordar la descripción del proceso en lo relacionado con los sistemas de tratamiento de agua de producción. Estos sistemas están encargados de minimizar la concentración de grasas, aceites y sólidos del agua obtenida por la producción de hidrocarburos la cual se mezcla con crudo desde la formación (yacimientos) de los pozos que actualmente se encuentran produciendo y de manera general, durante el respectivo proceso se realiza una deshidratación del crudo logrando así las condiciones óptimas para la apropiada disposición y/o vertimiento del agua tratada en el río según la reglamentación vigente.

En la Estación Acacias actualmente se encuentran operando siete Sistemas de Tratamiento de Agua de los cuales dos son sistemas portátiles o de sacrificio y se usan solamente en caso de contingencia por eventos de indisponibilidad en algunos de los sistemas fijos.

Inicialmente el agua ingresa a unos tanques de procesamiento de crudo en donde se hace una primera separación. El crudo retirado acá se dispone y se lleva a fiscalización y el gas libre es dirigido a una tea para su eliminación, por otro lado, el resto del fluido es transferido por gravedad desde dichos tanques de la estación hacia unos fosos de quietamiento en concreto los cuales cuentan con unas recamaras independientes. El fluido se dirige a través de bombas centrífugas a una serie de separadores de placas corrugadas donde se separa el aceite libre y los sólidos sedimentables de mayor tamaño. Estos equipos están elevados para favorecer la transferencia del agua efluente por gravedad a través de un cabezal de descarga común hacia las celdas de flotación.

Estas celdas de flotación, que son el motivo principal de intervención y el proceso focal a optimizar, tienen una capacidad de 120 kBWPD cada una. En estas unidades se pretende realizar la remoción de los sólidos suspendidos impregnados de hidrocarburo mediante la aplicación previa de coagulante y floculante. Actualmente se encuentran

operando 12 celdas tal y como se muestran en la **Figura 2** correspondientes a las STAPS 1, 2, 3, 4 y 5 que operan a un caudal menor al de la capacidad anteriormente mencionada (120 kBWPD):

**Figura 2**

*Celdas de flotación STAP 1, 2, 3, 4 y 5.*



**Nota.** Google Maps

Las celdas de flotación cuentan con un sistema de recirculación de agua tratada efluente del equipo con un parámetro de calidad por medio del cual se hace recircular cerca del 25% del caudal nominal del equipo hacia un sistema de eductores dispuestos cada uno en compartimentos que succionan el gas de manto de la vasija y se permite la difusión en el fondo de cada módulo para favorecer la flotación del “floc” presente en el fluido de entrada.

La nata de aceite sobrenadante en la parte superior se rebosa hacia una caja de recolección lateral y desde allí es transferido hacia un sistema de separación a través de un sistema de bombas, los sólidos o sedimentos que quedan en la celda en la parte inferior también son succionados y transferidos con el mismo sistema de bombeo.

El agua que se obtiene una vez tratada, es transferida a una serie de filtros para terminar de ser pulida, estos filtros cuentan con un lecho de cascara de nuez que permite la remoción de los sólidos suspendidos y las grasas y aceites hasta alcanzar los parámetros exigidos. Finalmente, estos filtros descargan hacia un sistema de bombas que envían el agua hacia la disposición final o bien para un sistema de enfriamiento para su transferencia hacia sistemas de riego o a sistema de vertimiento en un río cercano al campo. Es importante tener en cuenta que esta última está en proceso de ser descartada de acuerdo a los requerimientos ambientales vigentes.

Teniendo en cuenta esto y conociendo el alcance operativo actual bajo el que opera la estación, en la **Figura 3** se muestra un esquema o foto satelital de la estación:

**Figura 3**

*Estación Acacias de Ecopetrol.*



**Nota.** Google Maps

## **2.3 Diagnóstico**

Una vez establecido el proceso operativo actual bajo el cual opera la estación es posible llevar a cabo un primer diagnóstico sobre el que se tendrá un esquema ambiental del proceso y una primera aproximación general de sostenibilidad.

### **2.3.1. Implementación de materiales**

Actualmente las celdas se encuentran diseñadas con baffles o caracoles internos que favorecen el tiempo de residencia y aumentan la turbidez en las partes bajas de la celda para aumentar la separación del agua con el aceite y otros contaminantes, dichos baffles o caracoles son de acero al carbón de especificación ASTM A516 Gr.70. La cantidad total que se estima sustituir por baffle o caracol interno son 430 kilogramos aproximadamente de este material y cada celda tiene instalados 4 caracoles para un total de 1720 kilogramos de acero. De acuerdo a las cifras, cada tonelada métrica de acero genera 1.85 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> que son liberadas a la atmosfera (Kamczyc, 2021) y con este dato es posible afirmar entonces que por cada celda la huella de carbono aproximada es de 3.182 toneladas de dióxido de carbono teniendo en cuenta solo la estructura interna del equipo. Este dato servirá como línea base en el análisis comparativo con el cual se corroborará que la implementación de la fibra de vidrio es más sostenible y tiene menor impacto ambiental en términos de huella de carbono una vez se fijen los métodos para calcular esta huella de carbono.

Por otro lado, hay subestructura y bases de apoyo hechos en cemento para los skids de tubería y algunos equipos como las bombas. Teniendo en cuenta esto, el 100% de estructuras se van a reutilizar para el montaje de las nuevas bombas y otro tipo de apoyos o soportes ya existentes a lo que también se le asocia una huella de carbono lo cual es algo característico de este tipo de industria que es una de las mayores productoras de dióxido de carbono en su proceso productivo. Estudios demuestran que esta producción requiere 3191.95 MJ de energía y genera emisiones de 510.57 kilogramos de dióxido de carbono (Leon Velez & Guillen-Mena, 2020).



Finalmente, a esta huella de carbono también se le asocia lo relacionado a la fabricación e implementación de cables eléctricos de cobre, tubería conduit, cierto tipo también de tubería de acero al carbón y en menor medida tubería PVC para conexionado a lo cual se le hará el respectivo análisis en los capítulos posteriores.

### **2.3.2. Procesos de unión y fijación de materiales**

Se tiene conocimiento de que los montajes de las instalaciones actuales fueron realizados mediante procesos de soldadura para unir piezas y tubería que, aunque no tiene un impacto significativo se le asocia de igual manera una huella de carbono contaminante.

