

Monografía: Sistema De Captura De CO<sub>2</sub> En Emisiones De Industria En Procesos  
Pirometalúrgicos

Joely M. Ayala Viloría, Yoseth Y. Sanchez Bacca

Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Ingeniero Metalúrgico

Director

Walter Pardavé Livia

Master en Ecoauditorías

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria.**

Este trabajo está dedicado a mi mamá Dolia Maria Bacca Cardenas, por ser la mejor persona que conozco, gracias por su amor incondicional, y todo su apoyo, la amo con mi vida y cada logro que yo cumpla es gracias a ella.

Mi hermana Deily Dayana Sanchez Bacca, por ser el motor de mi vida y la razón para seguir creciendo como persona y como profesional, por ser mi ejemplo directo y mi orgullo más grande, te amo infinitamente.

A mis sobrinitas, Salome y Emma esto es para ustedes, espero que se sientan orgullosas en cada acción que hago y de cada versión de mí. A mi abuela Candida, espero cumplirle muchas más promesas.

Finalmente dedico este trabajo a todos los estudiantes foráneos, por hacer a un lado toda su vida para seguir sus sueños, mi respeto y admiración a todos.

***Yoseth Yair Sanchez Bacca.***

Este trabajo va dedicado a mi mamá, Iveth Viloría Amarís, por su apoyo y gran amor. Gracias por nunca haber dudado que lo lograría.

A Andrés, por su amor, paciencia y por ser creyente de cada uno de mis pasos.

Finalmente, este trabajo va dedicado a mí, a mi fuerza, mi valentía y mi resiliencia.

***Joely Ayala Viloría***

### **Agradecimientos**

Quiero agradecer principalmente a Dios, el universo, las energías y todo lo que es superior a mí, por darme las ganas necesarias para seguir luchando cada día por mis sueños, agradezco al Yoseth que se atrevió a correr detrás de sus metas y al que día a día sigue haciéndolo, a la Universidad Industrial de Santander, Residencias UIS y todos mis compañeros de casa, gracias a ustedes esto es posible. A mi familia, por haber hecho parte de todo mi crecimiento personal, y ser partícipes de todos mis logros, a todos mis primos, este logro es de todo nuestro, agradezco especialmente a mi mamá Dolia, mi hermana Deily, mis amigas: Viviana y Silvia por estar presente en toda mi etapa universitaria. A mis amigos por acompañarme en este proceso, David, Daniela, Valentina por estar en cada paso y a Natalia y Mariana por estar conmigo a pesar de la distancia, a Jhonatan y Laura por hacerme parte de sus familias, ustedes también hacen parte de la mía. A mi compañera Joely, agradezco a la vida por hacernos coincidir desde el inicio hasta el fin de nuestras carreras universitarias y al Profesor Walter Pardavé por su apoyo como director.

***Yoseth Yair Sánchez Bacca.***

Quiero agradecerle a Dios por haber estado presente en este proceso, por su enseñanza, por haberme dado la fuerza necesaria para continuar en este proceso y por demostrarme que todo era necesario para crecer; a mi mamá, por haberme apoyado en este proceso desde el inicio. Mi más sincero agradecimiento a Andrés, por su apoyo y presencia en todos los aspectos posibles, por haber sido mi compañero incondicional. Finalmente quiero agradecerle a mi compañero Yoseth, por haberme brindado su compañía a lo largo de toda mi carrera, y al Profesor Walter Pardavé por su enseñanza como maestro.

***Joely Ayala Vilorio***

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
2. Influencia de la producción pirometalúrgica en el medio ambiente .....	14
2.1 Gases de combustión.....	15
2.2 Gases sulfurados .....	17
2.3 Polvo y partículas sólidas.....	18
2.4 Vapores metálicos y de agua.....	19
2.5 Emisiones de arsénico y otros elementos Tóxicos.....	19
2.6 Compuestos volátiles orgánicos.....	19
2.7 Emisiones de carbono .....	20
3. Clasificación de las emisiones en los procesos pirometalúrgicos.....	21
3.1 Procesos pirometalúrgicos .....	21
3.2 Relación de los procesos pirometalúrgicos con las emisiones generadas.....	22
3.3 Caracterización química de las emisiones .....	24
4. Técnicas de captura de emisiones .....	24
4.1 Captura precombustión .....	25
4.2 Captura Postcombustión .....	29

4.3 Captura Oxicombustión: .....	31
4.4 Otros sistemas y tecnologías .....	32
5. Ejemplo de balance de materia .....	34
6. Matriz de Comparación.....	35
7. Conclusiones generales .....	36
Referencias Bibliografía .....	38

**Lista de Tablas**

	<b>Pag</b>
Tabla 1. Relación de los procesos con las emisiones.....	22
Tabla 2. Caracterización química de las emisiones .....	24
Tabla 3. Ventajas y desventajas precombustión .....	32
Tabla 4. Ventajas y desventajas postcombustión.....	33
Tabla 5. Ventajas y desventajas oxicomustión. ....	33
Tabla 6. Comparación de tecnologías de captura .....	35
Tabla 7. Matriz de selección. ....	36

**Lista de Figuras**

	<b>Pag</b>
Figura 1. Diagrama de descomposición de combustibles fósiles .....	25
Figura 2. Diagrama de precombustión.....	27
Figura 3. Diagrama de gasificación .....	28
Figura4. Diagrama de absorción química. ....	29
Figura 5. Diagrama de absorción física. ....	30
Figura 6. Diagrama de oxidación.....	31
Figura7. Diagrama de balance de masa. ....	34

### Glosario

**Emisiones de CO<sub>2</sub>:** se refieren a la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera, principalmente derivada de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, deforestación y procesos industriales, contribuyendo al cambio climático.

**Flujogramas:** son representaciones gráficas que describen procesos, en este contexto, podrían ilustrar visualmente cómo se capturan y gestionan las emisiones de gases de efecto invernadero en diversos sistemas y actividades.

**Gases de efecto invernadero:** los gases de efecto invernadero son sustancias que se acumulan en la atmósfera haciendo que la radiación solar quede retenida, favoreciendo al calentamiento global.

**Operaciones Pirometalúrgicas:** las operaciones pirometalúrgicas consisten en la producción de metales a partir de minerales por medio del uso de altas temperaturas, algunas de estas operaciones son la calcinación, fusión y reducción de minerales.

**Sistemas de captura:** se relacionan con tecnologías diseñadas para atrapar y almacenar emisiones de gases de efecto invernadero, ayudando a reducir su liberación a la atmósfera y mitigar el impacto climático.

### Resumen

**Título:** Sistema De Captura De CO<sub>2</sub> En Emisiones De Industria En Procesos Pirometalúrgicos\*

**Autores:** Joely M. Ayala Vilorio, Yoseth Y. Sanchez Bacca \*\*

**Palabras clave:** Flujograma, gases de efecto invernadero, pirometalurgia, sistemas de captura

La pirometalurgia es uno de los procesos más usados en la industria metalúrgica, dado que a partir de ella se obtienen la gran mayoría de metales que se usan actualmente, sin embargo, por su alta demanda en la industria, la implementación a gran escala ha tenido un impacto ambiental significativamente desfavorable. Estos procesos generan gases contaminantes, que en su mayoría se sitúan en la atmósfera, siendo partidario de los gases de efecto invernadero. Teniendo en cuenta que el gas contaminante que se produce en mayor proporción es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), surge la necesidad de generar sistemas de capturas de dicho gas en industrias con procesos pirometalúrgicos, es por ello, que se concretó un estado del arte de los sistemas de captura de CO<sub>2</sub> en industrias con procesos pirometalúrgicos mediante series cronológicas y evolución de procesos y producción. En la presente investigación se expone una revisión bibliográfica, que reúne información acerca de las emisiones en las industrias de pirometalurgia y de los sistemas de captura de CO<sub>2</sub>. Posteriormente, se clasificaron y se caracterizaron las emisiones encontradas y los sistemas de captura por medio de matrices de similaridad con el fin de seleccionar los sistemas más compatibles con los procesos pirometalúrgicos. Finalmente, haciendo uso de herramientas de cálculo y diseño, se crearon flujogramas con balance de materia, aplicando los sistemas de captura seleccionados; por medio de los cuales se determinó cuál es el proceso de mayor efectividad para su implementación y mayor captura de CO<sub>2</sub>.

