

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA PARA REDUCIR LA CONCENTRACIÓN DE SO₂ DE LOS GASES DE COLA GENERADOS EN EL PROCESO DE DESULFURIZACIÓN DEL REFINAMIENTO DE CRUDO EN LA REFINERÍA ESTATAL ESMERALDAS”

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

IVÁN SANTIAGO MONTENEGRO SILVA

ANDRÉS ALEJANDRO MONCAYO OLALLA

DIRECTOR: ING. LUÍS CUMBAL, PH. D.

CODIRECTOR: ING. LUÍS ECHEVERRÍA

Sangolquí, 2006-02-08

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA PARA REDUCIR LA CONCENTRACIÓN DE SO₂ DE LOS GASES DE COLA GENERADOS EN EL PROCESO DE DESULFURIZACIÓN DEL REFINAMIENTO DE CRUDO EN LA REFINERÍA ESTATAL ESMERALDAS” fue realizado en su totalidad por Iván Santiago Montenegro Silva y Andrés Alejandro Moncayo Olalla, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

ING. LUÍS CUMBAL, PH. D.

DIRECTOR

ING. LUÍS ECHEVERRÍA

CODIRECTOR

Sangolquí, 2006-02-08

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA PARA REDUCIR LA CONCENTRACIÓN DE SO₂ DE LOS GASES DE COLA GENERADOS EN EL PROCESO DE DESULFURIZACIÓN DEL REFINAMIENTO DE CRUDO EN LA REFINERÍA ESTATAL ESMERALDAS”.

ELABORADO POR

IVÁN SANTIAGO MONTENEGRO SILVA

ANDRÉS ALEJANDRO MONCAYO OLALLA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MAYO. EDGAR PAZMIÑO

DECANO

Sangolquí, 2006-02-08

DEDICATORIA

Oh Dios, fuente de la sabiduría, principio supremo de todas las cosas. Derrama tu luz en mi inteligencia y aleja de ella las tinieblas del pecado y de la ignorancia. Concédeme penetración para entender, memoria para retener, método para aprender, lucidez para interpretar y expresarme. Ayuda el comienzo de mi trabajo, dirige su progreso y corona su fin...

A mis padres y hermanos por estar siempre a mi lado y enseñarme que la verdadera realización en la vida esta en hacer realidad los sueños...

Santiago

A mis padres por su comprensión y apoyo durante estos años, a mis hermanos por estar ahí siempre, a mi amiga incondicional por la ayuda y la confianza que me ha brindado, a todos gracias...

Alejandro

AGRADECIMIENTO

Un sincero agradecimiento a todas las personas que participaron en la elaboración de este proyecto, en especial al Ing. Luís Cumbal, Ph. D., al Ing. Luís Echeverría, a la Ing. Tatiana Acosta y al Dr. Vladimir Aguirre. A todos ustedes, gracias...

Los autores

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	iii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
LISTADO DE ANEXOS	xviii
PRESENTACIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
GENERALIDADES.....	3
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3 ALCANCE	4

CAPÍTULO 2.....	5
LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE	5
2.1 REVISIÓN HISTÓRICA DEL PROBLEMA	5
2.2 PROBLEMAS GLOBALES	7
2.2.1 CALENTAMIENTO GLOBAL.....	7
2.2.2 DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO	9
2.2.3 LLUVIA ÁCIDA	11
2.3 FUENTES DE CONTAMINACIÓN.....	12
2.3.1 FUENTES MÓVILES.....	13
2.3.2 FUENTES ESTACIONARIAS.....	13
2.4 TIPOS DE CONTAMINANTES.....	15
2.4.1 MATERIAL PARTICULADO (PM).....	16
2.4.2 MONÓXIDO DE CARBONO (CO).....	18
2.4.3 ÓXIDOS DE AZUFRE (SO _x)	19
2.4.4 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x).....	20
2.4.5 OZONO (O ₃).....	21
2.4.6 PLOMO (Pb).....	22
2.5 FILOSOFÍAS SOBRE EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE .	24

2.5.1 FILOSOFÍA DE LAS NORMAS SOBRE EMISIONES	24
2.5.2 FILOSOFÍA DE LAS NORMAS DE LA CALIDAD DEL AIRE	25
2.5.3 FILOSOFÍA DE LOS IMPUESTOS POR EMISIONES	25
2.5.4 FILOSOFÍA DEL COSTO-BENEFICIO.....	26
CAPÍTULO 3	29
ÓXIDOS DE AZUFRE (SO _x).....	29
3.1 EFECTOS EN LA SALUD DE LOS SERES HUMANOS.....	30
3.2 EFECTOS EN LAS PLANTAS	32
3.3 EFECTOS EN LOS MATERIALES.....	34
CAPÍTULO 4	36
DISPOSITIVOS DE CONTROL DE LAS EMISIONES DE SO ₂	36
4.1 SEDIMENTADORES POR GRAVEDAD	36
Flujo en bloque.....	37
Flujo mezclado	37
4.2 SEPARADORES CENTRÍFUGOS	39
Ciclones.....	39
Precipitadores dinámicos	41
4.3 COLECTORES HÚMEDOS	43

4.3.1 DISPOSICIONES GEOMÉTRICAS	44
Lavadores de flujo cruzado.....	44
Lavadores de flujo coordinado.....	45
Lavadores a contraflujo	46
4.3.2 PRINCIPALES TIPOS DE LAVADORES	46
Lavador de cámara de rocío.....	46
Ciclón de cámara de rocío.....	48
Lavador venturi.....	49
4.4 LAVADORES DE CALCIO	50
Lavadores de piedra caliza.....	52
Lavadores de cal hidratada	52
Sistema de álcali doble.....	53
4.5 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL SISTEMA ÓPTIMO.....	53
CAPÍTULO 5.....	55
DISEÑO DEL SISTEMA	55
5.1 QUÍMICA DE PROCESO Y FACTORES OPERACIONALES	55
5.2 FACTORES FÍSICOS.....	57
5.3 DISEÑO DEL PROCESO	57

5.4 ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO.....	60
CAPÍTULO 6	67
MODELACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA	67
6.1 MODELACIÓN DEL SISTEMA.....	67
6.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	70
6.3 PARÁMETROS Y VARIABLES DE EVALUACIÓN	71
6.4 TOMA DE DATOS.....	72
6.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
CONCLUSIONES.....	76
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
LIBROS	78
REFERENCIAS.....	78

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1: Destrucción del ozono debido a los CFCs.	10
Ecuación 3.1: Ácido sulfuroso y sulfúrico, respectivamente.	29
Ecuación 3.2: Acción del H ₂ SO ₄ sobre el mármol.	35
Ecuación 4.1: Reacción producida en un lavador de piedra caliza.	52
Ecuación 4.2: Reacción producida en un lavador de cal hidratada.	52
Ecuación 5.1: Reacción producida en el lavador.	56
Ecuación 5.2: Reacción producida en el tanque de retención de efluente	56
Ecuación 5.3: Ecuación general del proceso de remoción del SO ₂	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Comportamiento reciente de la anomalía global media de la temperatura.....	8
Figura 2.2: Acidez cambiante en ríos y desembocaduras de lagos suecos.	11
Figura 2.3: Tamaños de las partículas en micrones.....	18
Figura 2.4: Representación esquemática de la relación entre el daño, el control, y los costos totales, para algún contaminante en algún lugar.....	27
Figura 3.1: Efectos de la contaminación por óxido de azufre en la salud humana.	31
Figura 3.2: Efectos de la contaminación por óxido de azufre en la vegetación. ...	33
Figura 4.1: Cámara de sedimentación gravitacional.	36
Figura 4.2: Comparación de las eficiencias para un sedimentador por gravedad, calculados por medio de los modelos de flujo en bloque y flujo mezclado.....	38
Figura 4.3: Diagrama esquemático del flujo en un ciclón estándar.	40
Figura 4.4: Precipitador dinámico.....	41
Figura 4.5: Relación entre la eficiencia de recolección y el tamaño de las partículas para diferentes tipos de ciclones.....	42
Figura 4.6: Partes componentes de la instalación de un lavador.	44
Figura 4.7: Esquema de un lavador de flujo cruzado.	45
Figura 4.8: Esquema de un lavador de flujo coordinado.	45

Figura 4.9: Esquema de un lavador a contraflujo.	46
Figura 4.10: Arreglos comunes en los lavadores de cámara de rocío.	47
Figura 4.11: Ciclón de cámara de rocío.	48
Figura 4.12: Lavador venturi.	49
Figura 4.13: Diagrama de flujo del esquema del proceso para un sistema de lavador de SO ₂ de piedra caliza.	51
Figura 6.1: Esquema general del prototipo de lavador de dióxido de azufre.	71
Figura 6.2: Esquema del experimento.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Estimaciones de las emisiones nacionales en Estados Unidos, entre 1989 y 1998 (millones de toneladas por año).....	13
Tabla 2.2: Efectos en la salud humana debidos a la exposición a material particulado.....	17
Tabla 2.3: Efectos en la salud humana debidos a la exposición a monóxido de carbono.	19
Tabla 2.4: Efectos en la salud humana debidos a la exposición a dióxido de azufre.	20
Tabla 2.5: Efectos en la salud humana debidos a la exposición a dióxido de nitrógeno.	21
Tabla 2.6: Efectos en la salud humana debidos a la exposición al ozono.....	22
Tabla 2.7: Efectos en la salud humana debidos a la exposición al plomo.....	23
Tabla 2.8: Comparación de las filosofías de control de la contaminación del aire.	28
Tabla 4.1: Comparación de las eficiencias para un sedimentador por gravedad, calculados por medio de los modelos de flujo en bloque y flujo mezclado.....	37
Tabla 4.2: Ventajas y desventajas en el uso de sedimentadores gravitacionales.	39
Tabla 4.3: Ventajas y desventajas en el uso de ciclones.	43
Tabla 4.4: Ventajas y desventajas en el uso de colectores húmedos.	50
Tabla 4.5: Ventajas y desventajas en el uso de lavadores de calcio.....	53