### **2.3.3. Implementación de equipos de alto consumo energético**

Actualmente las unidades de bombeo que operan en relación a las celdas y de acuerdo a la información suministrada tienen una eficiencia eléctrica de 94.1% (Tomado de las hojas de datos de la bomba Gould Pumps) y una potencia hidráulica que se obtiene a partir de cálculos teniendo en cuenta el caudal (8748 BWPD), la presión (65 lbs) y la eficiencia hidráulica (77%) arrojando un valor de 46 hp.

Este dato servirá como línea base en el análisis comparativo con el cual se corroborará que la implementación de las bombas de referencia Generadoras de Microburbuja KTM 80s son más sostenibles y más amigables con el medio ambiente.

Es notorio observar que, bajo las premisas de los materiales implementados, los procesos de unión y fijación de piezas y finalmente la implementación de equipos de alto consumo energético anteriormente mencionados bajo los cuales opera actualmente la Estación Acacias de Ecopetrol se encuentran totalmente desalineados de los principios de economía verde y la huella de carbono asociada resulta ser muy alta y no obedece a otro tipo de parámetros sostenibles como la economía circular en ninguna momento.

### 3 TECNOLOGÍAS APLICABLES AL PROCESO DE RECONVERSIÓN

El alcance general es la implementación y masificación de la tecnología aplicada a las celdas de flotación de los sistemas de tratamiento de agua de producción de la estación Acacias de Ecopetrol S.A. Todo esto debe ir alineado bajo los 4 objetivos estratégicos de aporte a la sostenibilidad o principios de economía verde enunciados en la **Tabla 1**:

**Tabla 1**

Principios de Economía Verde-Aporte a la Sostenibilidad.

<b>Principio.</b>	<b>Descripción.</b>
Emisión CO <sub>2</sub> - Soldadura/ Producción acero al carbono.	Se sustituirán algunas piezas de equipos específicos fabricados en acero al carbón por materiales más sostenibles y alineados con los objetivos ambientales estratégicos fijados. Adicionalmente, para los procesos de instalación y acondicionamiento se reducirá la implementación de procesos como soldadura a la cual se le asocia gran parte de emisión de gases contaminantes.
Economía Circular – Uso Materiales alternativos.	Este principio se asocia a la utilización de la fibra de vidrio reforzada para los baffles de las celdas. La huella de carbono de este tipo de material en comparación a la del acero al carbón es sustancialmente menor. Mediante la implementación de métodos que permitan medir esta huella será posible cuantificar y corroborar esta hipótesis.
Disminución de carga eléctrica.	Este principio se asocia a la implementación de bombas de mayor eficiencia hidráulica con motores que corroboran la disminución de la carga eléctrica asociada a la potencia y al gasto energético de los equipos a utilizar.
Reúso de líneas de tuberías y acometidas eléctricas.	Gran parte de la isometría para la interconexión mecánica (tubería en acero al carbón) ya está instalada. A través esta intervención operativa solo se hará una optimización de las instalaciones actuales mediante el reúso de tubería de interconexión mecánica, tubería conduit y cables de cobre existentes.

**Nota.** Ecopetrol SAS-Elaborado por el auto.

#### 3.1 Antecedentes

En el año 2019 se implementó la tecnología (Sistema de Flotación Mediante Equipos de Microburbuja) para una de las celdas de flotación que operan en la Estación Acacias.

Dicha implementación permitió aumentar la eficiencia de la celda en términos de caudales de operación y mejores resultados a la salida de la unidad con una mejor calidad de agua manteniendo la inyección de productos químicos estables.

La celda presentaba una baja eficiencia en términos de calidad de agua y cálculos de diseño del fabricante por lo cual, los resultados a la salida del equipo estaban por fuera de los parámetros mínimos requeridos para los equipos de filtración generando aumentos en la frecuencia de retrolavado, aumento y dosificación de productos químicos y aumentos en la generación de subproductos por arrastre significativo de aceite a los equipos de filtración.

Teniendo en cuenta el comportamiento de calidad de agua entrando a la celda, se realizaron diferentes simulaciones CFD para determinar mejoras en tiempos de residencia y evitar puntos muertos dentro del equipo que logren el correcto funcionamiento hidráulico del equipo y sumado al efecto de generación de microburbuja se obtengan los resultados de calidad de agua a la salida del equipo. Con los resultados de esta simulación, se realizaron ajustes mecánicos en los internos de la celda, en donde se instalaron baffles a diferentes grados de inclinación, logrando un aumento en el tiempo de residencia y disminución de puntos muertos dentro del equipo.

### **3.2 Masificación tecnológica**

Teniendo en cuenta los resultados positivos del piloto realizado en el año 2019, y siguiendo los objetivos estratégicos- aporte a la sostenibilidad se contempla realizar la implementación y masificación de la tecnología de flotación mediante bombas de microburbuja enfocados en reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, disminución de carga eléctrica, reúso de líneas- tuberías y economía circular.

### 3.3 Tipo de celdas a intervenir

Los equipos a implementar la tecnología de micro burbujeo en la Estación Acacias, son equipos que trabajan con recirculación de fluido mediante bombas en piso que por efecto de venturis ingresan el aire para generar los procesos de flotación dentro de las celdas.

### 3.4 Variables del proceso – implementación de la tecnología

Las celdas serán alimentadas con el fluido que sale del sistema de separación de aceite de placas corrugadas. Las características y variables a considerar del agua después del tratamiento son las enunciadas en la **Tabla 2** tal y como se muestra a continuación:

**Tabla 2**

*Parámetros a considerar del agua.*

<b>Variable.</b>	<b>UNIDAD.</b>
Caudal de operación de Celdas.	BWPD
Concentración de TSS efluente de celdas.	ppm
Concentración de O/W efluente de celdas.	ppm
Concentración de Floculante inyectado a las celdas.	ppm

**Nota.** Ecopetrol SAS-Elaborado por el auto.

Estos parámetros de calidad son el objetivo técnico a optimizar mediante este procedimiento de reconversión. Estos parámetros además permitirán determinar la efectividad del equipo y del proceso de masificación a ejecutar y son las que asegurarán el éxito de la operación.

### **3.5 Diseño y fabricación de internos**

Basados en simulaciones computacionales, se realizarán los ajustes pertinentes de los baffles internos de cada una de las celdas de flotación, evaluando alternativas hidráulicas que permitan la optimización mecánica de los equipos. Sumado a esto, se añadiría la implementación de materiales que permitan reducir tiempos de ejecución, soldadura y cumplir los objetivos de descarbonización que plantea Ecopetrol en este proyecto.

Estos materiales garantizaran así un menor desgaste de los internos por procesos de corrosión e integridad inherente al fluido en tratamiento.