---

\* Trabajo de Grado: Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardave Livia. Máster en Ecoauditorías.

**Abstract****Title:** CO<sub>2</sub> Capture System in Emissions from Pyrometallurgical Industrial Processes**Authors:** Joely M. Ayala Vilorio, Yoseth Y. Sanchez Bacca**Key words:** Capture systems, flowchart, greenhouse gases, pyrometallurgy

Pyrometallurgy is one of the most widely used processes in the metallurgical industry, since the vast majority of metals currently used are obtained from it; however, due to its high demand in the industry, large-scale implementation has had a significantly unfavorable environmental impact. These processes generate pollutant gases, most of which are placed in the atmosphere, being a supporter of greenhouse gases. Taking into account that the pollutant gas that is produced in greater proportion is carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), the need arises to generate capture systems of this gas in industries with pyrometallurgical processes, that is why a state of the art of CO<sub>2</sub> capture systems in industries with pyrometallurgical processes by means of chronological series and evolution of processes and production. In the present research, a bibliographic review is presented, which gathers information about emissions in pyrometallurgical industries and CO<sub>2</sub> capture systems. Subsequently, the emissions found, and the capture systems were classified and characterized by means of similarity matrices to select the most compatible systems with the pyrometallurgical processes. Finally, using calculation and design tools, flowcharts with material balance were created, applying the selected capture systems; by means of which it was determined which is the most suitable for the pyrometallurgical processes.

---

\*Degree work: Monograph

\*\*Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Supervisor: Walter Pardave Livia. Master in Ecoaudit.

## Introducción

Los humanos han buscado diversos métodos y herramientas que faciliten su evolución constante; la mayor parte de estas herramientas han estado fabricadas de metales, desde la antigüedad donde producían artículos para la caza con poca variedad de estos, hasta la actualidad que se utilizan diversos metales para la exploración espacial. Se puede incluso afirmar que los avances de la humanidad van ligados directamente con el descubrimiento y extracción de estos.

Los metales se pueden extraer de distintas formas: cuando se usan procesos eléctricos se denomina electrometalurgia, con el uso de líquidos se denomina hidrometalurgia y para el fuego o calor se denomina pirometalurgia, esta última siendo la más antigua pues el descubrimiento del fuego y la curiosidad humana permitieron que se extrajeran por primera vez los metales a partir de minerales. Además de ser la más antigua, la pirometalurgia también es una de las ramas más importantes de la metalurgia, debido a su posición en la industria; históricamente es la más usada para la extracción de metales como el hierro y cobre que son altamente demandados.

Sin embargo en estos procesos se liberan sustancias al ambiente, como se presenta en el estudio para determinar las emisiones de mercurio a nivel global realizado por Lars D. y Hylander,(2008) en el que expone las emisiones que se generaron y las regiones en donde a la fecha del estudio fue más crítica la presencia de las emisiones contaminantes, posicionando a Norteamérica en primer lugar y seguido de Sudamérica, con diferencias mínimas en las cantidades de algunas emisiones como en la producción de cobre, en donde Sudamérica genera más emisiones que Norteamérica. La investigadora Mile (2009) en su proyecto también habla de la influencia de los procesos pirometalúrgicos en el ambiente, más precisamente de la producción del cobre.

Por lo que se genera la necesidad de realizar investigaciones y buscar soluciones que permitan mitigar el impacto negativo que la industria produce con las emisiones de sustancias contaminantes; atendiendo a esta problemática se propone como alternativa los sistemas de captura de CO<sub>2</sub>, que generalmente se aplican a la producción de energía eléctrica o de hidrogeno, sin embargo existe la posibilidad de implementar las tecnologías de los sistemas de captura a la industria pirometalúrgica, cambiando el enfoque que actualmente tienen estas herramientas, buscando la manera más efectiva de aplicarlas y seleccionando las tecnologías que sean más compatibles con la industria de la pirometalurgia.

Estas investigaciones no solo beneficiarían a la industria pirometalúrgica haciendo que estos procesos sean menos contaminantes, sino que también abren paso a que se puedan adaptar este tipo de tecnologías a otros entornos en los que también se generan emisiones de gases contaminantes.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Realizar el estado de arte de los sistemas de captura de CO<sub>2</sub> de industrias con procesos pirometalúrgicos, mediante series cronológicas y evolución de procesos y productos.

### **1.2 Objetivos específicos**

Identificar la tipología y caracterización de emisiones generados en los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con la revisión de literatura científica.

Determinar los métodos, procesos y alternativas tecnológicas para la captura de CO<sub>2</sub> de emisiones de procesos pirometalúrgicos mediante revisión de literatura científica.

Proponer diversos flujogramas con balance de materia de sistemas de captura de CO<sub>2</sub> de emisiones de industrias con procesos pirometalúrgicos mediante literatura técnica.

## **2. Influencia de la producción pirometalúrgica en el medio ambiente**

Los procesos pirometalúrgicos son grandes generadores de gases contaminantes, esto se debe a la necesidad de obtener altas temperaturas, lo que se logra principalmente mediante la quema de combustibles fósiles, sin embargo, existen procesos que se realizan de manera masiva y aportan mayores cantidades de dichos gases, como lo es la producción de cobre, en el que se generan distintas sustancias, algunas gaseosas y contaminante, las cuales son liberadas directamente al ambiente.

El SO<sub>2</sub> producido por los humanos se debe a la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre (principalmente carbón y aceites pesados) y a la fundición de minerales que contienen azufre. En la ciudad de Bor (Serbia), se encuentra un lugar con la contaminación más alta de toda el área, este lugar es la planta de fundición de cobre, puesto que los minerales sulfúricos a base de cobre con alto contenido de FeS<sub>2</sub> (principalmente CuFeS<sub>2</sub>) están fundidos.

Las investigadoras Dimitrijević y Kostov (2007) desarrollaron este proyecto con el objetivo principal de representar los resultados de la medición continua de concentraciones de SO<sub>2</sub> y material particulado durante el año de la investigación en los lugares donde se detectó la mayor contaminación en la ciudad de Bor. Además, analizaron las razones y consecuencias de esta contaminación, así como el curso de su control.

En esta investigación se pudo concluir que la calidad del aire del ambiente en Bor fue baja durante el 2007. La población de la ciudad de Bor estuvo expuesta a las altas concentraciones de SO<sub>2</sub> y As, las cuales se encontraron por encima de los límites legislativos serbios. La parte más expuesta de la ciudad era el casco antiguo, el "Hospital de la Ciudad" y la zona industrial donde alrededor del 55% de la población vive y trabaja.

Como se evidencia en el anterior estudio, los procesos pirometalúrgicos generan cantidades significativas de emisiones sulfurosas, sin embargo, existen otros tipos de emisiones generadas por estos procesos, las cuales se dividen de la siguiente manera:

## 2.1 Gases de combustión

Los gases de combustión son aquellos gases que son liberados al momento de quemar un combustible mediante una energía de activación y haciendo uso de un comburente. La mayoría de los combustibles, están compuestos por Carbono (C), Hidrógeno (H), Azufre (S), humedad (H<sub>2</sub>O), cenizas, etcétera (García, 2001).