Tabla 4.6: Matriz de decisión.....	54
Tabla 5.1: Características de diseño de la corriente de gas a ser lavada.	58
Tabla 5.2: Suposiciones de diseño del sistema.....	58
Tabla 5.3: Caudal y masa de SO ₂	58
Tabla 5.4: Masas de CaCO ₃ , CaSO ₃ y CO ₂	59
Tabla 5.5: Parámetros de selección de la bomba y el ventilador.....	59
Tabla 5.6: Parámetros de diseño del lavador.	60
Tabla 5.7: Parámetros de diseño del tanque de retención de efluente.....	60
Tabla 5.8: Costo de los equipos del sistema de lavado de gases.	62
Tabla 5.9: Costo de los elementos del sistema de lavado de gases.	62
Tabla 5.10: Costos de instalación del sistema de lavado de gases.....	62
Tabla 5.11: Costo anual de operación por consumo de electricidad del sistema.	63
Tabla 5.12: Costo anual de operación por consumo de insumos químicos del sistema.	63
Tabla 5.13: Costo anual de operación por consumo de agua del sistema.	63
Tabla 5.14: Costo anual de mantenimiento del sistema.	64
Tabla 5.15: Flujo de capital entre los años 0 - 5.	65
Tabla 5.16: Flujo de capital entre los años 6 - 10.	65

Tabla 6.1: Concentración de SO ₂ y volumen de gases producidos según el combustible usado.	68
Tabla 6.2: Características de diseño de la corriente de gas a ser lavada modelo.	68
Tabla 6.3: Suposiciones de diseño del modelo	69
Tabla 6.4: Caudal y masa de SO ₂ modelo.	69
Tabla 6.5: Masas de CaCO ₃ , CaSO ₃ y CO ₂ modelo.	69
Tabla 6.6: Parámetros de selección de la bomba modelo.	69
Tabla 6.7: Parámetros de selección del ventilador modelo.	70
Tabla 6.8: Parámetros de diseño del lavador modelo.	70
Tabla 6.9: Parámetros de diseño del tanque de retención de efluente modelo.	70
Tabla 6.10: Resultados obtenidos en las muestras tomadas.	74
Tabla 6.11: Efectos producidos luego del lavado de gases.	75

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A: Hoja de cálculo del diseño del sistema.

Anexo B: Hoja de cálculo del análisis económico financiero del sistema.

Anexo C: Hojas de cálculo de la generación de SO₂ según el combustible usado.

Anexo D: Hoja de calculo del diseño del modelo.

Anexo E: Planos de diseño, construcción y montaje del prototipo de sistema de lavado de gases.

Anexo F: Fotografías varias de los experimentos realizados y del prototipo de sistema de lavado de gases construido.

Anexo G: Manejo de sulfatos de calcio y hoja de cálculo del análisis económico financiero del sistema considerando el manejo de sulfatos de calcio.

PRESENTACIÓN

En la actualidad la contaminación atmosférica es un tema que concierne a todos, es el momento de tomar conciencia que estamos arruinando nuestro planeta a un ritmo alarmante, está es la razón por la cual organismos nacionales e internacionales fijan los índices de contaminación a niveles más exigentes y promueven el desarrollo e implantación de nuevas tecnologías para ayudar en la lucha contra la destrucción ambiental.

En este contexto, el presente trabajo propone el estudio, diseño y construcción de un prototipo de sistema de lavado de gases, el cual ayudaría a la Refinería Estatal Esmeraldas (REE) a reducir los índices de contaminación atmosférica por compuestos de azufre, principalmente SO_2 , que actualmente, se encuentran siete veces por encima de lo fijado por los estándares nacionales, y una vez implantado, ayudará a mejorar las condiciones de vida de las poblaciones aledañas.

Hoy en día, la refinería es un foco de contaminación para la provincia de Esmeraldas y el Ecuador en general, aquí el porcentaje de contaminación atmosférica por azufre supera las 8000 partes por millón (ppm) lo que está muy por encima de lo establecido por las leyes ambientales vigentes.

Debido a la naturaleza del proyecto, y tomando en cuenta las características de la Refinería Estatal Esmeraldas, se hará mención principalmente al Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS) y al Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador (Decreto Ejecutivo 1215), que en ambos casos, establecen como límite de SO_2 emitido al ambiente, 1000 ppm.

El Decreto Ejecutivo 1215, capítulo VIII, art. 66 literal a2), que dice: “Toda planta para el tratamiento de crudo y fabricación de sus derivados deberá contar con sistemas adecuados para el tratamiento de gases ácidos y compuestos de azufre que garanticen la transformación y/o disminución de los compuestos nocivos de

azufre". Sin embargo, esta situación no se ve reflejada en la Refinería Estatal Esmeraldas.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La Refinería Estatal Esmeraldas fue diseñada por la firma Universal Oil Products (UOP) y fue construida por el Consorcio Sumitomo-Chiyoda en 1974. Su operación comenzó en 1977 con una capacidad inicial de 55000 barriles por día (bpd), pero posteriormente sufrió dos ampliaciones, la primera se dio en 1987, cuando la Firma Chiyoda Chemicals incrementó la capacidad de refinación a 90.000 bpd, aumentando también la capacidad de craqueo catalítico de 12000 a 16000 bpd, y posteriormente en 1995, el Bufete Industrial de México amplió la capacidad de craqueo catalítico de 16000 a 18000 bpd. La segunda gran ampliación de la planta se dio en 1997, cuando las empresas francesas LFP, Beicip y Franlab diseñaron la ampliación a una capacidad de 110000 bpd, adaptando también su funcionamiento para crudos entre 24 y 27 grados API, la encargada de la construcción de esta y otras adecuaciones fue la Compañía Técnica Reunida de España.

Hoy día, la refinería emite emisiones de partículas de diverso tamaño, así como hidrocarburos volátiles. Estas emisiones provienen desde las distintas fases de operación, incluyendo la unidad catalítica, el proceso de hidrosulfurización, calentamiento, quema de gas, almacenamiento y manejo del petróleo crudo y de los productos refinados, además en la combustión de productos derivados de petróleo se generan partículas de dióxido de azufre, óxido nitroso, dióxido de carbono y monóxido de carbono.

El dióxido de azufre se transforma en ácido sulfúrico al entrar en contacto con el oxígeno y la humedad del ambiente. Esto produce lluvias ácidas en las regiones cercanas, además por el fenómeno de dispersión del SO_2 en la atmósfera el olor a azufre se siente varios kilómetros alrededor de la refinería.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de sistema para reducir la concentración de SO₂ de los gases de cola generados en el proceso de desulfurización del refinamiento de crudo en la Refinería Estatal Esmeraldas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar alternativas viables desde el punto de vista técnico-económico que permitan minimizar los índices de contaminación por SO₂ en la Refinería Estatal Esmeraldas.
- Seleccionar la alternativa óptima para diseñar el prototipo del sistema según las condiciones de funcionamiento de la refinería.
- Construir un modelo a escala del sistema de remoción de SO₂.
- Evaluar el modelo construido.

1.3 ALCANCE

Proponer a la Refinería Estatal Esmeraldas la documentación técnica generada para que sea considerada como alternativa de tratamiento de los gases de cola y coadyuvar en la búsqueda de soluciones a otros problemas ambientales causados por los procesos industriales en el sector.

CAPÍTULO 2

LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

La contaminación del aire es la presencia de material indeseable en ese aire, en cantidades bastante grandes como para producir efectos nocivosⁱ. Esta definición no restringe la contaminación del aire a causas humanas, aunque normalmente sólo nos referimos a éstas. Los materiales indeseables pueden dañar la salud humana, la vegetación, los bienes materiales o el medio ambiente, así como crear ofensas estéticas en el color y olor del aire. Muchos de estos materiales nocivos entran a la atmósfera provenientes de fuentes que, en la actualidad, se encuentran más allá del control humano. Sin embargo, en las partes más densamente pobladas del planeta, en particular en los países industrializados, las fuentes principales de estos contaminantes son actividades humanas. Estas actividades se encuentran íntimamente asociadas con nuestro estándar material de vida, por lo que eliminar estas actividades causaría un impacto tan grande, que esta acción rara vez se considera. Así, el remedio propuesto en la mayor parte de los países industrializados, es continuar las actividades y a la vez controlar las emisiones contaminantes que provengan de ellas.

2.1 REVISIÓN HISTÓRICA DEL PROBLEMA

Las primeras acciones de control de la contaminación del aire se remontan al siglo XIII, pero la mayor parte del esfuerzo mundial ha tenido lugar desde 1945ⁱⁱ. Durante las décadas de 1930 y 1940, la chimenea de una fábrica que emitía una gruesa columna de humo representaba un signo de prosperidad y es así que muchas empresas de la época la incluían en sus emblemas oficiales.

Antes de 1945, los esfuerzos de control de la contaminación industrial del aire, estaban dirigidos a controlar las emisiones de las grandes fábricas que producían conflictos con los vecinos de las mismas. Gran parte de esto no comprendía la

intervención del gobierno, mas bien era una respuesta a litigios por daños provocados por las molestias causadas.

Entre 1945 y 1969, conforme aumentó gradualmente la adquisición de conciencia de los problemas de la contaminación del aire, se iniciaron algunos esfuerzos por parte de los países industrializados, así por ejemplo, el gobierno federal de los Estados Unidos empezó a vigilar y coordinar los esfuerzos locales y estatales sobre el control de la contaminación del aire, y en 1969 y 1970 experimentó un gran despertar en relación con el medio ambiente. Si se comparasen algunos periódicos importantes de 1968 con los de 1970, en los periódicos de 1968 apenas se mencionaban asuntos relacionados con el medio ambiente, pero en 1970 tenían todos los días algún artículo con este tema. En este periodo surgió la National Environmental Policy Act (Ley de Política Nacional sobre el Medio Ambiente) y la Clean Air Act (Ley del Aire Limpio), las cuales han tenido efectos arrolladores y han cambiado mucho la manera de considerar la contaminación del aire.

En la década de 1980, un nuevo tema entró a la arena de discusión de los contaminantes del aire, se trataba de la contaminación global del aire. Hasta 1980, la mayor parte de los problemas se percibían como locales, ya que los contaminantes de interés duraban poco en la atmósfera, o bien, eran emitidos en cantidades tan pequeñas que no se concebían como un problema lejos del lugar donde se generaban, de este modo, parecía lógico dejar que los gobiernos locales o estatales se enfrentaran a ellos. Pero durante esta década surgieron tres problemas relacionados con contaminantes de mayor duración y que son acarreados a través de largas distancias antes de que produzcan su daño: el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono, y la lluvia ácida. Es así que la estructura legal y administrativa desarrollada en la década de 1970 para enfrentar los problemas locales de contaminación del aire, parecía inútil ante estos problemas globales.

