



Módulo 3:

## Medidas de reducción del S02

<b>1.</b>	<b>OBJETIVO.</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>MEDIDAS PRIMARIAS PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE SO<sub>2</sub></b>	<b>2</b>
1.1.	Reducción del Contenido de Azufre en el Combustible	2
1.2.	Control de Procesos Industriales	2
<b>3.</b>	<b>MEDIDAS SECUNDARIAS PARA LA CAPTURA Y ELIMINACIÓN DE SO<sub>2</sub></b>	<b>2</b>
3.1.	Procesos de Desulfuración de Gases de Escape	3
<b>4.</b>	<b>TECNOLOGÍAS ESPECÍFICAS DE CONTROL DE SO<sub>2</sub></b>	<b>6</b>
4.1.	Sorción seca	6
4.2.	Sorción seca condicionada	7
4.3.	Semi-seco absorción	7
4.4.	Scrubbers o Lavadores de Gases	7
<b>5.</b>	<b>COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE CONTROL DE SO<sub>2</sub></b>	<b>8</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>8</b>

## 1. Objetivo.

- Identificar las medidas para la reducción en la emisión de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) que se genera principalmente por la combustión de combustibles fósiles con contenido de azufre, la quema de biomasa y ciertos procesos industriales como la tostación de minerales sulfurados.
- Diferenciar las medidas de reducción de SO<sub>2</sub> dependiendo de si se basan en la reducción de la producción de SO<sub>2</sub> o en su captura antes de su emisión.
- Caracterizar todos los procesos de reducción de SO<sub>2</sub>.

## 2. Medidas Primarias para la Reducción de Emisiones de SO<sub>2</sub>

Las medidas primarias buscan reducir la generación de SO<sub>2</sub> antes de que ocurra la combustión o en sus etapas iniciales. Estas estrategias incluyen:

### 2.1. Reducción del Contenido de Azufre en el Combustible

- **Hidrodesulfuración:** Proceso químico donde los compuestos de azufre en el petróleo se eliminan mediante reacciones con hidrógeno. Se emplea en la refinación de combustibles como el diésel y la gasolina.
- **Filtración con Carbón Activado:** Utilizado en biogás para eliminar sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) antes de la combustión.
- **Uso de Combustibles con Bajo Contenido de Azufre:** Se fomenta la mezcla de combustibles fósiles con alternativas menos contaminantes, como el gas natural o biocombustibles.

### 2.2. Control de Procesos Industriales

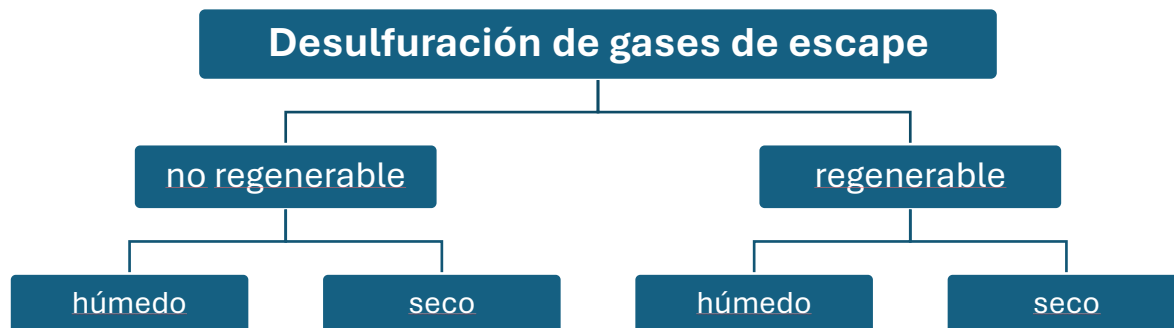
- Uso de Materias Primas con Bajo Contenido de Azufre en industrias metalúrgicas y cementeras.
- Recuperación de Azufre en refinerías y plantas químicas mediante procesos como el Método Claus, que convierte el H<sub>2</sub>S en azufre elemental.

## 3. Medidas Secundarias para la Captura y Eliminación de SO<sub>2</sub>

Las medidas secundarias implican la captura y eliminación del SO<sub>2</sub> de los gases de combustión antes de su liberación a la atmósfera. Se clasifican en **procesos secos, semi-secos y húmedos**, que pueden ser regenerables o no regenerables.

La Ilustración 1 muestra un resumen de la categorización de las distintas medidas de reducción de SO<sub>2</sub>.

Ilustración 1: Categorías de medidas de reducción del SO<sub>2</sub>



Fuente: Elaboración propia

### 3.1. Procesos de Desulfuración de Gases de Escape

#### 3.1.1. Métodos no regenerables

Estos procesos convierten el  $\text{SO}_2$  en compuestos sólidos estables que no pueden reutilizarse.