En la pirometalurgia existen diversos procesos en los que se producen los gases de combustión como en los hornos de fundición de reverbero y de escoria donde se usan quemadores para calentar el combustible y de esta manera ocurren las reacciones de combustión, también en los altos hornos y en los hornos de cuba, se inyecta aire a través de toberas que proporcionan el calor necesario para reacciones endotérmicas como la oxidación del coque, estos procesos generan CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO (Stephens, 2001).

Existen dos tipos de combustión, la primera y más idónea, es la combustión completa, donde se genera una oxidación total en los elementos que contribuyen al combustible, de la siguiente manera:

- Carbono CO<sub>2</sub>
- Hidrógeno H<sub>2</sub>O
- Azufre SO<sub>2</sub>
- Nitrógeno N<sub>2</sub>

La segunda y más contaminante, es la combustión incompleta, en la cual se producen lo que se le conoce como inquemados que son CO y H<sub>2</sub>.

Estas emisiones que se generan en ambos tipos de combustión poseen efectos contaminantes significativos desfavorables como lo son:

- ❖ Impacta la naturaleza de la atmósfera terrestre, como ejemplo más notorio, el efecto invernadero
- ❖ Contamina la salud humana, en el caso de una combustión incompleta se puede generar hasta la muerte.
- ❖ Deteriora la vida animal y vegetal.
- ❖ Ensucia y deteriora los materiales de los edificios, vehículos (García, 2001).

Cabe resaltar que una buena selección de combustible puede optimizar el desarrollo de la combustión.

- Contaminación debido al carbono

A lo largo de la aplicación de los procesos pirometalúrgicos, se realiza una quema de combustibles, como por ejemplo el coque o el carbón; esto se realiza con el fin de obtener y mantener las altas temperaturas requeridas para un óptimo desarrollo de dichos procesos. Cuando se realiza una quema de combustibles como el coque y el carbono y se obtiene una combustión completa, el carbono produce CO<sub>2</sub> como gas principal, el cual es uno de los gases responsables del efecto invernadero (García, 2001).

La contaminación por dióxido de carbono ha aumentado en los últimos años, por lo que surge la necesidad de hacer estudios y proyecciones de este fenómeno para el futuro, como es el caso del estudio realizado por Kulczycka (2015).

Dicho estudio se enfocó principalmente en realizar un análisis y discutir los impactos ambientales y recursos naturales, los beneficios y la viabilidad de una mitigación en los gases de efecto invernadero asociados con una transición a largo plazo a tecnologías de fundición pirometalúrgica más eficientes energéticamente para la producción de cobre refinado. Se realizó una comparación de las tecnologías propuestas, fundición KGHM Glogow I (tecnología A) y fundición flash OUTOKUMPU (tecnología B) y se realizó una proyección desde el 2010, fecha del estudio, al 2030 y 2050 en la que se propuso una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en los procesos pirometalúrgicos de hasta el 6% en cada uno de los intervalos propuestos. El proyecto concluyó que la tecnología B aportaría mejores resultados, sin embargo, se puede percibir que a la fecha las proyecciones realizadas no se cumplirán debido a la falta de aplicación de las tecnologías.

## **2.2 Gases sulfurados**

Por otro lado, la pirometalurgia también se aplica en minerales sulfurados, tal como los sulfuros de cobre o de hierro, lo cual lleva a que, en el azufre presente en los minerales, se forme en dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en estado gaseoso durante el proceso de tostación o fusión. Cuando este compuesto, entra en contacto con el agua de la atmósfera, causa la formación de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), el cual se condensa y al juntarse con gotas de lluvia ácida, de este modo se convierte en un gas perjudicial para la salud humana, al igual a las plantas y animales (García, 2001).

El SO<sub>2</sub> es el gas más contaminante que se presenta en los procesos pirometalúrgicos por lo que la búsqueda de tecnologías que ayuden a retener y de esta manera disminuir su emisión es de suma importancia. El investigador Seijas con la ayuda de otros investigadores (2017) tuvieron como objetivo producir monolitos de cenizas volantes absorbentes de gases nitrosos y sulfurosos procedentes de efluentes contaminantes y evaluar su capacidad de

retención. La muestra de cenizas se obtuvo de la caldera TSXG de la empresa Trupal, las cenizas se mezclaron con una solución de NaOH 3.9 M para de esta manera obtener el gel de alimentación, luego se formaron los monolitos utilizando alúmina como aglomerante posteriormente se introdujeron pequeñas cantidades de muestra en forma de pasta acuosa, luego se estudió la eliminación de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> en las muestras. Como conclusión se obtuvo que la combustión en la caldera donde se muestra una mayor eficiencia de combustión es cuando se empleó un exceso de aire. Por otra parte, se obtuvo que al emplear 6 gramos de monolito en la salida de la chimenea las concentraciones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> en las emisiones gaseosas son bajas. Para finalizar concluyeron que los monolitos producidos cumplen con la función de absorber gases nitrosos y sulfurosos.

Actualmente existen regulaciones y normas muy estrictas de las concentraciones de gases sulfurados en el ambiente, por lo que se han desarrollado numerosas formas de disminuir estas emisiones, muchas de las empresas en las que se producen gases sulfurados aplican estos métodos de disminución.

### **2.3 Polvo y partículas sólidas**

Como ya fue mencionado, en la pirometalurgia se encuentran varios procesos, entre los cuales, los procesos de trituración, molienda y fundición suelen producir pequeñas partículas inhalables de polvo, las cuales están compuestas de metales y otros compuestos. Estas partículas pueden ser arrastradas por el viento y dispersarse en el aire, lo que genera efectos adversos en la calidad del aire y la salud humana (García, 2001).

## **2.4 Vapores metálicos y de agua**

Para extraer el metal del mineral es preciso calentarlo de manera considerable, lo cual genera la evaporación de pequeñas cantidades del metal de interés y otros metales presentes en menor proporción en el mineral. Por otra parte, también se generan vapores de agua provenientes de la humedad y las partículas de agua presentes en la materia prima usada en el proceso de extracción de metal, todos estos vapores son liberados al ambiente, sin embargo, el agua evaporada no representa ningún impacto ambiental desfavorable.

## **2.5 Emisiones de arsénico y otros elementos Tóxicos**

En la corteza terrestre se pueden encontrar minerales los cuales contienen trazas de elementos tóxicos, como por ejemplo el arsénico, plomo y mercurio. Durante la pirometalurgia, estos elementos pueden volatilizarse y liberarse en forma de gases tóxicos.

Actualmente algunos metales como el cobre se extraen principalmente de minerales sulfurados. El proceso pirometalúrgico para la producción de cobre enfrenta desafíos de control de la contaminación, a medida que los recursos de cobre se vuelven más difíciles de conseguir el arsénico se encuentran con mayor facilidad en los concentrados de este cobre (Guo, et al, 2022).