En el caso de Ecuador, se puede decir que la contaminación a gran escala comenzó con la modernización del Estado a partir de la primera reforma Agraria en 1963, y que se afianzó con el auge petrolero a partir de la década de 1970. Hasta entonces, el Ecuador había sido un país típicamente agro exportador, en 1950 el 70% de la población vivía en el campo y apenas el 30% en las ciudades, no había tantas industrias ni automóviles ni se utilizaban tantos pesticidas como ahora.

2.2 PROBLEMAS GLOBALES

Teóricamente, la mayoría de contaminantes pueden ser removidos de la atmósfera en la superficie de la Tierra, y hasta donde se sabe, los vertederos que existen son adecuados para capturar y darse abasto con las emisiones que resultan de las actividades del hombre y ningún cambio de larga duración ocurre en la atmósfera como resultado de las emisiones. En forma similar, se supone que los recipientes finales de estas emisiones son capaces de abastecer su carga de contaminación.

Sin embargo, existen tres áreas importantes donde las generalizaciones anteriores no se cumplen: la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera, la disminución de ozono en la estratosfera y la acumulación de sulfatos y acidez creciente asociada a la biosfera. Esta última no es global en todo el sentido de la palabra, sino que se da sobre extensas áreas alejadas de la fuente original de contaminación y como resultado se considera como un problema a escala internacional.

2.2.1 CALENTAMIENTO GLOBAL

El calentamiento global es un incremento, en el tiempo, de la temperatura media de la atmósfera terrestre y de los océanos. La teoría del calentamiento global postula que la temperatura se ha elevado desde finales del siglo XIX debido a la actividad humana, principalmente por las emisiones de CO₂ que incrementaron el

efecto invernadero. La teoría predice, además, que las temperaturas continuarán subiendo en el futuro si continúan las emisiones de gases invernadero.

La denominación "calentamiento global" generalmente implica la actividad humana. Una denominación más neutral, cambio climático, se utiliza normalmente para designar a cualquier cambio en el clima, sin entrar en discusiones sobre su causa. A veces se utiliza la fórmula cambio climático antropogénico para indicar la existencia de influencia humana.

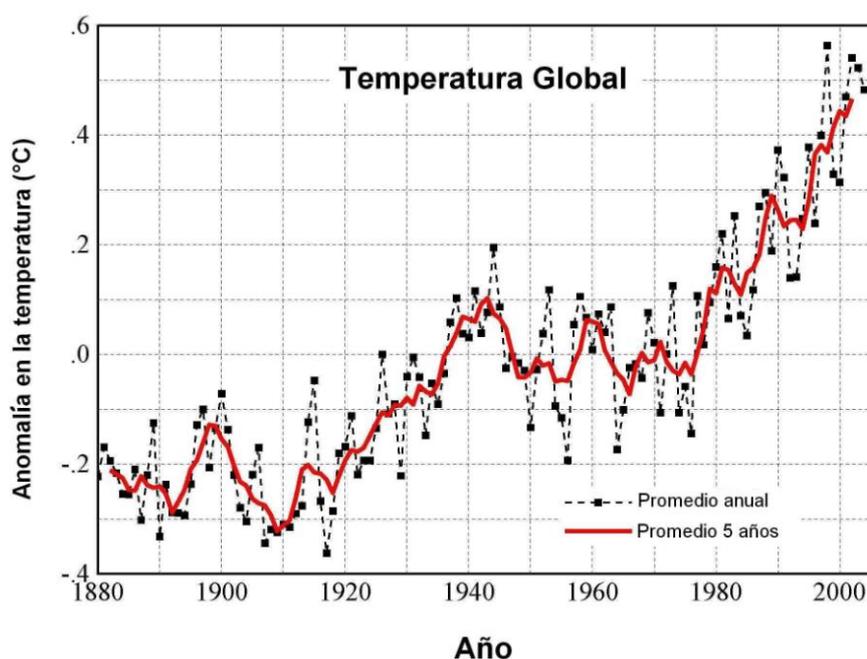


Figura 2.1: Comportamiento reciente de la anomalía global media de la temperatura.

Fuente: <http://www.giss.nasa.gov/data/update/gistemp/graphs>.

Aunque la discusión frecuentemente se centra en la temperatura, el calentamiento global o cualquier tipo de cambio climático implican cambios en otras variables: las precipitaciones globales y sus patrones, la cobertura de nubes y todos los demás elementos de nuestro sistema atmosférico se verán afectados por la disminución de la emisión de radiación infrarroja hacia el espacio, debido a los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero en el ambiente.

El Protocolo de Kyoto propone la unificación de los límites de emisiones de gases que producen efecto invernadero para los países desarrollados.

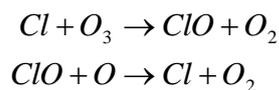
2.2.2 DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO

El ozono es el estado del oxígeno en el que cada molécula se compone de tres átomos del mismo (O_3). A temperatura y presión ambientales el ozono es un gas.

El ozono tiene un interesante uso industrial como precursor en la síntesis de algunos compuestos orgánicos, y sobre todo, como desinfectante. Su principal propiedad es que es un fortísimo oxidante. Es, sin embargo, conocido por el importante papel que desempeña en la atmósfera. A este nivel es necesario distinguir entre el ozono presente en la estratosfera y el de la troposfera. En ambos casos su formación y destrucción son fenómenos fotoquímicos.

El ozono se encuentra de forma natural en la estratosfera, formando la denominada capa de ozono. El ozono estratosférico se forma por acción de la radiación ultravioleta, que disocia las moléculas de oxígeno molecular (O_2) en dos átomos, los cuales son altamente reactivos, pudiendo reaccionar estos con otra molécula de O_2 formándose el ozono. El ozono estratosférico se destruye a su vez por acción de la propia radiación ultravioleta, ya que la radiación con longitud de onda menor de 290 nm hace que se desprenda un átomo de oxígeno de la molécula de ozono. Se forma así un equilibrio dinámico en el que se forma y destruye ozono, consumiéndose de esta forma la mayoría de la radiación de longitud de onda menor de dichos 290 nm. Así, el ozono actúa como un filtro que no deja pasar dicha radiación perjudicial hasta la superficie de la Tierra.

El equilibrio del ozono en la estratosfera se ve afectado por la presencia de contaminantes, como pueden ser los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs), que reaccionan con el ozono y hacen que se destruya más rápidamente de lo que se regenera.



Ecuación 2.1: Destrucción del ozono debido a los CFCs.

Fuente: Strauss / Mainwaring, Contaminación del aire, página 81.

Sin embargo, también podemos encontrar ozono en la zona más baja de la atmósfera, convirtiéndose en un problema, puesto que el ozono, en concentración suficiente puede provocar daños en la vegetación (a partir de unos $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) o en la salud humana (a partir de unos $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$). El mecanismo mediante el cual se genera el ozono en la troposfera es completamente distinto, ya que a esta altura no llegan las radiaciones ultravioletas. El ozono en este caso, se forma a partir de ciertos precursores como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs), contaminantes provenientes de la actividad humana. Estos contaminantes se disocian formando radicales con radiación menos energética, y dichos radicales pueden formar ozono con el oxígeno molecular. El conjunto del ozono, NO_x y VOCs forma una neblina visible en zonas muy contaminadas denominada smog fotoquímico.

El agujero de ozono no es un agujero realmente, es una reducción temporal de la capa de ozono que se produce anualmente en las regiones polares en primavera, seguida de una recuperación durante el verano. Sobre la Antártida, la pérdida del ozono llega al 70%, mientras que sobre el Ártico llega al 30%. Esta reducción se debe, según un amplio consenso científico al aumento de la concentración de cloro en la estratosfera debido a las emisiones de CFCs fabricados por los humanos.

Dado que la capa de ozono evita el paso de las ondas de luz ultravioleta más dañinas, la disminución existente del ozono y las proyecciones futuras generaron tal preocupación a nivel mundial, que se llegó a una rápida adopción de la prohibición del uso de los CFC.

Se espera que, si estas normas se mantienen, alrededor del año 2050 ambos agujeros se hayan reducido.

2.2.3 LLUVIA ÁCIDA

La lluvia ácida se forma cuando la humedad en el aire interactúa con el óxido de nitrógeno y el dióxido de azufre emitido por fábricas, centrales eléctricas y automotores que queman carbón o aceite. Esta interacción de gases con el vapor de agua forma el ácido sulfúrico y los ácidos nítricos. Finalmente, estas sustancias químicas caen a la tierra en forma de precipitación o lluvia ácida.

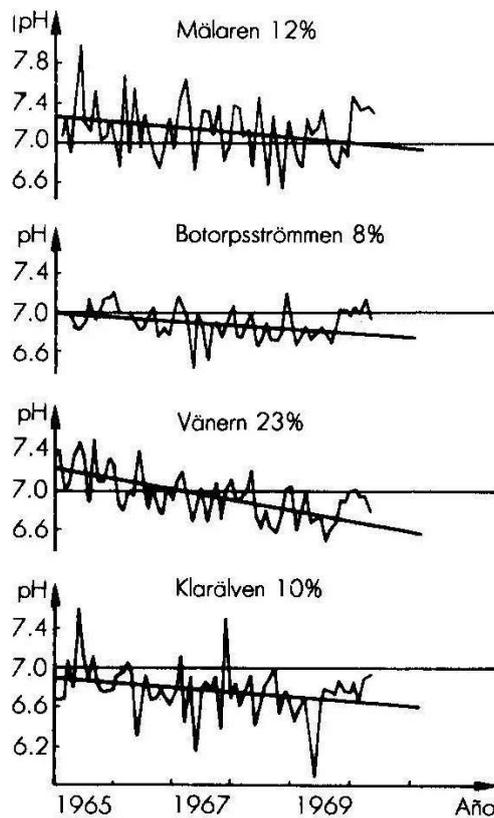


Figura 2.2: Acidez cambiante en ríos y desembocaduras de lagos suecos.

Fuente: Strauss / Mainwaring, Contaminación del aire, página 82.