Los internos estarán diseñados con material PFVR – material de fibra de vidrio reforzado. Así mismo se usará una resina con características mecánicas acordes a la caracterización fisicoquímica del fluido. El proceso de fabricación de la fibra de vidrio se realiza bajo procedimientos estandarizados, los cuales consisten en realizar de manera manual capas de fibra hasta lograr las condiciones y características de espesor requeridos. La mezcla entre la fibra de vidrio y la resina, genera características mecánicas que aumentan la resistencia del baffle.

### **3.6 Descripción general del proceso**

El fluido a tratar proviene de los sistemas de separación de aceite y recuperación de crudo para garantizar las concentraciones de aceite y TSS; este fluido previamente acondicionado con la aplicación de productos químicos (Floculante/Coagulante) ingresa a las unidades de flotación. El agua se recibe en la celda de microflotación en donde se realiza una separación de aceites y sólidos suspendidos por acción mecánica y la inyección de químicos que facilitan la separación de estos.

El sistema de microburbuja a instalar se encarga de inyectar agua con aire disuelto con el fin de que las microburbujas fomenten la flotación de aceites y sólidos suspendidos que se encuentran en el agua y de este modo se optimice la separación, mejorando los

parámetros que determinan la calidad del agua. La tecnología a implementar cuenta con tres bombas de microburbuja para cada dos celdas de flotación de las cuales una bomba es de back up para asegurar la operación.

Adicionalmente, el sistema de generación de microburbuja contempla un tanque pulmón de aire para cada dos celdas, los cuales permitirán el suministro constante de aire para el accionamiento de toda la instrumentación (PCV, FCV) y adicional suministrar el aire de óptima calidad para la saturación de agua con aire en las bombas de microburbuja.

#### 4 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES CLAVE DE MEDICIÓN

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el presente estudio partirá con la identificación de las variables clave o los indicadores ambientales sujetos a los objetivos estratégicos planteados por Ecopetrol. Para ello, se tendrá en cuenta una matriz que permitirá hacer un primer filtro de la categorización que contienen estos indicadores para seleccionar los más acertados y lograr el cumplimiento del objetivo general.

En este sentido, el IDEAM presenta una serie de indicadores calculados que abarcan un amplio espectro de temáticas y fenómenos, no solo de índole biofísica, sino también de aquellos que reflejan las relaciones de la sociedad con su ambiente ecosistémico y así, permitir un análisis más intuitivo para organizar las temáticas que agrupan variables ambientales las cuales van a ser medidas según la relación con la intervención técnica que se llevará a cabo y según los intereses sostenibles y ambientales de Ecopetrol tal y como se muestra en la **Tabla 3**:

**Tabla 3**

Matriz de selección de las temáticas para categorizar los posibles indicadores ambientales medibles.

Temática	No cumple con los objetivos ambientales estratégicos fijados por Ecopetrol	Cumple menos que parcialmente con los objetivos ambientales estratégicos fijados por Ecopetrol	Cumple parcialmente con los objetivos ambientales estratégicos fijados por Ecopetrol	Cumple con los objetivos ambientales estratégicos fijados por Ecopetrol
Bosques y recursos forestales	X			
Suelos y Tierras		X		
Agua		X		
Aire		X		
Cambio climático			X	
Clima	X			

**Tabla 4 (Continuación)**

<b>Ecosistemas</b>	X			
<b>Residuos peligrosos y bifenilos policlorados</b>		X		
<b>Uso de recursos naturales</b>			X	

**Nota.** extraída de los datos del IDEAM

De acuerdo con los resultados obtenidos, se identifican 2 temáticas o grupos categorizados cumpliendo parcialmente con los objetivos ambientales estratégicos fijados por Ecopetrol los cuales contienen indicadores afines a lo proyectado. Estas categorías serán evaluadas con mayor profundidad en los siguientes capítulos del proyecto:

- Cambio Climático
- Uso de recursos naturales

Por otro lado, la categoría de **bosques y recursos forestales**, cuenta con indicadores relacionados con el manejo y aprovechamiento de madera y las tasas de deforestación, además de las áreas o superficies ocupadas y los bosques naturales intervenidos. A partir de esto, no se tendrá en cuenta esta temática en vista de que no tiene relación con el propósito investigativo. Adicionalmente, en relación a la categoría de **clima** se tienen en cuenta indicadores afines con los elementos propios del clima en lo relacionado a conceptos de temperatura, humedad, presión e indicadores similares. Finalmente, para la categoría de **ecosistemas** se tienen en cuenta aspectos de áreas y cambios en la cobertura glacial y la variación de la superficie de los ecosistemas naturales continentales que son temas por fuera del contexto y del objetivo de este análisis investigativo que no se tendrán en cuenta.



Para el caso especificado del **aire**, se presentan ciertos índices que permiten monitorear la calidad del aire y categoriza y correlaciona los niveles de inmisión de los contaminantes mediante estaciones de monitoreo que controlan emisiones de agentes tales como material particulado (PM) y ciertos gases a mencionar: SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, etc. A pesar de que son indicadores sustentables y de cierta manera tiene una estrecha relación con el objetivo del presente proyecto, no contempla las emisiones de CO<sub>2</sub> como principal gas de efecto invernadero contaminante y es por ello que no se tendrá en cuenta esta categoría.

Ahora bien, para las categorías restantes (**Suelos y Tierras, Agua y Residuos Peligrosos**) son muy pocos los indicadores que pueden llegar a medirse en el contexto y material propio de la investigación y para el caso práctico de este proyecto no se van a tener en cuenta.

A partir de este análisis cualitativo y una vez fijadas las categorías afines, es posible indagar en los indicadores que contienen las temáticas establecidas para fijar las variables que van a ser medidas y van a ser objeto cuantitativo en la intervención técnica de la Estación Acacias y que permitirán corroborar el aporte ambiental y sostenible.

#### **4.1 Cambio climático**

El cambio climático se traduce en el aumento de la temperatura por el acelerado incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas principalmente por la desmesurada quema de combustibles fósiles en los diferentes procesos cotidianos, industriales y en general por la actividad humana que lo requiere. Los gases de efecto invernadero son compuestos que, debido a su capacidad para absorber y remitir radiación infrarroja aumentan significativamente la temperatura de la atmosfera( (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2015).

Según la información publicada por el IDEAM, la temática de cambio climático contempla dos indicadores medibles a mencionar: Emisiones Netas Nacionales de GEI per cápita y Emisiones Netas Nacionales de GEI.