## **2.6 Compuestos volátiles orgánicos.**

En la investigación que realizó Seijas con sus compañeros de investigación (2017) se expuso que una cantidad considerable de arsénico (compuesto orgánico) se volatilizó en el proceso de producción de cobre. El estudio se centró en hallar la eficiencia del metabolismo de los elementos con una perspectiva microcósmica, proporcionando una referencia para la mejora del proceso. Se realizó una comparación por medio de la aplicación SFA para determinar las cantidades de sustancias de emisiones en los procesos de producción de cobre en una empresa

o en un sistema con un alcance global o regional y otro proceso de producción más específico. Se analizó que la recuperación directa de cobre en los procesos de fundición, conversión y refinación fue de 91.96%, 97.13%, 99.47% respectivamente. Se concluye que la eficiencia de recursos del cobre para el proceso productivo es de 97.58%. También se obtiene que la cantidad de arsénico en el flujo de existencia es muy pequeña en comparación de los flujos de otras sustancias, una gran parte del arsénico fluye con los gases de combustión, la mayor parte del arsénico se volatiliza y se recoge en polvo lo que da como resultado un alto contenido de arsénico en el polvo de fundición.

A pesar de que el arsénico es una sustancia altamente tóxica, las cantidades que se emiten al aire son bajas, debido a que las partículas de arsénico se incorporan a los polvos generados en los procesos pirometalúrgicos. Si se utiliza una buena estrategia de retención de polvos en el proceso, el arsénico no representará un mayor impacto.

## **2.7 Emisiones de carbono**

De las emisiones generadas en procesos pirometalúrgicos, la que actualmente representa mayor impacto de manera negativa en el ambiente son las emisiones de carbono, esto se debe a la falta de regulación histórica para las emisoras de estos gases. La producción de los gases con contenido de carbono en la pirometalurgia se da en su gran mayoría por parte por la combustión presente al momento de la quema de combustibles fósiles, ya que, por excelencia es la forma de obtener energía en estos procesos. Por otra parte, también se generan grandes cantidades de emisiones carbono en los humos producidos y en las descargas de escoria y por la descomposición de algunos agentes de reducción que se usan en estos procesos (Akeeb, 2022).

### 3. Clasificación de las emisiones en los procesos pirometalúrgicos

Para que se pueda generar una clasificación de las emisiones en los procesos pirometalúrgicos, se debe hablar de cuáles y qué son dichos procesos.

#### 3.1 Procesos pirometalúrgicos

- **Reducción directa:** La reducción directa es un proceso pirometalúrgico que está enfocado en la obtención del hierro o acero, donde se reduce el mineral y se extrae de manera directa el metal por medio de la combustión de coque o carbono en el alto horno.

-**Fundición de cobre:** este proceso consiste en una fusión de concentrados de minerales con el fin de obtener cobre metálico, esto se logra con ayuda de un horno de fundición, se funden los concentrados y de esta manera separar el metal de otros elementos presentes.

-**Pirooxidación;** este proceso consta de someter minerales sulfurosos a altas temperaturas en presencia de oxígeno, con el fin de que se genere una oxidación en los sulfuros y se genera una liberación de gases como dióxido de azufre y óxido de nitrógeno.

-**Tostación:** este proceso tiene como utilidad eliminar componentes volátiles como el azufre, se logra mediante temperaturas elevadas de aire y haciendo un calentamiento de los minerales.

-**Reverberación:** el calor que se emplea tiene como objetivo realizar una fusión de concentrados de minerales como lo es el plomo, zinc o estaño en un horno de reverbero.

-**Flash:** con ayuda de altas temperaturas en un horno tipo flash, este proceso puede fundir minerales sulfurosos en tiempo muy cortos. Ideal para la producción de cobre y de níquel.

-**Sinterización:** La sinterización es parte del aprovechamiento de polvo y material particulado que muchas veces se desprende de los trozos grandes del mineral, consiste en tomar

estas partículas de mineral, aglomerarla y llevarla a altas temperaturas para de esta manera convertirla en un producto adecuado para el horno.

**-Ausmelt:** es un proceso de fusión y oxidación controlada, el cual se usa para fundir concentrados de sulfuros de plomo y cobre.

### 3.2 Relación de los procesos pirometalúrgicos con las emisiones generadas.

**Tabla 1.**

*Relación de los procesos con las emisiones*

<b>Proceso/ Emisión</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>Material particulado</b>	<b>CO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>Reducción directa</b>	—	—	—	Se emiten pequeñas cantidades en la combustión incompleta	Se emiten debidos a la combustión de los combustible s fósiles principalme nte el coque
<b>Fundición de cobre</b>	la fundición de minerales que poseen cantidades de azufre, (denominado s minerales sulfurosos)	Se emiten cantidades de óxido de nitrógeno debido a la reacción del nitrógeno del aire y las altas temperaturas	Durante el proceso de fundición y al agregar los diferentes aditivos se emiten polvos y material particulado	—	Si como fuente energética en los hornos se utiliza combustible s fósiles se generarán emisiones
<b>Peroxidación</b>	En el momento en que se oxidan minerales sulfurosos.	—	—	—	En el caso de que el conque sea usado como agente reductor
<b>Tostación</b>	en el instante en el que se intenta eliminar impurezas de	Tan pronto como el nitrógeno reacciona con el aire a	—	Si implica la combustión de materiales carbonosos se podría	Se produce cuando se hace uso de carbón o coque

	minerales haciéndolo tostar	altas temperaturas se genera el óxido.		emitir este gas.	durante el proceso de tostación
<b>Reverbero</b>	Ocurre en el proceso de fundición de minerales sulfurosos.	Cuando el nitrógeno reacciona con el aire a altas temperaturas se genera el óxido.	Con el empleo de la operación del horno de reverbero, se liberan polvo y partículas finas.	Si se utiliza carbón, coque u otros combustibles fósiles puede generar CO.	Cuando se hace uso de combustibles fósiles en el proceso de fundición.
<b>Flash</b>	Durante la fusión de minerales sulfurosos se obtiene este gas.	Cuando el nitrógeno reacciona con el aire a altas temperaturas se genera el óxido.	—	Según las condiciones de la combustión si se presentan materiales carbonosos se podría producir CO.	—
<b>Sinterización</b>	se producen cuando el mineral de hierro contiene azufre	—	—	—	—
<b>Ausmelt</b>	Se generan en el proceso de fusión y oxidación de concentrados de sulfuro.	—	—	Si como parte del proceso de fusión y oxidación controlada que usa materiales carbonosos, podría emitirse.	Se emite CO <sub>2</sub> en el caso de que se haga uso de combustibles fósiles en el proceso de fundición y oxidación controlada.

*Nota.* Esta tabla presenta de manera breve y ordenada los tipos de emisiones generadas por cada proceso pirometalúrgico y las principales causantes de dichas emisiones.

### 3.3 Caracterización química de las emisiones

**Tabla 2.**

*Caracterización química de las emisiones*

<i>Emisión</i>	<i>Química</i>	<i>Impacto</i>
<i>Gases de combustión</i>	-CO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> (NO y NO <sub>2</sub> )	-Impacto en cambio climático -Calidad de aire
<i>Gases sulfurados</i>	-SO <sub>2</sub>	-Calidad de aire
<i>Polvo y partículas</i>	Sin una química específica	-Calidad de aire -Salud humana
<i>Vapores metálicos</i>	Sin una química específica	-Calidad de aire -Salud humana
<i>Vapores de agua</i>	-H <sub>2</sub> O	No genera ningún impacto significativo
<i>Emisiones de carbono</i>	-CO <sub>2</sub> -CO	-Cambio climático
<i>Emisiones de arsénico y otros elementos tóxicos</i>	-As -As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Sin una química específica	-Toxicidad -Contaminación de suelo y agua
<i>Compuestos volátiles orgánicos</i>	Sin una química específica	Según la sustancia específica liberada: -smog -Toxicidad para la salud humana y el medio ambiente -No generar ningún impacto significativo

*Nota.* En esta tabla se muestra la composición química de las distintas emisiones y los impactos ambientales que generan.