Los contaminantes de la lluvia ácida pueden recorrer grandes distancias, y los vientos los trasladan miles de kilómetros antes de precipitarse en forma de rocío, llovizna, lluvia, granizo, nieve o niebla que se vuelven ácidos al absorber gases residuales de industrias o centrales térmicas que usan carburantes fósiles, gases de tubos de escape de vehículos y otras causas, ya sean naturales o antropogénicas. Provoca un fuerte deterioro en el medio ambiente.

La lluvia normalmente presenta un pH de aproximadamente 5.6 (ligeramente ácido) debido a la presencia del CO_2 atmosférico, que forma ácido carbónico (H_2CO_3). Se considera que es lluvia ácida si presenta un pH de menos de 5 y puede alcanzar el pH del vinagre, pH 3. Estos valores de pH se alcanzan por la presencia de ácidos como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), y el ácido nítrico (HNO_3). Estos ácidos se forman a partir del dióxido de azufre (SO_2), y el monóxido de nitrógeno (NO).

2.3 FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Cuando hablamos de contaminación del aire, nos preguntamos si el problema es en su mayor parte de la industria (ellos) o de los automóviles (nosotros). Los ingenieros reconocen que no existe un problema de contaminación del aire sino un grupo de problemas relacionados y que algunos de ellos son causados en su mayor parte por la industria y otros son causados en su mayor parte por los vehículos a motor.

Respecto a las fuentes de contaminación del aire, por lo general se usan cuatro términos: móvil, estacionaria, puntual y del área. Las fuentes móviles incluyen diversas formas de transporte tales como automóviles, camiones y aviones. Las fuentes estacionarias son las instalaciones no movibles, como plantas de energía y establecimientos industriales. Una fuente puntual se refiere a una fuente en un punto fijo, por ejemplo una chimenea o tanque de almacenamiento que emite contaminantes. Una fuente del área se refiere a una serie de fuentes pequeñas que en conjunto pueden afectar la calidad del aire en una región.

Tabla 2.1: Estimaciones de las emisiones nacionales en Estados Unidos, entre 1989 y 1998 (millones de toneladas por año).

Categoría de la fuente	SO ₂	
	1989	1998
Fuentes móviles	1.35	1.41
Fuentes estacionarias	21.96	18.22
Misceláneos y fuentes de área	0.01	0.01
TOTAL	23.30	19.60

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 47.

2.3.1 FUENTES MÓVILES

Las fuentes móviles de contaminación del aire son conocidas por todos e incluyen a los automóviles, buses, trenes, camiones y aviones. Estas fuentes emiten contaminantes criterio y otros contaminantes peligrosos.

La principal fuente móvil de contaminación del aire es el automóvil, pues produce grandes cantidades de monóxido de carbono y menores cantidades de óxidos de nitrógeno y azufre, y compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Las emisiones de los automóviles también contienen plomo y algunos contaminantes peligrosos. Los requisitos para el control de emisiones de automóviles han reducido considerablemente la cantidad de contaminantes del aire.

Además, los reglamentos que controlan la calidad del combustible de los automóviles también han contribuido a mejorar la eficiencia y disminuir las emisiones. Sin embargo, debido al creciente número de vehículos, los automóviles siguen siendo la principal fuente móvil de contaminación del aire.

2.3.2 FUENTES ESTACIONARIAS

Existen cientos de miles de fuentes estacionarias de contaminación del aire, incluidas las plantas de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo,

fábricas, imprentas, lavanderías, etc. Las fuentes estacionarias producen una amplia variedad de contaminantes del aire. Según la industria o proceso específico, las fuentes estacionarias pueden emitir uno o varios contaminantes criterio además de muchos contaminantes peligrosos.

Los contaminantes de fuentes estacionarias provienen principalmente de dos actividades: la combustión de carbón y petróleo en plantas de generación de energía y la pérdida de contaminantes en procesos industriales. Los procesos industriales incluyen refinerías, industrias químicas y fundiciones. Las industrias químicas son responsables de muchos contaminantes peligrosos y también de grandes cantidades de VOCs.

Existen muchos puntos específicos de emisión dentro de una fuente estacionaria que contamina el aire. Por ejemplo, en una industria química, los contaminantes del aire pueden emitirse por conductos de ventilación, tanques de almacenamiento, manejo de aguas residuales y áreas de tratamiento, instalaciones de carga y descarga, y fugas en el equipo. Un conducto de ventilación es básicamente un pasaje por donde las sustancias (principalmente en forma gaseosa) se ventilan a la atmósfera. Los típicos conductos de ventilación en una planta química son las columnas de destilación y los conductos de oxidación.

Generalmente, los tanques de almacenamiento son contenedores redondos donde se almacena materia prima líquida y productos terminados. Si bien la mayoría de los tanques están cubiertos, los contaminantes pueden ser emitidos por goteo y por expansión y enfriamiento de los líquidos causado por cambios de temperatura en el aire exterior. A medida que el líquido se expande y se contrae, el tanque respira y fuerza vapores hacia afuera a través de las aberturas del tanque. Además, los contaminantes pueden ser emitidos durante el llenado y vaciado rutinario de los tanques de almacenamiento.

Las aguas residuales dentro de una fuente estacionaria también pueden ocasionar contaminación del aire. Si las aguas residuales contienen sustancias

volátiles, éstas serán liberadas de las aguas residuales cuando entren en contacto con el aire.

Las emisiones también provienen de fugas en el equipo y de la carga y descarga de productos químicos en los camiones o embarcaciones. Las fugas en el equipo son una fuente primaria de emisiones, en particular en industrias químicas y refinerías. El término fugas en el equipo se refiere a una amplia fuente de puntos de emisión que incluyen válvulas, uniones, bombas y válvulas de descarga. Puede haber miles de estos componentes en una determinada instalación.

Normalmente las fuentes estacionarias se pueden clasificar en: fuentes puntuales y fuentes de área. Las fuentes principales son fuentes estacionarias que emiten 10 toneladas por año o más de un único contaminante peligroso del aire o 25 toneladas por año o más de cualquier combinación de contaminantes peligrosos. La fuente de área se refiere a cualquier fuente de contaminantes peligrosos que no es una fuente principal. Esta definición excluye a los automóviles.

Como se mencionó anteriormente, existen cientos de miles de fuentes de contaminación del aire. Muchas de estas fuentes generan productos de consumo útiles, crean millones de puestos de trabajo y prestan servicios y comodidades. Si bien no resulta práctico eliminar todas las fuentes de contaminación del aire, existen maneras de minimizarlas. El control y reducción de la contaminación puede lograrse a través de la instalación de dispositivos, cambios en los procesos de producción e implementación de técnicas de prevención de la contaminación.

2.4 TIPOS DE CONTAMINANTES

En teoría, el aire siempre ha tenido cierto grado de contaminación. Los fenómenos naturales tales como la erupción de volcanes, tormentas de viento e incluso la descomposición de plantas y animales contaminan el aire. Sin embargo, cuando se habla de la contaminación del aire, los contaminantes son aquéllos generados por la actividad del hombre (antropogénicos). Se puede considerar

como contaminante a la sustancia que produce un efecto perjudicial en el ambiente. Estos efectos pueden alterar tanto la salud como el bienestar de las personas.

Los contaminantes se presentan en la atmósfera en forma de partículas y gases. El material particulado está compuesto por pequeñas partículas líquidas o sólidas de polvo, humo, niebla y ceniza volante. Los gases incluyen sustancias como el monóxido de carbono, dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles.

Los contaminantes se clasifican en primarios y secundarios. Un contaminante primario es aquél que se emite a la atmósfera directamente de la fuente y mantiene la misma forma química, como por ejemplo, la ceniza de la quema de residuos sólidos. Un contaminante secundario es aquel que experimenta un cambio químico cuando llega a la atmósfera. Un ejemplo es el ozono que surge de los vapores orgánicos y óxidos de nitrógeno que emite una estación de gasolina o el escape de los automóviles. Los vapores orgánicos reaccionan con los óxidos de nitrógeno en presencia de luz solar y producen el ozono, componente primario del smog fotoquímico.

Existe otra clasificación de los contaminantes de aire como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Los contaminantes criterio se han identificado como comunes y perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objetos de estudios de evaluación publicados en documentos de criterios de calidad del aire.

2.4.1 MATERIAL PARTICULADO (PM)

Inicialmente, con la denominación de partículas totales en suspensión (PTS) se reconoció a una amplia categoría de material particulado como contaminante criterio. Las PTS son las partículas sólidas o líquidas del aire entre las cuales se incluyen contaminantes primarios como el polvo y hollín y contaminantes secundarios como partículas líquidas producidas por la condensación de vapores.

Desde la segunda mitad de la década de 1980, varios países incluyeron en sus normas sobre material particulado a las partículas con menos de 10 micrómetros de diámetro aerodinámico (PM-10). En la segunda mitad de la década de 1990, las normas sobre material particulado especificaron considerar no solo al PM-10 sino también al material particulado con menos de 2,5 micrómetros de diámetro aerodinámico (PM-2,5). El motivo de este cambio, como ya se ha comentado, es que las partículas más pequeñas son más peligrosas para el hombre porque tienen mayor probabilidad de ingresar a la parte inferior de los pulmones.

En la naturaleza, el material particulado se forma por muchos procesos, tales como la polinización de plantas, incendios forestales y los efectos del viento sobre ciertas superficies. Las principales fuentes antropogénicas de pequeñas partículas incluyen la quema de combustibles sólidos, como la madera y el carbón, las actividades agrícolas como la aplicación de fertilizantes, el almacenamiento de granos y la industria de la construcción.

El material particulado puede tener efectos perjudiciales sobre la salud y bienestar del hombre, puede contribuir a aumentar las enfermedades respiratorias como la bronquitis y exacerbar los efectos de algunas enfermedades cardiovasculares, y puede afectar la visibilidad en ciertas zonas de alta contaminación. Así mismo puede retrasar la velocidad de deterioro de muchos materiales hechos por el hombre.

Tabla 2.2: Efectos en la salud humana debidos a la exposición a material particulado.

Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Efecto observado	Impacto
200	Disminución capacidad respiratoria	Moderado
250	Aumento de enfermedades respiratorias en ancianos y niños	Moderado
400	Afecta a toda la población	Grave
500	Aumento de mortalidad en adulto mayor y enfermos	Muy grave

Fuente: OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.