**Desulfuración húmeda con lechada de caliza:** La desulfuración húmeda con lechada de caliza, también conocida como FGD (*Flue Gas Desulfurization*), es una de las tecnologías más utilizadas para la reducción de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en los gases de escape de fuentes fijas, como centrales termoeléctricas, plantas industriales y hornos de gran escala. Su eficacia en la eliminación de  $\text{SO}_2$  puede alcanzar valores de 90% a 99%, lo que la convierte en una de las soluciones más eficientes para el cumplimiento de normativas ambientales. Esta tecnología se basa en la reacción química entre el  $\text{SO}_2$  presente en los gases de combustión y una lechada de caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) y agua, lo que da como resultado la formación de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), un subproducto con aplicaciones industriales.

#### Ventajas

- Alta eficiencia de eliminación de  $\text{SO}_2$ : Puede alcanzar una eficiencia del 90% al 99% en la captura de  $\text{SO}_2$ .
- Subproducto aprovechable: El yeso generado puede ser utilizado en la fabricación de cemento, paneles de yeso y otras aplicaciones.
- Compatible con grandes volúmenes de gases: Se adapta bien a grandes fuentes emisoras, como centrales eléctricas y hornos industriales.
- Proceso bien desarrollado y estandarizado: Es una de las tecnologías de desulfuración más implementadas a nivel global.

#### Desventajas

- Altos costos de inversión y operación: Requiere una infraestructura compleja y un mantenimiento constante.
- Alto consumo de agua y reactivos: La lechada de caliza debe prepararse y mantenerse en circulación.
- Gestión de residuos líquidos: Aunque el yeso puede ser aprovechado, si no hay mercado para él, su disposición final puede ser un problema.

*Ilustración 2: Desulfuración húmeda mediante inyección de una suspensión de cal en el absorbedor.*



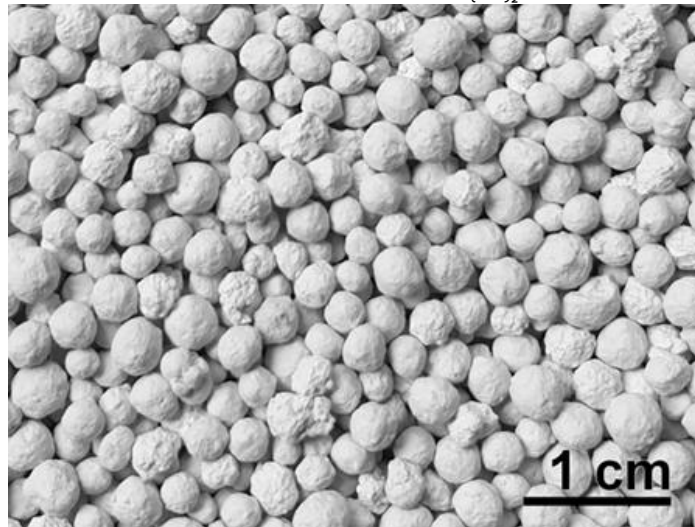
Fuente: Lechler [consultado en marzo 2025].

**Inyección de absorbentes secos ( $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ):** Esta técnica se basa en la adición de sorbentes alcalinos secos directamente en los gases de escape para reaccionar con el  $\text{SO}_2$  y formar compuestos sólidos estables que pueden ser eliminados mediante sistemas de filtrado. Este método es una alternativa eficiente y de menor costo en comparación con la desulfuración húmeda, ya que no requiere el uso de grandes volúmenes de agua ni genera residuos líquidos.

Los absorbentes secos más comúnmente utilizados son:

- Hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ): Reacciona con el  $\text{SO}_2$  formando sulfito de calcio ( $\text{CaSO}_3$ ) y, en presencia de oxígeno, se convierte en sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ).
- Bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ): Se descompone en carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), el cual reacciona con el  $\text{SO}_2$  formando sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) y posteriormente sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

*Ilustración 3: Gránulos de  $\text{Ca(OH)}_2$*



*Fuente: Afflerbach, Krumm; 2023*

**Lecho fluidizado circulante (LFC):** Esta tecnología es utilizada en centrales termoeléctricas, calderas industriales y plantas de incineración, y permite la reducción eficiente de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) mediante la inyección de caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) durante la combustión, reteniendo el  $\text{SO}_2$  en la ceniza. Este método se caracteriza por su alta eficiencia en la captura de contaminantes y su capacidad para utilizar una amplia variedad de combustibles sólidos, como carbón, biomasa y residuos industriales.

El Lecho Fluidizado Circulante funciona mediante la suspensión de partículas sólidas dentro de un flujo de gas ascendente, lo que crea un entorno altamente turbulento donde se optimiza la combustión y la reacción con absorbentes químicos como la caliza.