## 4. Técnicas de captura de emisiones

En el afán de minimizar los daños ambientales, se han generado diversas alternativas y tecnologías que permiten disminuir los daños y las emisiones que se han generado debido la industrialización del planeta, una de ellas han sido los sistemas de captura de emisiones que, si

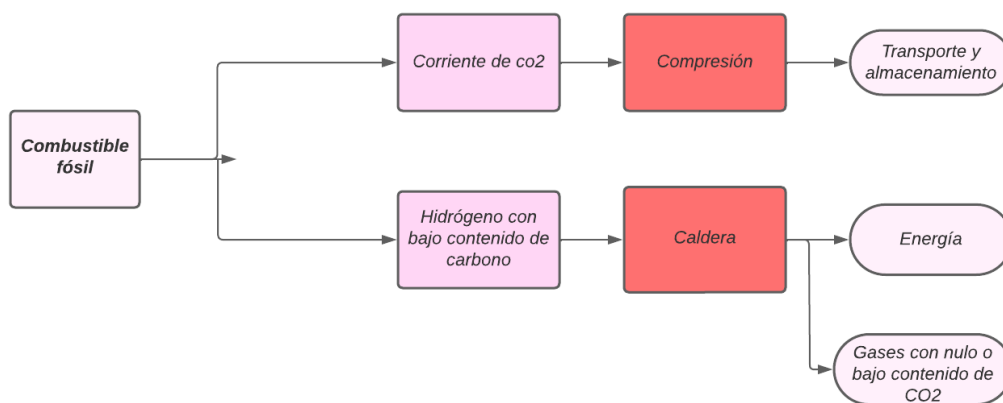
bien no elimina las emisiones, si las captura para darles otro uso o desecharlas de una manera menos contaminante con el medio ambiente. Estas tecnologías han despertado interés en los gobiernos y en las organizaciones climáticas al punto de que en el COP 26, se mencionó en varios discursos y género diversidad de debates (Akeeb, 2022).

Desfavorablemente estas tecnologías se están aplicando menos de lo ideal, debido a la falta de ayudas que existe hacia estos temas por los gobiernos, sin embargo, se espera que en los próximos años estas ayudas aumentan significativamente, con la creación de nuevas normas que se han formado alrededor del mundo en contra del cambio climático.

#### 4.1 Captura por precombustión

**Figura 1.**

*Diagrama de descomposición de combustibles fósiles*



*Adaptado por los autores del libro captura de CO<sub>2</sub>, Adrián Queijo 2017*

*Nota.* La Figura 1 representa de manera genérica en un flujograma el proceso de descomposición de combustibles fósiles con el fin de eliminar el CO<sub>2</sub> de los combustibles (Captura de CO<sub>2</sub> por precombustion).

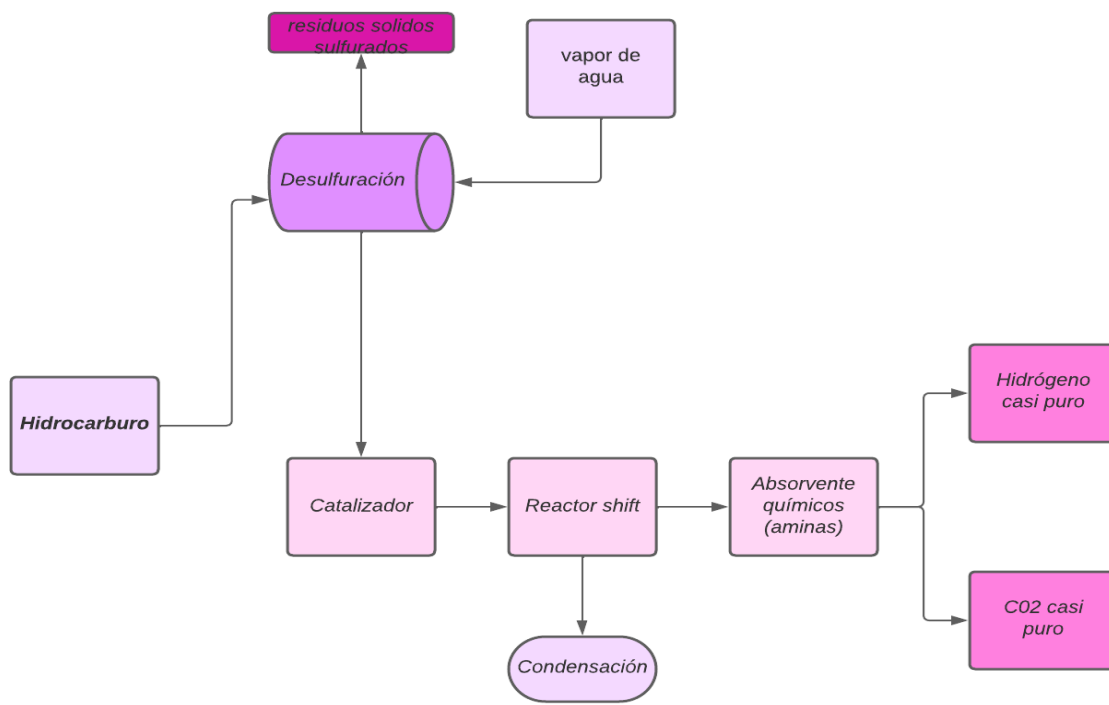
La captura por precombustión consiste en separar el CO<sub>2</sub> del combustible antes de usarlo y que ocurra la combustión, es decir este tipo de tecnología no permite que se liberen las emisiones contaminantes porque son capturadas antes de la combustión, en el caso del gas natural se divide el gas en hidrógeno y CO<sub>2</sub>, donde este último es capturado y el hidrógeno es usado como el combustible (Duran, 2019). Este proceso de anulación de carbono en un combustible se puede analizar en el flujograma (Figura 2)

Para la pirometalurgia hay dos casos en los que se puede aplicar la tecnología precombustión, primero cuando se usan gases (hidrocarburos) como combustibles y el segundo cuando se utilizan combustibles sólidos, que es la mayoría de las veces y se utiliza comúnmente coque o carbón.

Para el tratamiento de los gases como hidrocarburos se usa un proceso llamado reformado con vapor y se expone en la figura 1, para el caso del coque o carbón se usa un proceso llamado gasificación que consiste en convertir el combustible en gas y luego se le aplica un tratamiento similar al de reformado con vapor, el proceso de gasificación de coque se muestra en la figura 3.

**Figura 2.**

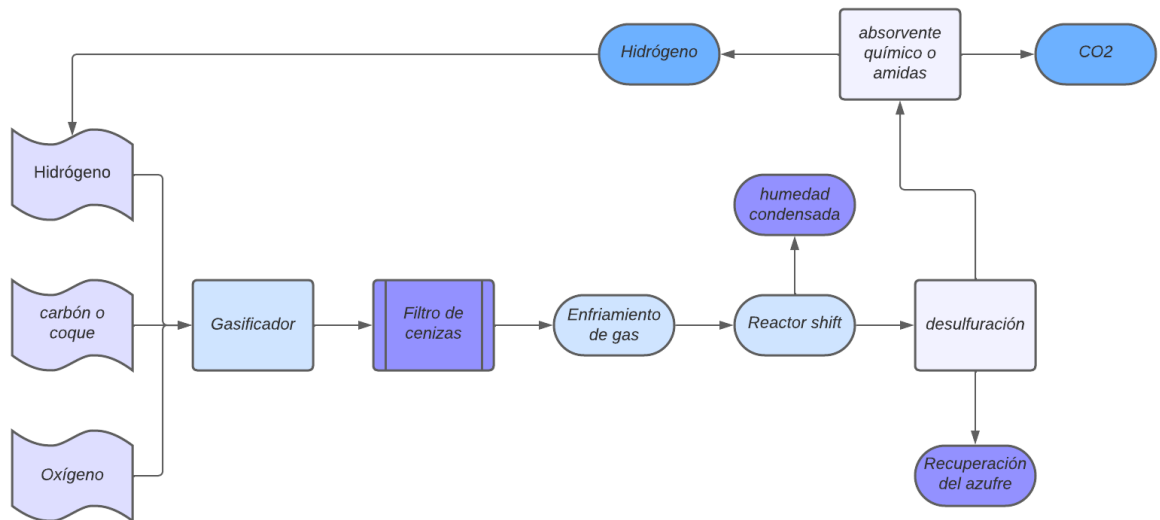
*Diagrama de precombustión.*



*Adaptado por los autores del libro captura de CO<sub>2</sub>, Adrián Queijo 2017*

*Nota.* Sistema de captura de CO<sub>2</sub> por precombustión de hidrocarburos.