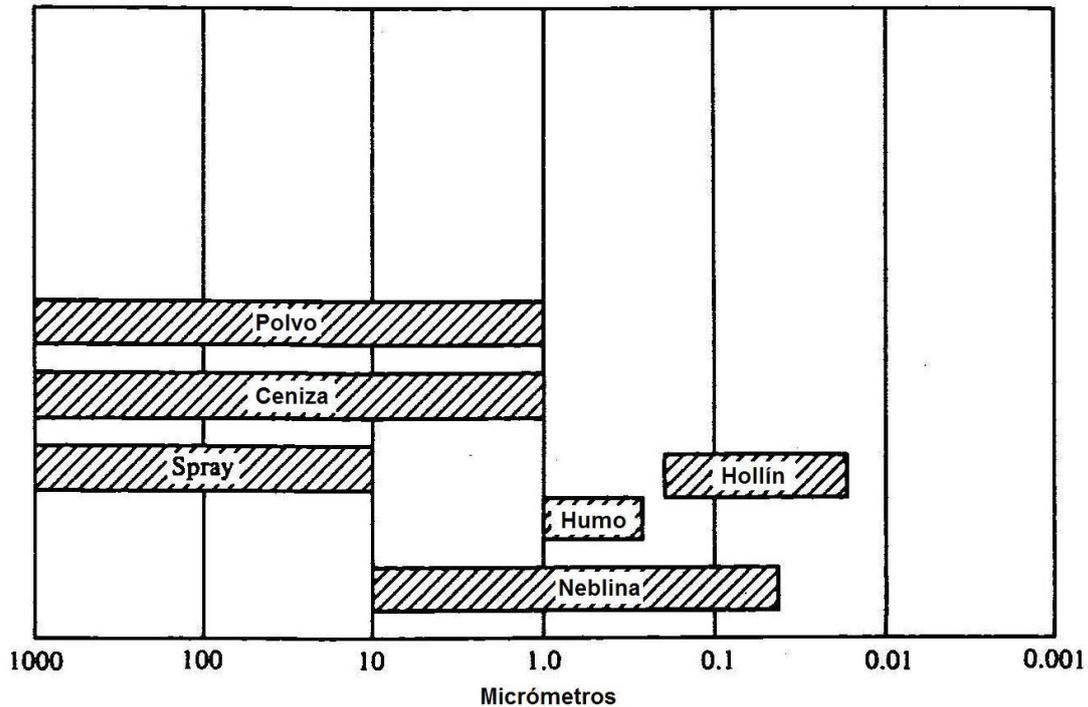


Figura 2.3: Tamaños de las partículas en micrones.

Fuente: Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, página 432.

2.4.2 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que en concentraciones altas puede ser letal. En la naturaleza se forma mediante la oxidación del metano, que es un gas común producido por la descomposición de la materia orgánica. La principal fuente antropogénica de monóxido de carbono es la quema incompleta de combustibles como la gasolina.

Para que se complete el proceso de combustión es necesario que haya cantidad adecuada de oxígeno. Cuando éste es insuficiente, se forma el monóxido de carbono y una manera de reducirlo es exigir que los automóviles sean afinados debidamente para asegurar la mezcla del combustible con el oxígeno.

Tabla 2.3: Efectos en la salud humana debidos a la exposición a monóxido de carbono.

Concentración de carboxihemoglobina en la sangre (%)	Efecto observado
2.3 - 4.3	Disminución en la capacidad de realizar un ejercicio máximo en un corto tiempo en individuos jóvenes saludables
2.9 - 4.5	Disminución en la duración de ejercicio debido a dolor en el pecho (angina) en pacientes con enfermedades al corazón, disminución del consumo máximo de oxígeno y tiempo para realizar ejercicio en individuos jóvenes saludables durante ejercicio fuerte
5.0 - 5.5	Disminución en la percepción visual y auditiva, pérdida de la capacidad sensorial, motora y de vigilancia
5.0 - 17.0	Disminución en el consumo máximo de oxígeno durante el ejercicio fuerte en individuos jóvenes saludables
7.0 - 20.0	Dolor de cabeza, decaimiento
20.0 - 30.0	Mareo, náusea, debilidad
30.0	Confusión, colapso durante el ejercicio
40.0	Pérdida de conciencia y muerte si la exposición continúa
50.0	Muerte

Fuente: OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.

La exposición al monóxido de carbono puede exacerbar las enfermedades del corazón y del pulmón. El peligro es más evidente en nonatos, neonatos, ancianos y en quienes sufren de enfermedades crónicas.

2.4.3 ÓXIDOS DE AZUFRE (SO_x)

Los óxidos de azufre son gases incoloros que se forman al quemar azufre. El dióxido de azufre (SO₂) es el contaminante criterio que indica la concentración de óxidos de azufre en el aire. La fuente primaria de óxidos de azufre es la quema de combustibles fósiles, en particular el carbón. Se ha denominado al dióxido de azufre como un contaminante que pasa a través del combustible, porque la cantidad de dióxido de azufre emitido al aire es casi la misma cantidad presente en el combustible.

Tabla 2.4: Efectos en la salud humana debidos a la exposición a dióxido de azufre.

Concentración en 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Efecto observado
400 - 900	Posible incremento de los trastornos respiratorios (tos, irritación de la garganta y silbidos en el pecho) en personas con asma
500 - 1700	Incremento de los trastornos respiratorios en personas con asma y posible agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas
1700 - 2300	Incremento significativo de los trastornos respiratorios en personas con asma y agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas
2300 - 2900	Trastornos respiratorios severos en personas con asma y riesgo serio de agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas
> 2900	Cambios en la función pulmonar y trastornos respiratorios en individuos sanos

Fuente: OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.

Se ha encontrado que los óxidos de azufre perjudican el sistema respiratorio, especialmente de las personas que sufren de asma y bronquitis crónica. Los efectos de los óxidos de azufre empeoran cuando el dióxido de azufre se combina con partículas o la humedad del aire. El efecto que causa mayor preocupación es la contribución de óxidos de azufre en la formación de lluvia ácida.

2.4.4 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno son un grupo de gases formados por nitrógeno y oxígeno. El nitrógeno es el elemento más común del aire y representa 78 por ciento del aire que respiramos. Los óxidos de nitrógeno incluyen compuestos como óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2). El término NO_x se refiere a la combinación de estas dos sustancias.

Los procesos naturales y los realizados por el hombre producen óxidos de nitrógeno. En una escala global, la emisión natural de óxido de nitrógeno es casi 15 veces mayor que la realizada por el hombre. Las fuentes más comunes de

óxidos de nitrógeno en la naturaleza son la descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, los incendios forestales y de pastos, y la actividad volcánica. Las fuentes principales de emisión antropogénica son los escapes de los vehículos y la quema de combustibles fósiles.

Tabla 2.5: Efectos en la salud humana debidos a la exposición a dióxido de nitrógeno.

Concentración (ppm)	Tiempo de exposición	Efecto observado
5.0	14 hr	Incremento de la resistencia de las vías aéreas, aumento de la hiperreactividad bronquial en individuos normales
2.5	2 hr	Incremento de la resistencia de las vías aéreas en individuos normales
1.0	2 hr	Pequeño cambio en CVF* en individuos normales
0.5 - 5.0	3 - 60 min	Incremento de la resistencia de las vías aéreas en individuos con bronquitis crónica
0.5	20 min	Disminución de FEVI**

*CVF: Capacidad Vital Forzada, **FEVI: Flujo Espiratorio Velocidad Inicial

Fuente: OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.

El dióxido de nitrógeno daña el sistema respiratorio porque es capaz de penetrar las regiones más profundas de los pulmones. Asimismo, contribuye a la formación de la lluvia ácida.

2.4.5 OZONO (O₃)

El ozono es considerado como un contaminante criterio y secundario. Se forma mediante una serie compleja de reacciones en la atmósfera. En términos sencillos, se forma mediante la reacción química del dióxido de nitrógeno (NO₂) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en presencia de la luz solar.

El ozono es el principal componente del smog fotoquímico o niebla fotoquímica y causa efectos nocivos en seres humanos y plantas. La población de mayor riesgo

a la contaminación por ozono son los enfermos y ancianos, así como los neonatos y nonatos.

Tabla 2.6: Efectos en la salud humana debidos a la exposición al ozono.

Concentración (ppm)	Tiempo de exposición	Efecto observado
0.08 - 0.15	---	Tos y dolor de cabeza
0.12	1 - 3 hrs.	Disminución de CVF* y FEVI**, incremento de la sensibilidad de las vías aéreas, lo cual podría significar un aumento en la respuesta a otros contaminantes en individuos sanos durante el ejercicio
0.12	2 - 5 hrs.	Disminución de la función pulmonar en niños y adultos durante ejercicio fuerte
0.24	1 - 3 hrs.	Incremento en la frecuencia respiratoria, disminución de la resistencia de las vías aéreas, disminución de la función pulmonar en individuos sanos durante el ejercicio

*CVF: Capacidad Vital Forzada, **FEVI: Flujo Espiratorio Velocidad Inicial

Fuente: OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.

Para controlar el ozono debe entonces controlarse a los precursores de éste. Las fuentes principales de NO₂ y VOCs son los productos de la combustión incompleta que emiten los escapes de los vehículos, la quema de combustibles fósiles y el uso de compuestos de petróleo y solventes orgánicos en procesos industriales y de limpieza.

2.4.6 PLOMO (Pb)

El plomo es una sustancia natural que abunda en el ambiente. Debido a sus propiedades físicas que le permiten formarse y moldearse fácilmente, se emplea en muchas aplicaciones. Hace un tiempo el plomo se usaba frecuentemente para fabricar tuberías de agua y recipientes para alimentos y sirvió como ingrediente importante en la fabricación de pinturas y gasolina.

Tabla 2.7: Efectos en la salud humana debidos a la exposición al plomo.