En primera instancia, para el caso de las Emisiones Netas Nacionales de GEI per cápita se define como el indicador que contabiliza la cantidad total de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2 \text{ eq}$ ) por habitante que el país emite a la atmósfera, como consecuencia de las actividades sectoriales definidas por el IPCC, durante un periodo de análisis determinado (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2017). En segunda instancia, para el caso de las Emisiones Netas Nacionales de GEI el IDEAM define este indicador como la cantidad total de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2 \text{ eq}$ ) que el país emana a la atmósfera como consecuencia de las actividades sectoriales definidas por el IPCC durante un periodo de análisis determinado (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2017).

Dentro del marco del presente proyecto y teniendo en cuenta el contexto técnico en el cual se abordará el informe, el primer indicador (Emisiones Netas Nacionales de GEI per cápita) no se tendrá en cuenta debido a que este indicador mide la producción equivalente de dióxido de carbono por persona emitido para lo cual no aplica. Sin embargo, el indicador de Emisiones Netas Nacionales de GEI general si aplica ya que tiene en cuenta las emisiones de  $\text{CO}_2$  equivalentes como consecuencia de las actividades sectoriales definidas.

Para este último, no se abordará de manera nacional como bien se define. Por el contrario, se delimitará al alcance de la intervención técnica proyectada y en este caso específico las emisiones serán calculadas para un número específico de casos a mencionar:

- Emisión de dióxido de carbono equivalente por tonelada de acero al carbón producidos
- Emisión de dióxido de carbono equivalente por tonelada de fibra de vidrio producidos

- Emisión de dióxido de carbono por kW de energía generado

## **4.2 Uso de recursos naturales**

El uso de recursos naturales, específicamente en lo que se refiere a recursos hídricos genera un gran impacto ambiental. La demanda en el sector manufacturero hace referencia a la cantidad de agua que consume el sector industrial en un determinado año y cuya unidad de medida es en millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>). Para el año 2020 este indicador se aproxima a la cifra de 282.8 Mm<sup>3</sup> con una variación de -12% respecto al año anterior (2019) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2020). Por otro lado, dentro de esta categoría, es válido mencionar los indicadores de generación de energía eléctrica en ciertos sectores industriales específicos también genera emisiones de gases contaminantes y material particulado.

Según la información publicada por el IDEAM, la temática de uso de recursos naturales contempla ciertos indicadores medibles a mencionar:

- Demanda de Agua en el Sector Manufacturero
- Consumo de Energía Eléctrica en el Sector Manufacturero
- Generación de Residuos No Peligrosos en el Sector Manufacturero
- Volumen de Agua Vertida en el Sector Manufacturero
- Establecimientos Manufactureros con Programa de ahorro y uso eficiente del agua
- Establecimientos Manufactureros con Programas de capacitación
- Establecimientos Manufactureros con Programas de Reciclaje

Para el caso específico de la masificación tecnológica proyectada en la Estación Acacias no se incurrirá en gastos hídricos representativos ni generación de residuos peligrosos que tengan que ser sopesados. Por el contrario, y haciendo énfasis en los indicadores anteriormente citados, se tendrán en cuenta particularmente los consumos de energía eléctrica enfocados en la implementación de nuevos equipos hidráulicos de menor consumo energético y en el establecimiento de procesos de reciclaje o economía circular a partir de la reutilización de las acometidas eléctricas ya existentes. Teniendo en cuenta

esto y delimitando el alcance del presente informe, para este caso específico se va a tener en cuenta dos indicadores controlables en el presente informes:

- Consumo de energía eléctrica de los nuevos sistemas hidráulicos o bombas que se van a implementar.
- Cálculo del índice de circularidad en acometidas eléctricas, tubería de conexión mecánica y obras civiles (concreto).

Una vez fijados los indicadores medibles y que se van a tener en consideración en el presente informe, se abordarán los métodos que permitirán arrojar cifras concretas que se traducen en el beneficio ambiental esperado bajo el proceso de reconversión de la Estación Acacias de Ecopetrol.

## 5 PLANTEAMIENTO DE ESTRATEGIAS CLAVES PARA LA MEDICIÓN DE INDICADORES

El presente capítulo permite abordar métodos o estrategias para la medición de los indicadores previamente estipulados tal y como se muestra a continuación.

### 5.1 Emisión de dióxido de carbono equivalente por tonelada de acero al carbón producido

Las industrias siderúrgicas se consideran hoy en día como la tercera mayor industria emisora de dióxido de carbono es por ello que, cuantificar con precisión las emisiones de este gas contaminante es la base para el ahorro de energía y reducción de emisiones (Zhao, Zuo, She, Wang, & Wang, 2018).

Antes de establecer el modelo de análisis para poder determinar la huella de carbono por tonelada de acero al carbón producido es importante determinar 3 momentos cruciales en el proceso de fabricación de este tipo de material: El consumo de combustibles fósiles ( $E_{fos}$ ) y el consumo de carbón en este proceso de producción industrial ( $E_{flu}$ ) y finalmente el secuestro parcial de productos de carbono ( $E_{seq}$ ) que son retenidos también en el desarrollo de este proceso de fabricación. A cada una de estas etapas se les asocia una emisividad particular de dióxido de carbono y es a partir de estas que se calcula la cantidad total de dióxido de carbono emitido ( $E_{CO_2}$ ) en la fabricación de acero al carbón (Zhao, Zuo, She, Wang, & Wang, 2018) y que se simplifica en la siguiente correlación:

#### Ecuación 1

*Determinación de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de acero al carbón.*

$$E_{CO_2} = E_{fos} + E_{flu} - E_{seq}$$

**Nota.** Atlantis Press- Advances in Engineering Research.

Teniendo en cuenta esta consideración, para determinar cada uno de estos factores se tienen las siguientes correlaciones:

### Ecuación 2

*Determinación del consumo de combustibles fósiles.*

$$E_{fos} = \sum_{i=1} (A_i * EF_i)$$

**Nota.** Atlantis Press- Advances in Engineering Research

Donde  $A_i$  es el consumo aparente de combustibles fósiles por unidad de producto (kg) y  $EF_i$  es el factor de emisión de dióxido de carbono (kg CO<sub>2</sub>/kg).

### Ecuación 3

*Determinación del consumo de carbón.*

$$E_{flu} = A_{li} * EF_{li} + A_{do} * EF_{do} + \sum_{i=1} (A_{ci} * EF_{ci})$$

**Nota.** Atlantis Press- Advances in Engineering Research

Donde  $A_{li}$ ,  $A_{do}$  y  $A_{ci}$  son el consumo de calisa, dolomita y carbonosos respectivamente mientras que  $EF_{li}$ ,  $EF_{do}$  y  $EF_{ci}$  son los factores de emisión respectivamente.