Se inicia desulfurando el gas debido a que el azufre puede contaminar los catalizadores, luego, a este gas sin residuos de sulfuros se le inyecta vapor de agua a temperaturas y presión controladas, posteriormente esta mezcla se enfría (dejando como residuo la humedad condensada) en el reactor shift que hace uso de catalizadores para poder oxidar el CO contenido en la mezcla y convertirlo en CO<sub>2</sub>, obteniendo una mezcla de gases dos gases, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, los cuales son separados con absorbentes químicos (Fraga, 2017).

**Figura 3.***Diagrama de gasificación*

*Adaptado por los autores del libro captura de CO<sub>2</sub>, Adrián Queijo*

*Nota.* Sistema de captura de CO<sub>2</sub> por precombustión para coque.

El proceso de gasificación del carbón inicia adicionando hidrógeno y oxígeno al coque para de esta manera obtener monóxido de carbono e hidrógeno, dicho gas es sometido a un proceso similar al de reformado con vapor mostrado en la figura 3 para la obtención de hidrógeno y CO<sub>2</sub>.

Esta tecnología propone al hidrógeno como combustible alternativo, debido a que es más limpio y la generación de gases de efecto invernadero durante su combustión es baja, sin embargo, para la industria pirometalúrgica el hidrógeno es poco usado debido a su bajo poder calorífico y su alta reactividad, por lo que no es apropiada la implementación de estas tecnologías de captura de CO<sub>2</sub> en la pirometalurgia (Fraga, 2017).

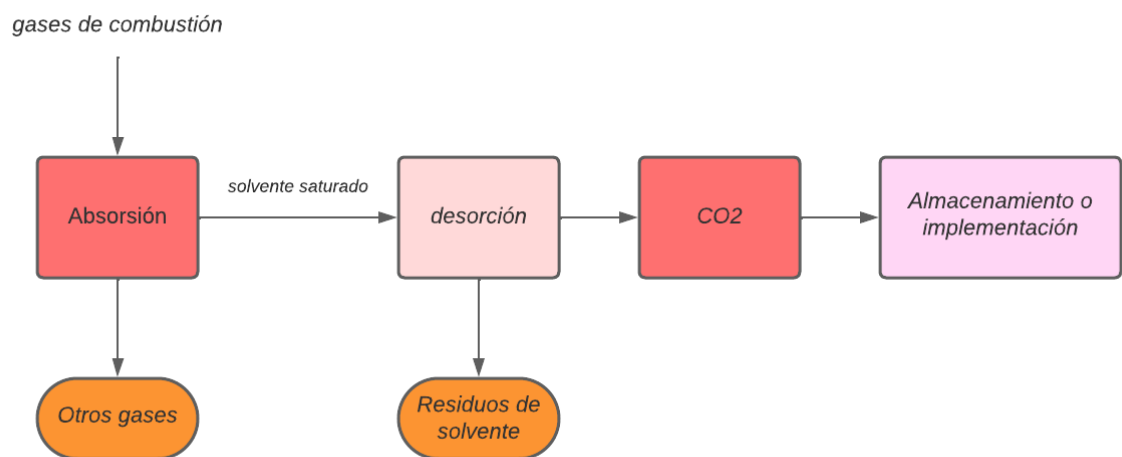
## 4.2 Captura Postcombustión

La tecnología de captura postcombustión es de las más desarrolladas e implementadas, se usa principalmente en las plantas eléctricas, consiste en capturar las emisiones después de la combustión del combustible, es decir, se toman todos los gases emitidos en el proceso y a partir de ellos se separan y capturan las emisiones contaminantes. Existen dos alternativas para la aplicación de sistemas de captura de CO<sub>2</sub> en postcombustión, los cuales son:

- Absorción química: la cual hace uso de solventes químicos para la separación de las corrientes de gases que son emitidos en distintos procesos. En el caso de la industria pirometalurgia, esta alternativa se aplicaría a los gases emitidos en los procesos de fusión de minerales (Fraga, 2017).

### Figura 4.

*Diagrama de absorción química.*



*Nota.* Sistema de captura de CO<sub>2</sub> por postcombustión con absorción química.

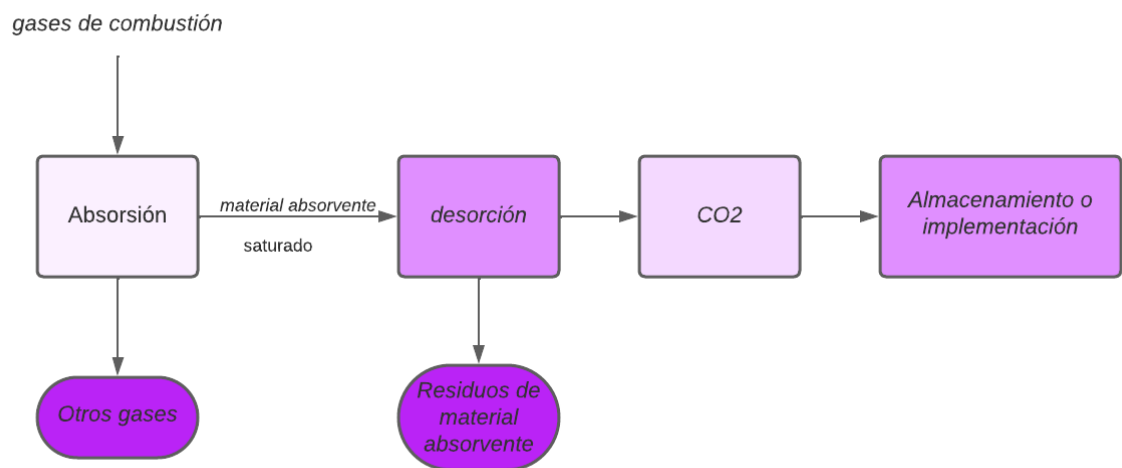
Los gases producto de la combustión y de los procesos de fusión en la pirometalurgia son sometidos a un proceso de absorción en el que se utilizan solventes para diluir el CO<sub>2</sub>, luego los solventes con altas concentraciones de CO<sub>2</sub> pasan por un proceso de desorción, en el

que se libera el CO<sub>2</sub> del solvente, este proceso ocurre al incrementar las temperaturas del solvente saturado, posteriormente el CO<sub>2</sub> es almacenado y/o utilizado para otros fines industriales como la inyección a yacimientos de petróleo o la generación de combustibles sintéticos (Barrera, 2016).

- Absorción física: A diferencia de la absorción química, la absorción física hace uso de materiales absorbentes, esto con el fin de que los gases que se desean capturar queden adheridos a ellos sin interacciones químicas.