Concentración de plomo en sangre ($\mu\text{g}/100\text{ml}$)	Efecto observado
10	Inhibición de la actividad de la enzima AAL-D, edad gestacional reducida (exposición prenatal), bajo peso al nacer (exposición prenatal), retardo en crecimiento
12	Interferencia en el metabolismo de la vitamina D
15 - 20	Elevación de protoporfirinas eritrocitarias, alteraciones electrofisiológicas en el SNC
20	Alteraciones conductuales, déficit en la atención
30	Disminución en la conducción nerviosa periférica
40	Aumento del AAL en suero y del AAL-U, reducción en la producción de hemoglobina, velocidad de conducción nerviosa periférica reducida, alteraciones en el aprendizaje, síntomas gastrointestinales
50	Disminución marcada del cociente de inteligencia
70 - 80	Anemia franca, nefropatía grave, encefalopatía, daño cerebral grave, retardo mental grave

Fuente: OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.

La fuente primaria de contaminación del aire por plomo ha sido el uso de combustibles con plomo en automóviles. Como aditivo en la gasolina, el plomo desacelera el proceso de combustión en los motores. Esto se debe a que el plomo no se consume en el proceso de combustión, sin embargo se emite como material particulado. Uno de los más grandes éxitos ambientales de las dos últimas décadas ha sido la reducción de plomo en el aire gracias al mayor uso de gasolina sin plomo y a la reducción del contenido de plomo en el combustible.

El plomo es un contaminante importante del aire porque es tóxico para los humanos. Su difícil remoción del cuerpo hace que se acumule en varios órganos y puede dañar el sistema nervioso central. Un gran número de estudios científicos ha documentado los efectos nocivos de la exposición humana al plomo.

2.5 FILOSOFÍAS SOBRE EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

El deseo de todos los interesados en la contaminación del aire es tener un medio por completo no contaminado, sin que a nadie le cuesteⁱⁱⁱ. Eso parece ser imposible, de modo que la meta lógica es tener un medio ambiente adecuadamente limpio, obtenido con un costo conveniente y con este costo distribuido de modo apropiado entre la industria, los propietarios de automóviles, los poseedores de casas y otras fuentes de contaminantes. Una filosofía de control de la contaminación del aire es un conjunto fundamental de ideas acerca de cómo se determina, qué constituye un medio ambiente adecuadamente limpio, el costo conveniente y la distribución apropiada de ese costo.

Existen filosofías: las normas sobre emisiones, las normas de la calidad del aire, los impuestos por emisiones, y las normas del costo-beneficio. Las dos primeras se están aplicando en la actualidad y son bastante comprendidas y ampliamente difundidas. Las dos últimas han sido tema de publicaciones académicas y no se han puesto mucho en la práctica.

2.5.1 FILOSOFÍA DE LAS NORMAS SOBRE EMISIONES

La idea básica de esta filosofía es que existe algún grado máximo posible (o práctico) de control de las emisiones, Este grado varía entre las diversas clases de emisores, por ejemplo, automóviles, refinerías, generadoras eléctricas, y se supone que se puede determinar para cada clase. Si se determina este grado de control para cada clase y se exige que todos los miembros de esa clase limiten las emisiones hasta este grado máximo posible, entonces el índice de emisiones de contaminantes será el más bajo posible. Debido a que este índice de emisiones y la limpieza del aire están inversamente relacionados, se concluye que si se pone en práctica esta filosofía con todo rigor se tendrá el aire más limpio posible. Por consiguiente, a ésta filosofía también se la conoce como filosofía del aire más limpio posible.

2.5.2 FILOSOFÍA DE LAS NORMAS DE LA CALIDAD DEL AIRE

También es conocida como filosofía de daño cero. Anteriormente se dijo que existen valores umbral, debajo de los cuales no ocurriría daño alguno por la contaminación del aire, de forma tal que, la filosofía de las normas de la calidad del aire se basa en la hipótesis de que la situación verdadera para la mayor parte de los contaminantes del aire es la situación del valor umbral. Si esa hipótesis es verdadera y si se pueden determinar los valores de la concentración de los contaminantes (incluyendo el tiempo de exposición) que correspondan a esos valores umbral, así como se pueden regular el tiempo, el lugar y la cantidad de emisiones de contaminantes para garantizar que nunca se sobrepasen estos valores umbral, entonces no puede haber daño por contaminación del aire, nunca y en ninguna parte.

A pesar de que el ordenamiento jurídico ecuatoriano cuenta con suficientes leyes y reglamentos en la materia, no existe un régimen legal propio, único y efectivo a partir del cual se controle y regule el manejo de los contaminantes; esta inexistencia de un régimen legal propio trae como consecuencia una duplicidad y confusión de competencias y funciones entre los actores, lo cual genera una seria imprecisión en virtud de la falta de definición del ámbito y de los límites de acción al momento de ponerlas en ejecución.

Debido a la naturaleza del proyecto, y tomando en cuenta las características de la Refinería Estatal Esmeraldas, se hará mención principalmente al Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS) y al Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador (Decreto 1215), que en ambos casos, establecen como límite de SO₂ emitido al ambiente, 1000 ppm.

2.5.3 FILOSOFÍA DE LOS IMPUESTOS POR EMISIONES

Consiste en crear leyes donde se impondrían impuestos a cada emisor de los contaminantes principales, según su índice de emisiones, así por ejemplo, X

centavos por kilogramo del contaminante Y. Esta tasa de impuestos se fijarla de modo tal que la mayor parte de los emisores importantes encontrarían más económico instalar equipos de control de la contaminación, que pagar los impuestos. En su forma pura, estas leyes no ejercerían alguna sanción legal o moral contra un emisor que eligiera pagar el impuesto y no controlar las emisiones en lo absoluto.

También se podría combinar los impuestos por emisiones con la filosofía de las normas de la calidad del aire, donde, los impuestos por emisiones actuarían como un incentivo adicional para reducir las emisiones hasta niveles más bajos que los requeridos para cumplir con las normas de la calidad del aire. Otra alternativa consiste en aumentar la tasa de impuestos paulatinamente con el tiempo, hasta alcanzar una calidad predeterminada del aire.

2.5.4 FILOSOFÍA DEL COSTO-BENEFICIO

En el enfoque del costo-beneficio se supone que no existen umbrales o en el caso de existir, son demasiado bajos como para destinar medios para tener aire con ese grado de limpieza. De ser así, entonces se debe aceptar cierta cantidad de daño por contaminación del aire para alguien, en alguna parte. En esta filosofía se sugiere que se intente decidir de la manera más racional, cuánto daño debe aceptarse y de que manera, y cuánto se debe estar dispuesto a gastar para reducir los daños hasta este nivel.

En la figura 2.4 se ilustra la idea que propone la filosofía del costo-beneficio. A la derecha, una alta concentración del contaminante en el aire ambiente corresponde a un costo cero por control de la contaminación. Se puede reducir la concentración en el aire ambiente por medio de gastos para control de la contaminación. El costo del control sube en forma pronunciada a medida que la concentración en el aire ambiente se vuelve pequeña. Con concentración cero, se tienen costos cero por daños, el costo por daño aumenta según aumenta la concentración. La suma de los dos costos tiene un valor mínimo en alguna

concentración intermedia. Este mínimo corresponde al gasto óptimo para control de la contaminación y los gastos por arriba o por debajo de él son antieconómicos.

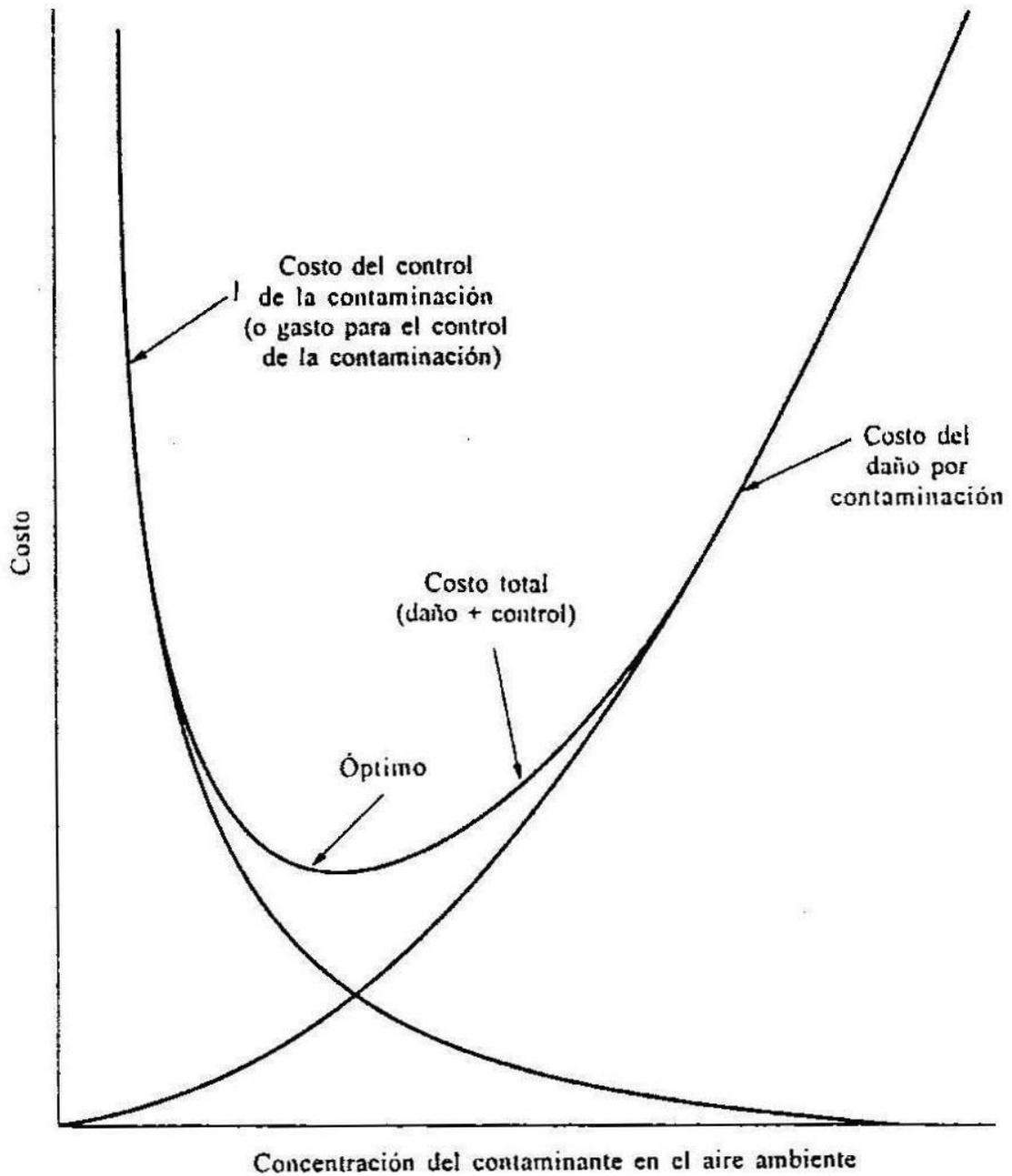


Figura 2.4: Representación esquemática de la relación entre el daño, el control, y los costos totales, para algún contaminante en algún lugar.