### **Ventajas**

- Alta eficiencia en la captura de  $\text{SO}_2$ : Puede alcanzar entre 70% y 90% de reducción de  $\text{SO}_2$  sin necesidad de tratamientos adicionales.
- Flexibilidad en el tipo de combustible: Puede operar con carbón de baja calidad, biomasa y residuos industriales.
- Bajas emisiones de contaminantes: Además de  $\text{SO}_2$ , reduce la emisión de  $\text{NO}_x$  y material particulado.

- Temperatura de combustión más baja: Disminuye la formación de contaminantes secundarios como óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).
- Recirculación de partículas: Permite una mayor eficiencia en la utilización de absorbentes y combustible.

### Desventajas

- Mayor costo de instalación: Requiere un diseño de caldera más complejo en comparación con los sistemas convencionales.
- Generación de cenizas con alto contenido de sulfatos: Se debe gestionar adecuadamente para evitar impactos ambientales.
- Mayor desgaste de componentes: La recirculación de partículas sólidas puede aumentar la erosión en tuberías y superficies de la caldera.

### 3.1.2. Métodos regenerables

Los métodos regenerables permiten la recuperación y reutilización de los productos de reacción, lo que los hace más sostenibles en el tiempo y reduce la generación de residuos. Estas tecnologías son especialmente útiles en instalaciones donde la economía circular y la eficiencia en el uso de insumos químicos son prioritarias. A continuación, se exponen dos de ellos.

**Absorción con sulfitos de sodio o magnesio:** Este método consiste en la absorción del dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) presente en los gases de escape mediante soluciones de sulfitos alcalinos, como el sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) o el sulfito de magnesio ( $\text{MgSO}_3$ ). El  $\text{SO}_2$  reacciona con estos compuestos para formar bisulfitos, que luego pueden regenerarse mediante calentamiento o despresurización, liberando nuevamente el  $\text{SO}_2$  para su reutilización o almacenamiento.

### Ventajas

- Regeneración del absorbente: Los sulfitos pueden regenerarse, lo que reduce el consumo de reactivos.
- Producción de  $\text{SO}_2$  puro: La regeneración permite obtener  $\text{SO}_2$  en estado gaseoso, útil como materia prima en la industria química.
- Menor generación de residuos: A diferencia de los métodos no regenerables, no se produce un residuo sólido que deba ser gestionado.

### Desventajas

- Complejidad operativa: Requiere etapas adicionales para la regeneración y manejo de soluciones líquidas.
- Costos energéticos: La regeneración demanda energía térmica, lo que puede aumentar los costos operativos.
- Corrosión: Las soluciones salinas pueden ser corrosivas para los materiales del sistema, requiriendo materiales resistentes.

**Uso de aminas y carbón activado:** En este método avanzado, se utilizan compuestos orgánicos como las aminas o materiales adsorbentes como el carbón activado, que tienen una alta afinidad química por el  $\text{SO}_2$ . Las aminas reaccionan de forma reversible con el  $\text{SO}_2$ , y el compuesto resultante puede descomponerse con calor o vacío para liberar el gas absorbido. El carbón activado, por su parte, permite tanto la adsorción física como química, y puede regenerarse por desorción térmica o con vapor.

## Ventajas

- Alta eficiencia de captura: Capacidad de remover SO<sub>2</sub> incluso en bajas concentraciones.
- Reutilización del absorbente: Las aminas y el carbón activado pueden regenerarse y utilizarse múltiples veces.
- Aplicaciones en procesos limpios: Ideal para industrias con requerimientos de emisiones muy bajas y procesos cerrados.

## Desventajas

- Alto costo de los materiales: Las aminas y el carbón activado son más costosos que los absorbentes convencionales.
- Sensibilidad a contaminantes: La presencia de otras sustancias en los gases puede afectar la eficacia de la absorción o adsorción.
- Requiere sistemas de regeneración: Necesita infraestructura adicional para recuperar los absorbentes y manejar el SO<sub>2</sub> liberado.

Ilustración 4: Pellets de carbón activado



Fuente: Laboratorio Kipus

## 4. Tecnologías Específicas de Control de SO<sub>2</sub>

### 4.1. Sorción seca

- **Adsorción Física:** El SO<sub>2</sub> se une a superficies sólidas mediante interacciones de Van der Waals, por ejemplo, en carbón activado.
- **Adsorción Química:** Se produce una reacción química con el adsorbente, como en la reacción entre SO<sub>2</sub> y Ca(OH)<sub>2</sub>:

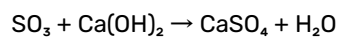
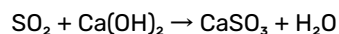
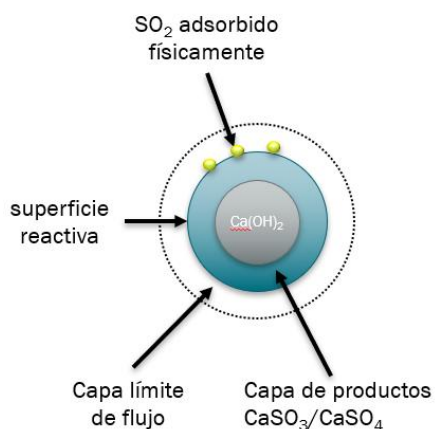


Ilustración 5: Principio de sorción seca



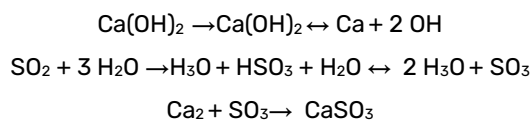
Fuente: Laboratorio Kipus

En la práctica, a menudo se introduce en los gases de escape un sorbente que contiene calcio en forma de polvo y, tras cargarlo con azufre, se separa de nuevo de los gases de escape mediante un filtro textil.

#### 4.2. Sorción seca condicionada

La sorción seca condicionada normalmente se realiza con hidróxido de calcio. La deposición sobre el calcio se ve mejorada por una capa de hidrato que se forma alrededor (y dentro de los poros) de las partículas de calcio y resulta del  $\text{H}_2\text{O}$  contenido en los gases. Los procesos de absorción y adsorción se desarrollan en paralelo. El aumento de la temperatura de los gases de combustión provoca una reducción de la separación del  $\text{SO}_2$  debido a la reducción de la humedad. La reducción de la temperatura o el aumento de la humedad relativa pueden realizarse mediante un economizador o una torre de refrigeración.

Pueden ocurrir las siguientes reacciones químicas:



#### 4.3. Semi-seco absorción

El proceso de absorción por pulverización semiseca es un método alternativo donde se utiliza un secador por pulverización para inyectar una suspensión de calcio y agua (lechada de calcio) en la corriente de gases de combustión. La suspensión se crea a partir de calcio viva ( $\text{CaO}$ ) y agua mediante un proceso de fragmentación in situ que es una ventaja adicional para la reactividad. Cuando la suspensión se inyecta en la corriente de gases de combustión, el componente de agua se evapora y sólo las partículas sólidas de calcio permanecen en los gases de combustión. El proceso de absorción por pulverización funciona con un mayor consumo de cal en comparación con un proceso de absorción en seco acondicionado con una inyección de cal seca, pero es más eficiente.

#### 4.4. Scrubbers o Lavadores de Gases

Son sistemas de absorción húmeda donde los gases de escape se hacen pasar por una solución de lavado alcalina (cal, soda cáustica) que neutraliza el  $\text{SO}_2$ .

- **Scrubbers de torre de pulverización:** Rocío de agua con reactivos alcalinos.
- **Scrubbers de lecho empaquetado:** Uso de rellenos para aumentar el contacto gas-líquido.
- **Scrubbers Venturi:** Generan alta turbulencia para mejorar la captura del SO<sub>2</sub>.

En un lavador de torre de pulverización Los gases de escape se conducen en contracorriente a un flujo de agua de lavado desde abajo hacia arriba. La separación de los contaminantes gaseosos (SO<sub>2</sub> o HCl) se realiza por absorción en las gotas de agua. Se produce una solución salina de lavado que se recircula y después se purifica por neutralización. Los aditivos alcalinos pueden aumentar la eficacia de la separación. Los lavadores son generalmente más caros que los procesos en seco, pero pueden conseguirse altas eficiencias de separación.

## 5. Comparación de Tecnologías de Control de SO<sub>2</sub>

Tabla 1: Resumen caracterización técnicas de control SO<sub>2</sub>

Método	Tipo	Eficiencia (%)	Aplicación	Costos
Desulfuración húmeda	No regenerable	90-99	Centrales eléctricas, industria pesada	Alto
Inyección de caliza en lecho fluidizado	No regenerable	70-90	Calderas y hornos	Medio
Scrubbers secos	No regenerable	60-80	Procesos industriales	Medio-bajo
Adsorción con carbón activado	Regenerable	80-95	Refinación y química	Alto

Fuente: Elaboración propia

## 6. Conclusión

El control de las emisiones de SO<sub>2</sub> es esencial para mejorar la calidad del aire y cumplir con regulaciones ambientales. Las tecnologías actuales incluyen desde la reducción del azufre en combustibles hasta procesos avanzados de captura y reutilización de SO<sub>2</sub>. Como las medidas primarias para reducir el SO<sub>2</sub> suelen ser muy limitadas en la práctica por razones económicas o técnicas, a menudo hay que recurrir a medidas secundarias. La selección del método adecuado depende de factores como la eficiencia requerida o los valores límite válidos, los costos operacionales y el tipo de industria.