### Figura 5.

*Diagrama de absorción física.*



*Nota.* Sistema de captura de CO<sub>2</sub> por postcombustión con absorción física.

Como se presenta en la figura la fisisorción o absorción física tiene un proceso similar al de absorción química, la diferencia consta en que, en esta ocasión no se usan solventes químicos para que se diluya el CO<sub>2</sub>, sino que se usan materiales afines con el CO<sub>2</sub> para que, al alterar las presiones parciales de los gases, el CO<sub>2</sub> sea adherido a la superficie de estos materiales. Luego de modificar una vez más la presión parcial, el gas es suelto nuevamente y

el material absorbente queda con muy pocos remanentes de CO<sub>2</sub>. La inestabilidad del CO<sub>2</sub> en la superficie del material se debe a la naturaleza de los enlaces que se generan en este tipo de absorción, enlaces de van der Waals (Duran, 2019).

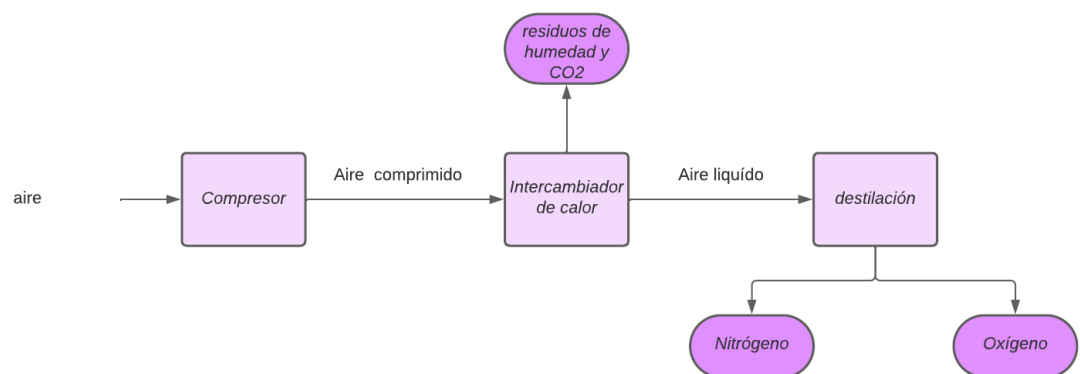
### 4.3 Captura Oxicombustión:

En esta tecnología lo que se modifica es el comburente, en el que tradicionalmente se usa aire (se reemplaza por oxígeno), para obtener unas emisiones enriquecida en CO<sub>2</sub> o gases contaminantes, y de esta manera capturar la totalidad de las emisiones generadas en el proceso sin necesidad de un tratamiento adicional.

Para la industria pirometalúrgica el proceso de oxicombustión se simplifica con la implementación de oxígeno como combustible en lugar del aire (Fraga, 2017).

### Figura 6.

*Diagrama de oxicombustión.*



*Nota.* Sistema de captura de CO<sub>2</sub> por oxicombustión, donde se separa el oxígeno del aire.

El proceso de producción de oxígeno se representa en la figura 6. Existen varias maneras de obtener este oxígeno, dos de las cuales son el ciclo de linde y Claude, en donde el aire obtenido del ambiente se comprime para luego ser enfriado y se obtienen residuos de

humedad y de CO<sub>2</sub> cristalizados debido a la baja temperatura; también se obtiene el aire líquido el cual es sometido a un proceso de destilación donde se logran separar el oxígeno y el nitrógeno debido a la diferencia de puntos de ebullición de cada componente (Fraga, 2017).

#### 4.4 Otros sistemas y tecnologías

Existen otras tecnologías que también permiten la eliminación del CO<sub>2</sub> en el ambiente, como lo es la captura de CO<sub>2</sub> directa de la atmósfera la cual aplica distintas herramientas para extraer directamente el CO<sub>2</sub> del ambiente, esta tecnología va desligada de la industria; por otro parte, el CO<sub>2</sub> capturado puede ser depositado en almacenamientos geológicos, normalmente estos almacenamientos provienen de los yacimientos petrolíferos vacíos. También se han desarrollado tecnologías las cuales permiten una aplicación química para este CO<sub>2</sub>, una de ellas es bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (beccs) que consiste en usar el CO<sub>2</sub> capturado como alimento para biomásas que posteriormente serán fuente de energía.

**Nota:** las tecnologías de captura de CO<sub>2</sub> aplicables en la pirometalurgia son las ya citadas en, 3.2 y 3.3. debido a que otros tipos de tecnologías no se relacionan con dicha industria.

En las tablas 3,4,5, se mostrará la información recopilada de la literatura, resumida en características favorables y no favorables.

**Tabla 3.**

#### *Ventajas y desventajas precombustión*

<i>Captura precombustión</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	Facilita la producción de hidrógeno con menos emisiones de carbono.	Costos significativos.

Gran eficiencia de la captura de CO <sub>2</sub> .	Técnica compleja.
Tecnología de gasificación limpia.	Requiere una infraestructura adicional para el proceso.
Se puede integrar en nuevas plantas.	No es aplicable a la pirometalurgia.

**Tabla 4.***Ventajas y desventajas postcombustión*

<i>Captura postcombustión</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	Se facilita la adaptación en plantas ya en funcionamiento.	Menor eficiencia en la captura CO <sub>2</sub> en comparación con algunos métodos precombustión.
	Puede aplicarse a diversas fuentes de emisión.	Costos operativos y de energía adicionales.
	Es la técnica más antigua y con más investigación.	

**Tabla 5.***Ventajas y desventajas oxicomcombustión.*

<i>Captura oxy-combustión</i>	<i>ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	Facilidad de captura.	Costos energéticos.
	Menos contaminantes atmosféricos.	Implica cambios significativos en los sistemas de combustión convencionales.
	Puede ser aplicada en nuevas plantas.	Requiere instalaciones y equipos específicos para la producción de oxígeno y la manipulación del gas resultante.

*Nota.* Las tablas de la 3 a la 5 presentan las ventajas y desventajas recopiladas de los distintos sistemas de captura de CO<sub>2</sub>.

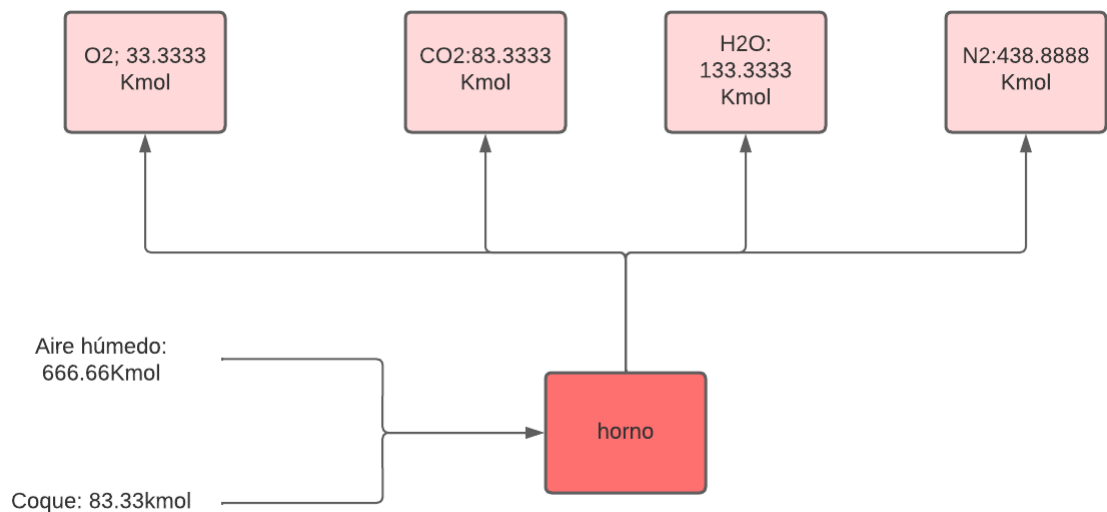
### 5. Ejemplo de balance de materia

A continuación, se presenta en un ejemplo hipotético el balance de materia de los gases de combustión en un horno en condiciones ideales en el que se quema coque como fuente de energía.