Fuente: De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 51.

Tabla 2.8: Comparación de las filosofías de control de la contaminación del aire.

Cualidad deseable	Normas sobre emisiones	Normas de la calidad del aire	Impuestos por emisiones	Análisis costo-beneficio
Eficacia respecto al costo	Muy mala	Buena	Regular	Excelente
Sencillez	Excelente	Mala	Excelente	Terrible
Posibilidad de ser obligatoria	Excelente	Regular	Excelente	Desconocida
Flexibilidad	Mala	Regular	Innecesaria	Desconocida
Capacidad evolutiva	Regular	Regular	Buena	Buena

Fuente: De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 41.

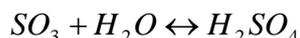
CAPÍTULO 3

ÓXIDOS DE AZUFRE (SO_x)

Los óxidos de azufre (SO_x), son probablemente los contaminantes antropogénicos del aire más difundidos e intensamente estudiados^{iv}. Incluyen seis diferentes compuestos gaseosos: monóxido de azufre (SO), dióxido de azufre (SO₂), trióxido de azufre (SO₃), tetraóxido de azufre (SO₄), hexaóxido de azufre (S₂O₃) y heptaóxido de azufre (S₂O₇). El SO₂ y el SO₃ son los dos óxidos de azufre de más interés en el estudio de la contaminación del aire.

El SO₂ es un gas incoloro, no inflamable, y no explosivo. En concentraciones sobre los 784 µg/m³ (0.3 ppm) tiene un sabor algo picante y sobre los 1306 µg/m³ (0.5 ppm) presenta un olor muy característico. El SO₂ es muy soluble en agua (11.3 g/100 mL a 20°C), tiene un peso molecular de 64.06, es decir, casi el doble que el aire. Se estima que puede permanecer en el aire entre dos y cuatro días, tiempo durante el cual puede viajar hasta 1000 km, razón por la cual, los problemas con el SO₂ se consideran de carácter internacional.

A pesar de que el SO₂ es relativamente estable en la atmósfera, puede actuar como agente reductor u oxidante. Además, puede reaccionar de manera fotoquímica o catalítica con otros componentes en la atmósfera, así, el SO₂ puede producir SO₃, H₂SO₄ y sales de ácidos sulfúricos



Ecuación 3.1: Ácido sulfuroso y sulfúrico, respectivamente.

Fuente: Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, página 449.

Los efectos producidos por la contaminación atmosférica dependen principalmente de la concentración de contaminantes, del tipo de contaminantes presentes, de tiempo de exposición y de las fluctuaciones temporales en las

concentraciones de contaminantes, así como de la sensibilidad de los receptores y los sinergismos entre contaminantes. Hay que tener muy en cuenta la graduación del efecto a medida que aumentan la concentración y el tiempo de exposición

3.1 EFECTOS EN LA SALUD DE LOS SERES HUMANOS

Las relaciones existentes entre las enfermedades humanas y la exposición a la contaminación no son sencillas ni se conocen con exactitud. No obstante, existen pruebas abundantes de que en general, las concentraciones elevadas de contaminantes en el aire son peligrosas para los seres humanos y animales.

Los efectos que producen sobre la salud se ponen claramente de manifiesto, como se ha observado en Londres, Nueva York y Osaka entre otras ciudades, por el aumento de la mortalidad, sobre todo en las personas de edad avanzada o en los individuos más sensibles por cualquier razón. Más difíciles de discernir son los efectos que, a largo plazo, pueden producir las exposiciones episódicas a elevadas concentraciones medias y bajas de contaminantes.

Se ha comprobado la relación existente entre la contaminación atmosférica, producida por partículas en suspensión y anhídrido sulfuroso, y la aparición de bronquitis crónica caracterizada por la producción de flemas, la exacerbación de catarros y dificultades respiratorias tanto en los hombres como en las mujeres adultas. Se ha observado igualmente, que cuando las concentraciones tanto de SO₂ como de partículas en suspensión superan los 500 µg/m³ de aire^v, como promedio en 24 horas, se produce un aumento de la mortalidad en la población en general, siendo los grupos más sensibles los individuos con procesos cardíacos o pulmonares. Con promedios diarios de 250 µg/m³ de SO₂^{vi} y de humos se ha registrado el empeoramiento en los enfermos con afecciones pulmonares.

Es de destacar que las concentraciones de partículas en suspensión y de SO₂ que pueden provocar la aparición de efectos sobre la salud, pueden variar de un

lugar a otro según cuáles sean las características físicas y químicas de las partículas, y en función de la presencia en el aire de otros contaminantes que puedan producir efectos sinérgicos con aquéllos.

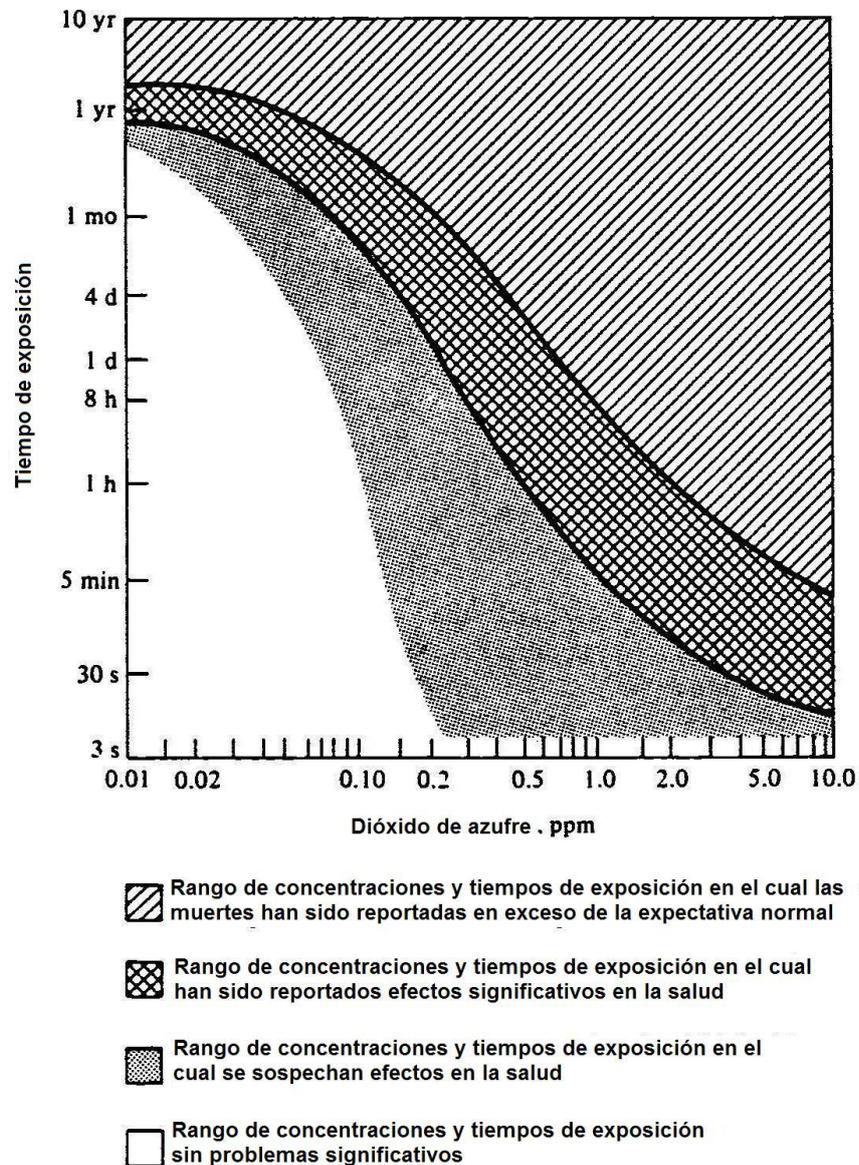


Figura 3.1: Efectos de la contaminación por óxido de azufre en la salud humana.

Fuente: Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, página 451.

3.2 EFECTOS EN LAS PLANTAS

Las plantas muestran una especial sensibilidad a la mayor parte de los contaminantes del aire, y sufren daños significativos a concentraciones mucho más bajas que las necesarias para causar efectos perjudiciales sobre la salud humana y animal.

Es muy difícil establecer valores límites de la contaminación atmosférica a partir de los cuales los efectos negativos se empiezan a manifestar, ya que estos dependen de la constitución de la planta y de la especie de que se trate.

Por otra parte, los efectos producidos por la contaminación se pueden manifestar por la alteración de diversos mecanismos vitales de las plantas. Así, las funciones metabólicas y los tejidos vegetales se pueden ver afectados como consecuencia de la acción de gases como el anhídrido sulfuroso (SO_2), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos de flúor. Los daños causados se manifiestan en forma de necrosis foliar en áreas localizadas que presentan un color marrón-rojizo-blanco, de clorosis, adquiriendo el tejido una coloración verde pálida o amarilla, o por la aparición de manchas puntuales necróticas. Si la acción del contaminante es muy fuerte puede llegar a paralizar el crecimiento de la planta.

Entre los distintos contaminantes que se presentan generalmente en el aire ambiente, el SO_2 es el que tiene mayor importancia debido a la gran toxicidad que tiene para la vegetación.

Los daños producidos por el SO_2 a las plantas obedecen a la exposición a altas concentraciones durante períodos cortos, o por la exposición a concentraciones relativamente bajas durante largos períodos.

Los daños agudos se producen como consecuencia de exposiciones cortas a concentraciones elevadas. Exposiciones medias diarias de $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 ^{vii} durante el período de crecimiento, pueden causar daños en las coníferas más

sensibles. Estos daños se caracterizan por la aparición de necrosis apicales de color rojo o anaranjado.