Finalmente,

### Ecuación 4

*Determinación del secuestro parcial de productos de carbono.*

$$E_{seq} = A_{sp} * EF_{sp} + A_{oi} * EF_{oi}$$

**Nota.** Atlantis Press- Advances in Engineering Research

Donde  $A_{sp}$  y  $A_{oi}$  son las masas de acero y hierro producidos fuera de sitio respectivamente, mientras que  $EF_{sep}$  y  $EF_{oi}$  son los factores de emisión respectivamente.

Bajo esta perspectiva y siguiendo una metodología similar la empresa NOV, muestra ciertos indicadores sobre los que aproxima la producción de acero al carbón por kilómetro de las tuberías que ellos fabrican y ofertan en el mercado en el artículo “A Pipe Comparison Carbon Footprint Study.” Los resultados muestran cifras contundentes y dichos valores numéricos pueden ser extrapolados al caso práctico expuesto en este proyecto para la determinación de emisiones de dióxido de carbono sobre el material de acero que se pretende cambiar tal y como se muestra en la **Tabla 4**:

**Tabla 5**

Especificaciones de emisividad de dióxido de carbono de tubería de acero al carbón.

	SCHEDULE		
	40	80	XXS
<b>Emisiones totales (Toneladas CO<sub>2</sub>/ km)</b>	151	250	354

**Nota.** A Pipe Comparison Carbon Footprint Study -NOV

Teniendo en cuenta esto, es posible remitirse a los valores de la tabla 4 dados en unidades de toneladas de CO<sub>2</sub> por cada kilómetro de acero y se hace la conversión a toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de acero tal y como se muestra a continuación:

- Cédula 40:

$$\frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton acero}} = 151 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{km acero}} * \frac{1\text{km acero}}{79.7\text{Ton acero}} = 1.89 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton acero}}$$

- Cédula 80:

$$\frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton acero}} = 250 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{km acero}} * \frac{1\text{km acero}}{132.1\text{Ton acero}} = 1.89 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton acero}}$$

- Cédula XXS:

$$\frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton acero}} = 354 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{km acero}} * \frac{1 \text{km acero}}{187 \text{Ton}} = 1.89 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton acero}}$$

Es importante tener en cuenta que la densidad ( $7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ) y los pesos para cada una de las cédulas fueron extraídas del documento “A Pipe Comparison Carbon Footprint Study” de la empresa NOV. Bajo los resultados después de la conversión es posible asumir una cifra con una tendencia lineal y constante de  $1.89 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton de acero}}$ , razón por la cual no es necesario realizar la extrapolación y se toma este como el factor de emisión con el cual será posible hallar los valores numéricos para este indicador.

## 5.2 Emisión de dióxido de carbono equivalente por tonelada de fibra de vidrio producido

De manera similar al caso del acero al carbón, se contemplan los mismos factores que en las correlaciones anteriormente mencionadas, sin embargo, es válido afirmar que para la producción de un kilómetro de tubería de epoxi reforzada con fibra de vidrio (con un contenido nominal de fibra de vidrio del 70%) se espera hasta un 31% menos del requerimiento de energía para producir y, posteriormente, reducir hasta un 31 % menos la producción de CO<sub>2</sub> con respecto a la tubería de acero al carbón cédula 40 (Friedrich, Chiu, & Herbert, 2020).

De acuerdo a esto, el artículo de la empresa NOV (“A Pipe Comparison Carbon Footprint Study”) sugiere que para este tipo de material con propiedades muy similares a las instaladas en el proyecto de reconversión para la estación es de  $104 \frac{\text{Ton de } CO_2}{\text{km}}$ .

Teniendo en cuenta esto nos es posible remitirse a los valores de emisividad anteriormente proporcionados en unidades de toneladas de CO<sub>2</sub> por cada kilogramo de



plástico y hacemos la conversión de CO<sub>2</sub> por cada kilogramo de plástico tal y como se muestra a continuación:

$$\frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton } \textit{plastico}} = \frac{104 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{km } \textit{plastico}} * \frac{1\text{km}}{1000\text{m}} * \frac{1\text{m } \textit{plastico}}{0.06\text{m}^3 \textit{plastico}}}{1140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1\text{Ton}}{1000\text{kg}}} = 1.52 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton } \textit{plastico}}$$

Es importante tener en cuenta que la densidad ( $1140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ) del plástico fue extraída de la ficha técnica DERAKANE™ MOMENTUM 411-350 Resina Epoxi Viniléster. El dato numérico  $1.52 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{Ton } \textit{plastico}}$  se toma este como el factor con el cual será posible hallar los valores numéricos para este indicador.

### 5.3 Emisión de dióxido de carbono equivalente por kwh de energía producido

Para poder llegar a determinar la emisión de dióxido de carbono equivalente por kWh de energía producido hay que tener en cuenta que esto puede variar dependiendo del tipo de combustible que se utilice en el sistema de potencia o generador. El dióxido de carbono que se produce por kWh en un periodo de tiempo puede llegar a variar también según las fuentes de electricidad que suministran a la red eléctrica en dicho periodo de tiempo establecido. Por lo tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la electricidad y los factores de emisión de CO<sub>2</sub> variarán cada hora, día, mes y año (Information Energy Administration (IEA), 2020).

Por esta razón, son diversos los factores de emisividad que se consideran para poder llegar a determinar un dato contundente que permita incluir este cálculo. La agencia de protección ambiental (EPA) sugiere que este factor es de aproximadamente  $4.33 \cdot 10^{-4}$  Ton CO<sub>2</sub>/ kWh (Environmental Protection Agency (EPA), 2021). Por otro lado, la IEA en su último reporte publica que este factor es de 0.82lb CO<sub>2</sub>/ kWh (Information Energy Administration (IEA), 2020) y el RenSmart sugiere un factor de conversión de 0.233 Kg CO<sub>2</sub>/ kWh considerando una fuente de generación libre de carbono (RenSmart, 2021).

Finalmente, en el artículo anteriormente citado de la empresa NOV “A Pipe Comparison Carbon Footprint Study” para el cálculo de las emisiones por kilómetro de tubería de acero al carbón se asumió un factor de  $7.09 \cdot 10^{-4}$  Ton CO<sub>2</sub>/ kWh.