**Asunción:** Se usa una Tonelada de coque el cual reacciona 100% y como comburente aire en exceso (40%) y húmedo (20%)

**Figura 7.**

*Diagrama de balance de masa.*



*Nota.* Balance de masa de los gases de un proceso de combustión hipotético, que es similar a los procesos de combustión que suceden en la pirometalurgia.

En la siguiente tabla se presenta una comparación de los gases producidos según la tecnología que se haya aplicado.

**Tabla 6.***Comparación de tecnologías de captura*

<b>Gas/Tecnología</b>	<b>Sin captura de CO<sub>2</sub></b>	<b>Oxicombustión</b>	<b>Postcombustión</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>83,33</b>	<b>83,33</b>	<b>12,499</b>
<b>O<sub>2</sub></b>	<b>33,33</b>	<b>Depende del Exceso</b>	<b>33,33</b>
<b>N<sub>2</sub></b>	<b>438,88</b>	<b>0</b>	<b>438,88</b>
<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>133,33</b>	<b>0</b>	<b>133,33</b>

*Nota.* En esta tabla se muestran las cantidades de gases emitidos en un proceso de combustión hipotético similar al que ocurre en los tratamientos pirometalúrgicos, según los resultados del balance de masa del ejemplo planteado, y se comparan con los resultados esperados al aplicar dos tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>.

Como se expone en la tabla 6, al momento de aplicar la tecnología de oxicombustión se reducen considerablemente las emisiones de otros gases de combustión de salida, de esta manera se podrían capturar la totalidad de las emisiones en el proceso debido a que la mayor parte de estas pertenecen a CO<sub>2</sub>, por otra parte, al momento de aplicar la tecnología de postcombustión se emitirá a la atmósfera un 85% menos de CO<sub>2</sub>, debido a su eficiencia de captura, y los demás gases de salida serán emitidos en su totalidad.

## **6. Matriz de Comparación**

A continuación, se presenta la matriz de selección en donde se representan las características de las tecnologías aplicables a la pirometalurgia de manera cualitativa.

**Tabla 7.***Matriz de selección.*

<b>Tecnología- Características</b>	<b>Eficiencia en la captura de CO<sub>2</sub></b>	<b>Factor económico</b>	<b>Complejidad de la tecnología</b>	<b>Total</b>
<b>Oxicombustion</b>	10	7	9	26
<b>Postcombustion</b>	8	5	7	20

*Nota.* En la matriz de selección se muestran las distintas características que se tomaron en consideración para la selección y el puntaje que recibieron, a criterio de los autores y según la literatura, cada una de las dos tecnologías propuestas.

Se consideraron tres características para poder seleccionar la más adecuada en la pirometalurgia

- la eficiencia de captura del CO<sub>2</sub> donde en el proceso de Oxicombustión se logra capturar la totalidad del CO<sub>2</sub> emitido, y la postcombustión tiene una eficiencia de captura inferior
- El factor económico en el que la tecnología de Oxicombustión sólo requiere la compra de oxígeno para el uso como comburente y el costo del almacenamiento del CO<sub>2</sub>, por otra parte, en la captura por postcombustión se requiere personal, infraestructura y maquinaria adicional para el tratamiento de los gases.
- La complejidad de la implementación de la tecnología, en donde la captura por oxicombustión es evidentemente menos compleja.

## **7. Conclusiones generales**

- Las emisiones contaminantes de los procesos pirometalúrgicos dependen de:  
Naturaleza de los elementos y compuestos presentes en las materias primas e insumos,  
reacciones químicas que se producen en los procesos, termodinámica de las reacciones

químicas y fenómenos superficiales entre los diversos componentes de los procesos pirometalúrgicos.

- Por los efectos e impactos de las emisiones contaminantes de los procesos pirometalúrgicos, es indispensable establecer los tipos de agentes contaminantes, la concentración de los contaminantes y los flujos másico y volumétricos para proponer las tecnologías de mitigación o de transformación en sustancias inertes.

- Se realizó en este trabajo un ejemplo de comparación de las distintas técnicas de captura de CO<sub>2</sub> que existen, y con los análisis correspondientes se puede concluir que la tecnología de captura más conveniente para la industria pirometalúrgica son los sistemas de captura por oxidación, aunque el proceso de obtención de oxígeno a partir del aire es complejo, para la industria pirometalurgia se puede simplificar al uso de oxígeno como comburente y posteriormente la captura de la totalidad de los gases que se emiten en el proceso de combustión.

- Como recomendación se sugiere continuar con los estudios teóricos específicos dependiendo de los metales a obtener en los procesos metalúrgicos; es decir si son procesos metalúrgicos de cobre, plomo, zinc, hierro y acero, aluminio, níquel entre otros para establecer sus sistemas de mitigación o tratamientos que lo viabilicen ambientalmente o socialmente desde la fase de diseño de los procesos.

### Referencias Bibliografía

- Akeeb, O., Wang, L., Xie, W., Davis, R., Alkasrawi, M., & Toan, S. (2022). Post-combustion CO<sub>2</sub> capture via a variety of temperature ranges and material adsorption process: A review. *Journal of environmental management*, 313, 115026.
- Barrera, B. (2016) *Tesis: Tecnología de Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> para su uso en los procesos de recuperación mejorada de aceite.* <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000744102/3/0744102.pdf>
- Dimitrijević, M., & Kostov, A. (2009). Influence of pyrometallurgical copper production on the environment. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 164, Issues 2–3.
- Durán Vera, I. (2019) *Diseño de Procesos Cíclicos de adsorción para la Captura de Co<sub>2</sub> en el contexto de una planta de gestión de residuos, DIGITAL.CSIC.* <http://hdl.handle.net/10261/196191>
- Fraga, A. q. (2017). *Captura de CO<sub>2</sub>*. Escuela técnica superior de náutica y máquinas.
- Guo, X., Chen, Y., Wang, Q., Wang, S., & Tian, Q. (2022). Copper and arsenic substance flow Analysis of pyrometallurgical process for copper production. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(1), 364-376. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(22\)65801-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(22)65801-1)
- Joanna Kulczycka, Ł. L. (2015). Environmental Impacts of Energy-Efficient Pyrometallurgical Copper Smelting Technologies: The Consequences of Technological Changes from 2010 to 2050. wiley.
- José., R. G. (2001). *Combustión y Combustibles*.
- Lars D. Hylander, R. B. (2008). *Global emission and production of mercury during the pyrometallurgical extraction of non-ferrous sulfide ores*. Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Mile Dimitrijević, A. K. (2009). Influence of pyrometallurgical copper production on the environment. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 164, Issues 2–3.
- Seijas S. et al (2017). Retención de gases nitrosos y sulfurosos de efluentes de combustión empleando monolitos de cenizas volantes. (2017). *conocimiento para el desarrollo*, 5(2). <https://revista.usanpedro.edu.pe/index.php/CPD/article/view/126>
- Stephens, R. L. (2001). Combustion processes in pyrometallurgy. *JOM*, 15.