Para el caso práctico del presente proyecto, se tendrá en cuenta la cifra promulgada por la agencia de protección ambiental (EPA) a través de la utilización de la herramienta virtual que ellos ofrecen y cuya interfaz se puede observar en la **Figura 4**:

**Figura 4**

*Herramienta virtual para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> por kWh generado.*

The screenshot shows a web-based calculator interface. At the top, it says "Select data to convert:" followed by an information icon. There are two radio button options: "Energy data" (which is selected) and "Emissions data". Below this is the "Enter data:" section. It has two columns: "Unit" and "Amount". Under "Unit", there are six radio button options: "Gallons of gasoline", "Gasoline-powered passenger vehicles" (with an info icon), "Kilowatt-hours avoided" (with an info icon), "Kilowatt-hours used" (which is selected), "MCF of natural gas", and "Therms of natural gas". The "Amount" column has a text input field containing the number "1". At the bottom, there are two buttons: a blue "Convert data" button and a grey "Clear Fields" button.

**Nota.** Agencia de Protección Ambiental (EPA).

Es importante tener en cuenta que esta calculadora usa promedio nacional (Estados Unidos) de factores de emisión para la generación de electricidad. Adicionalmente a esto, esta calculadora no incluye las posibles pérdidas de energía y no incluye gases de efecto invernadero que no sean CO<sub>2</sub>.

Finalmente, esta herramienta asocia esta emisión con otro tipo de indicadores y con el equivalente de los gases de efecto invernadero reportados relacionados a: Vehículos a gasolina conducidos durante un año, millas recorridas por un vehículo a gasolina promedio, galones de gasolina y diesel consumidos, libras de carbón quemado, barriles de petróleo consumidos, cantidad de teléfonos inteligentes cargados, entre otros.

#### **5.4 Consumo de energía eléctrica de los nuevos sistemas hidráulicos o bombas que se van a implementar**

El ahorro de energía fomenta la reducción de gastos y disminuye el impacto ambiental en la generación de gases de efecto invernadero por kWh generado. Este representa unos de los principales objetivos ambientales estratégicos de Ecopetrol en términos de disminución de carga eléctrica y sin lugar a dudas permite el desarrollo operativo en campo de una manera más sostenible.

Para el cálculo específico del consumo de energía eléctrica de los nuevos sistemas hidráulicos involucrados en el proceso de masificación tecnológica de la Estación Acacias se va a relacionar este consumo con la potencia útil del motor de las bombas a ser instaladas. La eficiencia es aquel factor que nos indica el máximo rendimiento de una máquina que al ser multiplicado por la potencia teórica del equipo obtenemos la verdadera potencia utilizable o gasto energético tal y como se muestra en la siguiente correlación:

##### **Ecuación 5**

*Determinación de la potencia utilizable (kWh).*

$$P_u = P_T * e$$

**Nota.** Potencia y eficiencia mecánica-Academia.

En donde “Pu” es la potencia utilizable, “Pt” es la potencia teórica y “e” es la eficiencia. Para el presente estudio, es importante tener en cuenta la potencia y la eficiencia

hidráulica que será el valor que tomará la variable “Pt” en la correlación anteriormente enunciada. Finalmente podemos expresar este consumo de energía en unidades de kilovatio-hora (kWh) a partir del tiempo de funcionamiento en el cual van a operar las bombas una vez sean instalados y empiecen su operatividad.

## 5.5 Índice de circularidad

Para la intervención técnica que se tiene proyectada en la Estación Acacias se ha instalado un modelo de circularidad que permite que el flujo de ciertos materiales, específicamente el de acometidas eléctricas ingresen nuevamente al sistema de suministro para que, en vez de desecharlos, estos puedan ser nuevamente utilizados disminuyendo graves problemas ambientales.

Mediante la economía circular se ofrece ventajas de oportunidades preservando y restaurando capital, se extiende la vida útil y el aumento del uso de ciertos productos o materiales y finalmente la reducción de la pérdida de residuos y de recursos naturales como el suelo, el aire y el agua.

El índice de circularidad, se obtiene a partir de dos parámetros,  $\alpha$  y  $\beta$ , los cuales son calculados a partir de las siguientes correlaciones:

### Ecuación 6

*Parámetro alfa del índice de circularidad.*

$$\alpha = \frac{T_R}{T_D}$$

**Nota.** Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie

y,

## Ecuación 7

Parámetro beta del índice de circularidad.

$$\beta = 1 - \frac{E_R}{E_P}$$

**Nota.** Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie

Donde  $T_R$  es la cantidad de material recuperado en el fin de vida de los productos,  $T_D$  la cantidad de material demandada,  $E_R$  la energía necesaria para la recuperación o reciclaje del material y  $E_P$  la energía necesaria para la producción del material primario (Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie, 2018).

Para este parámetro es válido mencionar que  $E_R$  es la energía asociada al procedimiento mecánico en el cual el material se recoge de manera manual a través de la contratación de mano de obra de operadores sobre el que se tendrá en cuenta el gasto energético del personal técnico encargado del reciclaje del material específico.

Este indicador permite determinar la recuperación final del material donde beta es la relación energética entre el reciclaje del material y la producción de este a partir de materia prima virgen. Alfa se obtiene de los valores de flujo macro del material. Finalmente, este indicador se obtiene a partir del producto de estos dos parámetros ( $IC = \beta * \alpha$ ), entre más cercana a 1 sea la respuesta más ideal es el sistema circular.

Bajo estas premisas se pretende abordar el índice para los siguientes materiales que aplican para este indicador:

### 5.5.1. Cables

Para la Estación Acacias durante el proyecto de reconversión se pretende reutilizar para cada Sistema de Tratamiento de Agua una longitud específica de cable tipo 4, 2/0 y 4/0 que se van a aprovechar en las instalaciones eléctricas y ductos planeados durante la ejecución.

### **5.5.2. Tubería Conduit**

Actualmente las Para la Estación Acacias durante el proyecto de reconversión se pretende reutilizar para cada Sistema de Tratamiento de Agua una longitud específica de tubería conduit IMC 2 que se van a aprovechar en las instalaciones eléctricas y ductos planeados durante la ejecución.

### **5.5.3. Tubería de acero al carbón**

Para la Estación Acacias durante el proyecto de reconversión se pretende reutilizar para cada Sistema de Tratamiento de Agua una longitud específica de tubería de conexión mecánica de acero al carbón de diferentes diámetros y cédulas.

### **5.5.4. Obras Civiles (Concreto)**

Para la Estación Acacias durante el proyecto de reconversión se pretende reutilizar para cada Sistema de Tratamiento de Agua un volumen específico de concreto que ya se encuentra instalado para el montaje de estructuras en lo que se refiere a las nuevas bombas y/u otro tipo de apoyos o soportes.

Una vez fijados los métodos para calcular los indicadores anteriormente establecidos, con la información que se dispone es posible determinar el valor numérico para cada uno de los indicadores, sin embargo, esto no corresponde al alcance de la presente investigación.

## 6 CONCLUSIONES

- A partir del presente estudio es posible determinar que la reconversión tecnológica planteada resulta ser una alternativa ambiental potencialmente viable sobre la cual se estima reducir casi un 50% a huella de carbono mediante la implementación de nuevos equipos y procedimientos más sostenibles.
- Dentro de lo proyectado, la implementación de la fibra de vidrio en remplazo del acero al carbón y la reducción en términos de consumo energético mediante la instalación de las nuevas bombas de generación de microburbuja son los factores que mayor peso tienen dentro de la reducción de la huella de carbono.
- A partir de los indicadores fijados por el IDEAM fue posible establecer una matriz que arroja 5 indicadores clave y potencialmente medibles para la reconversión tecnológica proyectada en la Estación Acacias. Estos indicadores se alinean dentro del alcance técnico de la intervención y dentro de los principios de economía verde fijados por Ecopetrol.
- De manera general, es posible establecer que las mediciones de estos indicadores se llevarán a cabo mediante la implementación de factores de emisión hallados en las fuentes bibliográficas y herramientas virtuales con un input de datos previamente calculados. Por otro lado, para el índice de circularidad se tiene en cuenta una correlación a partir del producto de dos parámetros ya definidos.
- A través de este tipo de intervenciones técnicas, Ecopetrol de la mano de sus objetivos de desarrollo sostenible y principios de economía verde puede llegar a la meta establecida de cero emisiones para el año 2050 tal y como se tiene trazado como meta.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio, es posible afirmar que existen numerosas maneras de calcular indicadores ambientales, esto debido a la creciente preocupación por el cambio ambiental que atraviesa el mundo en la actualidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2016). *EITI Colombia*. .  
<https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/produccion/fiscalizacion/>
- Arno, B., Katja, T., & Vasileios, R. (8 de Abril de 2017). The Circular Economy: A review of definitions, processes and impacts. *CEPS Papers*, 2.
- Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie. (2018). *Indicadores De Circularidad Del Aluminio, PVC Y Madera*. Informe Expositivo, Madrid. .  
[https://www.asoc-aluminio.es/support/pdf/Informe\\_IC\\_FINAL.pdf](https://www.asoc-aluminio.es/support/pdf/Informe_IC_FINAL.pdf)
- BYJU'S. (2018). *Global Warming Definition*. . <https://byjus.com/biology/global-warming/>
- BYJU'S. (2021). *Electric Power*. . <https://byjus.com/physics/electric-power/>
- Cevahir, A. (2017). Glass Fibers. *ResearchGate*, 3. doi:10.1016/B978-0-08-101871-2.00005-9
- Collins Dictionary. (2022). *Definición de indicador*. .  
<https://www.collinsdictionary.com/es/diccionario/ingles/indicador>
- Conserve Eenergy Future. (2020). *Is Fiberglass Recyclable?* . <https://www.conserve-energy-future.com/is-fiberglass-recyclable.php#:~:text=So%20fiberglass%20has%20a%20lesser,on%20the%20environment%20than%20fiberglass.>
- de Beus, N., Carus, M., & Barth, M. (2019). *Renewable Carbon News*. . <https://renewable-carbon.eu/news/natural-fibres-show-outstandingly-low-co2-footprint-compared-to-glass-and-mineral-fibres/>
- Doushanov, D. L. (2018). Control Of Pollution In The Iron And Ssteel. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, 3, 5. . <https://www.eolss.net/sample-chapters/C09/E4-14-04-04.pdf>
- Ecometrica Press. (2018). What is a carbon footprint?
- Energy Information Administration (EIA). (11 de 4 de 2021). *How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U.S. electricity generation?* .  
<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11#:~:text=In%202020%2C%20total%20U.S.%20electricity,CO2%20emissions%20per%20kWh.>



- Environmental and Energy Study Institute. (2021). *Energy Efficiency*. .  
<https://www.eesi.org/topics/energy-efficiency/description>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References*. .  
<https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>
- Friedrich, R., Chiu, A., & Herbert, B. (2020). *A Pipe Comparison Carbon Footprint Study*.
- GALQUI SAS. (2022). *Catálogo – Sistema de Microburbuja*. Informe Comercial, Bogota.
- Gil, C. G. (2017). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Informe Educativo, España. .  
[https://www.cvongd.org/ficheros/documentos/ods\\_revision\\_critica\\_carlos\\_gomez\\_gil.pdf](https://www.cvongd.org/ficheros/documentos/ods_revision_critica_carlos_gomez_gil.pdf)
- Growcom, A. J. (2018). *What is a Carbon Footprint? An Overview of definitions and methodologies*. Australia: HAL.  
doi:[https://www.daf.qld.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0003/59025/Hort-Fruit-Drought-Carbon-Report1.pdf](https://www.daf.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/59025/Hort-Fruit-Drought-Carbon-Report1.pdf)
- Hekkert, M., Reike, D., & Kirchherr, J. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *ScienceDirect*, 127, 221-232.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- Information Energy Administration (IEA). (2020). *CO2 emissions*. .  
<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/co2-emissions>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) Colombia*. Informe Expositivo, Bogotá. .  
[http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla\\_INGEI.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2017). *Emisiones Netas de Gases de Efecto Invernadero per cápita*. Hoja Metodológica, Bogotá. .  
<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/641368/2.09+HM+Emisiones+GEI+percapita.pdf/5ff85e27-1a84-4f23-92fe-5d5e26dc1537#:~:text=El%20indicador%20de%20Emisiones%20Netas,un%20periodo%20de%20an%C3%A1lisis%20determinado>.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2020). *Demanda de Agua en el Sector Manufacturero*. .  
<http://www.ideam.gov.co/web/siac/demandaagua>
- Islam, T., & M.M.A. Rashed, H. (2019). Classification and Application of Plain Carbon Steels. *ResearchGate*. doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.10268-1
- Kamczyc, A. (2021). *World Steel Association releases paper on CO2 emission reduction*. Ohio: Recycling Today Media Group.
- Karger, B. L. (2022). *Britannica*. . <https://www.britannica.com/science/separation-and-purification/Separations-based-on-equilibria>
- Laird, C., & Verhappen, I. (2012). *Fundamental Of Analytical Chemistry - Chapter 25 - Chemical Analysis: Gas Analysis* (Vol. 5). Boca Raton: CRC Press LLC.
- Larson, A. (2018). *Produced Water: Oil and Gas Terminology Glossary*. Water Environment Federation. . <https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2017-fs-013-iwwc-og-glossary---final---5.21.18.pdf>
- Leon Velez, A., & Guillen-Mena, V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construído*, 20(3), 611-625. .  
<https://www.scielo.br/j/ac/a/5grH7jKxgRq48Fr9jdFLXYr/?format=pdf&lang=es>
- Manning, N. (2019). Hydraulic Pumps. *ResearchGate*, 225-261. doi:10.1002/9781119418528.ch5
- Mirza, F., Sinha, A., Rehman Khan, J., Kalugina, O., & Zafar, M. (2022). Impact of energy efficiency on CO2 Emissions: Empirical evidence from developing countries. *Science Direct*(106), 64-77. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.11.017>
- Mondol, S. S. (Febrero de 2016). A Review of Steelmaking Technologies. *ResearchGate*, 283-286.
- Pandey , J., Agrawal, M., & Pandey, D. (2011). Carbon footprint: current methods of estimation. *Springer Link*, 135-160. doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>
- Rahman, M. I.-u. (2013). Climate Change: a Theoretical Review. (Hrčak, Ed.) *ResearchGate*, 13. doi:10.7906/indecs.11.1.1

- RenSmart. (2021). *UK CO<sub>2</sub>(eq) emissions due to electricity generation*. .  
<https://www.rensmart.com/Calculators/KWH-to-CO2>
- Schlumberger. (2022). *Oilfield Glossary*. .  
<https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/h/hydrocarbon>
- Teba, C. (2021). *Dexma*. . <https://www.dexma.com/blog-en/energy-consumption-definition/>
- TheFreeDictionary. (s.f.). *Flow Rate*. . <https://www.thefreedictionary.com/flow+rate>
- Vargas Pineda, O., Trujillo González, J., & Torres Mora, M. (2017). La economía verde: un cambio ambiental. *DialNet*, 8(2), 12.
- Wallenberger, F. T. (2010). Commercial and Experimental Glass Fiber. *ResearchGate*.  
doi:10.1007/978-1-4419-0736-3\_1
- Zhao, Y., Zuo, H., She, X., Wang, G., & Wang, J. (2018). Key factors of CO<sub>2</sub> emission analysis in iron and steel mill. *Atlantis Press*(163), 6.  
doi:<https://doi.org/10.2991/iceesd-18.2018.313>

## GLOSARIO

**Acero al carbón:** es el grupo más importante de aleaciones de metal versátil hecha de carbono y de acero en todas las ramas de la ingeniería con una gran aplicación en función de los procesos y las necesidades. (Islam & M.M.A. Rashed, 2019)

**Agua de producción:** el agua de producción es el agua asociada durante la producción de crudo cuando sale del pozo. (Larson, 2018)

**Bombas hidráulicas:** las bombas hidráulicas son la fuente principal de energía de los sistemas hidráulicos, estas pueden traer diferentes configuraciones de acuerdo a las necesidades de los diferentes sistemas. (Manring, 2019)

**Calentamiento global:** se define como el incremento gradual de la temperatura en la tierra debido principalmente a la emisión de los gases de efecto invernadero. (BYJU'S, 2018)

**Cambio climático:** es sin duda alguna, el problema medioambiental más ilustre desde finales del siglo XX el cual hace referencia a los cambios de temperatura por los cuales atraviesa el planeta. (Rahman, 2013)

**Caudal:** es la cantidad de fluido que fluye en un medio en un tiempo dado. (TheFreeDictionary, s.f.)

**Consumo energético:** se refiere a la cantidad de energía utilizada para realizar una acción o fabricación de algún producto específico. (Teba, 2021)

**Economía circular:** el concepto de economía circular describe aquel sistema económico que se basa en el fin del concepto de “vida útil” con reutilización y reciclaje de materiales en los procesos de producción/distribución. (Hekkert, Reike, & Kirchherr, 2017)

**Fibra de vidrio:** es aquel material formado a partir de fundidos y se fabrican en varias composiciones cambiando las materias primas como arena por sílice, arcilla por alúmina, calcita por óxido de calcio y colemanita por óxido de boro. (Cevahir, 2017)

**Fiscalización del crudo:** es el conjunto de actividades y procedimientos que se llevan a cabo para garantizar el cumplimiento de las normas y de los contratos de exploración y explotación de recursos naturales no renovables, la determinación efectiva de los volúmenes de producción y la aplicación de las mejores prácticas de exploración y producción. (Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), 2016)

**Gases de efecto invernadero:** se define gas de efecto invernadero a cualquier gas con la capacidad de absorber radiación infrarroja emitida desde la superficie de la Tierra y volver a irradiarla a la superficie de la Tierra. (Laird & Verhappen, 2012)

**Hidrocarburo:** Es aquel compuesto orgánico natural que tiene hidrógeno y carbono. Pueden ser simples como el metano (CH<sub>4</sub>) pero puede presentarse en moléculas altamente complejas. (Schlumberger, 2022)

**Huella de carbono:** es el conjunto total de emisiones de gases de efecto invernadero causados directa o indirectamente por un individuo, organización, evento o producto. (Ecometrica Press, 2018)

**Indicador:** es la medida o el valor que da una idea del estado o avance de algo. (Collins Dictionary, 2022)

**Microburbuja:** burbujas de gas que tienen un menor tamaño que una burbuja de tamaño convencional (1mm). Se genera por presión negativa que succiona aire y lo mezcla con agua con una descarga presurizada enriquecida con aire. (GALQUI SAS, 2022)

**Objetivos De Desarrollo Sostenible:** estos objetivos contienen la agenda global más ambiciosa aprobada por la comunidad internacional para movilizar la acción colectiva en torno a objetivos comunes. (Gil, 2017)

**Potencia eléctrica:** es una medida que permite cuantificar cuanta energía se utiliza en un periodo de tiempo cuyas unidades por lo general son los Joules por segundo. (BYJU'S, 2021)

**Reconversión industrial:** ajuste y masificación tecnológica a los procesos operativos y técnicos actuales.

**Separación:** en química, separación se define como la separación de una sustancia en sus componentes y la remoción de sus impurezas. Existe una amplia aplicación de estas técnicas como en campos de medicina, manufactura, etc. (Karger, 2022)