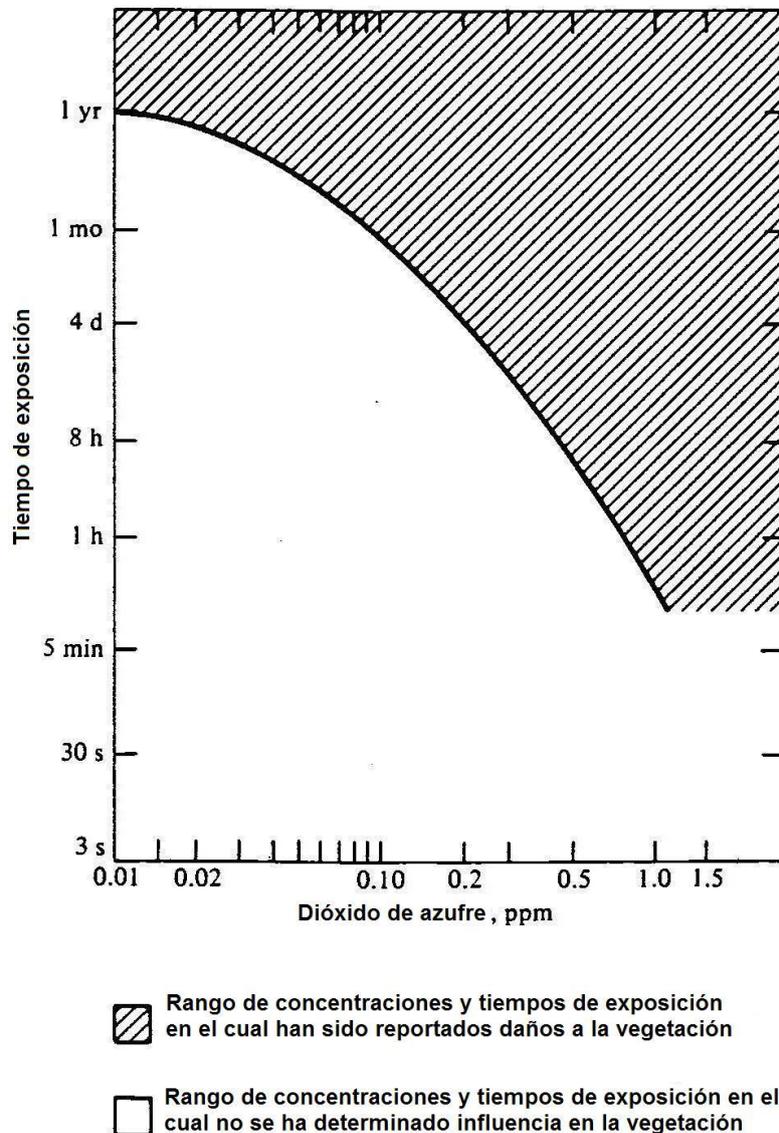


Figura 3.2: Efectos de la contaminación por óxido de azufre en la vegetación.

Fuente: Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, página 452.

La exposición a menores concentraciones durante tipos de exposición más largos ocasiona lesiones crónicas. Exposiciones medias anuales de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{SO}_2^{\text{viii}}$ pueden causar daños a especies forestales sensibles. Estas se manifiestan por

un gradual amarillamiento de la hoja que se va extendiendo desde la zona apical a la base de la misma, causada por dificultades en el mecanismo sintetizador de la clorofila. En las plantas dañadas se encuentran grandes cantidades de sulfato en las hojas con síntomas crónicos.

Las brumas de ácido sulfúrico, causadas por la presencia en el aire de los óxidos de azufre, producen daños en las hojas, caracterizados por la aparición de manchas producidas por las gotas de ácido depositadas sobre las hojas humedecidas por el rocío o la niebla. Concentraciones relativamente bajas de SO_2 pueden causar daños importantes en la vegetación sensible, como consecuencia de la acción sinérgica de este contaminante con el ozono y los óxidos de nitrógeno, aunque estos se presenten en bajas concentraciones en el aire.

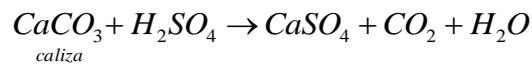
3.3 EFECTOS EN LOS MATERIALES

Cada vez se está prestando más atención, tanto por sus repercusiones económicas como por los daños irreparables que causa sobre los objetos y los monumentos de alto valor histórico-artístico, a los efectos que la contaminación atmosférica produce sobre los materiales.

La acción de los contaminantes atmosféricos sobre los materiales puede manifestarse por la sedimentación de partículas sobre la superficie de los mismos, afeando su aspecto externo, o por ataque químico al reaccionar el contaminante con el material. Los SO_x causan daños a muchos tipos de materiales, bien directa o indirectamente. Un alto contenido de SO_x en el aire produce la aceleración de la corrosión de los metales tales como el acero al carbono, zinc, acero galvanizado, compuestos del cobre, níquel y aluminio. Esta aceleración se ve favorecida por la presencia de partículas depositadas por la humedad y por la temperatura.

En general, puede señalarse que la corrosividad de una atmósfera depende de condiciones meteorológicas y factores de contaminación. Se han observado correlaciones entre tasas de corrosión en metales y concentraciones de SO_2 en la

atmósfera, dándose las tasas altas de corrosión más altas en zonas industrializadas. Las nieblas de ácido sulfúrico procedentes de la conversión catalítica del SO₂ a SO₃ en la atmósfera, atacan a los materiales de construcción como el mármol, la caliza y la argamasa, convirtiendo los carbonatos en sulfatos solubles en el agua de lluvia. Esto unido a que el volumen específico de los sulfatos es mayor que el de los carbonatos, hace que en la piedra aparezcan escamas y se debilite mecánicamente.



Ecuación 3.2: Acción del H₂SO₄ sobre el mármol.

Fuente: Strauss / Mainwaring, Contaminación del aire, página 74.

Los compuestos de azufre pueden producir daños en pinturas plásticas, papel, fibras textiles y sobre los contactos eléctricos de los sistemas electrónicos, dando lugar a deficiencias en su funcionamiento.

CAPÍTULO 4

DISPOSITIVOS DE CONTROL DE LAS EMISIONES DE SO₂

El control de las partículas (contaminantes físicos) se realiza principalmente por medio de procesos físicos, que no comprenden un cambio en la naturaleza química del contaminante. Sin embargo, contaminantes como los óxidos de azufre (contaminantes químicos), no se pueden capturar en forma económica por medios físicos, de manera que su control se da en gran parte por medios químicos.

Los dispositivos usados para remover contaminantes químicos, son en general, muy parecidos a los usados para contaminantes físicos, la diferencia radica en que, en alguna parte del proceso de captura se da una reacción química.

4.1 SEDIMENTADORES POR GRAVEDAD

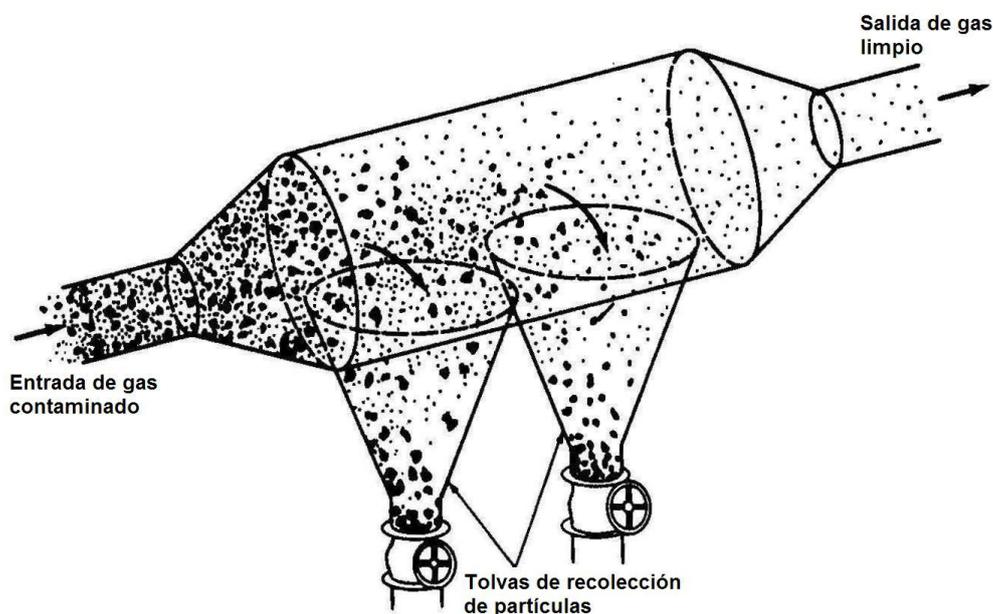


Figura 4.1: Cámara de sedimentación gravitacional.

Fuente: Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, página 521.

Una cámara de sedimentación gravitacional como su nombre lo indica es una cámara larga por la cual pasa lentamente la corriente de gas contaminado, permitiendo que transcurra el tiempo suficiente para que las partículas se sedimenten por gravedad hasta el fondo.

Existen dos modelos que describen el funcionamiento de estos dispositivos:

Flujo en bloque

La velocidad horizontal que experimenta la partícula (V_x) es la misma en todas las posiciones de la cámara.

Flujo mezclado

Existe un gradiente de concentración en la dirección horizontal (con mezcla total en la dirección vertical, es decir en la sección transversal perpendicular al flujo)

Las eficiencias de estos dispositivos independientemente del modelo de flujo dependen del diámetro de las partículas.

Tabla 4.1: Comparación de las eficiencias para un sedimentador por gravedad, calculados por medio de los modelos de flujo en bloque y flujo mezclado.

Diámetro de partícula (μm)	η bloque	η mezclado
1	0.000303	0.000303
10	0.0303	0.0298
30	0.273	0.239
50	0.76	0.53
57.45	1.00	0.63
100	---	0.95
120	---	0.99

Fuente: De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 225.

Se debe tomar en cuenta que cuando los diámetros de las partículas a ser capturadas son muy pequeños las eficiencias de captura son similares en ambos modelos, pero al aumentar el diámetro de las partículas, las eficiencias varían notablemente, debido a las características de funcionamiento propias de cada modelo.

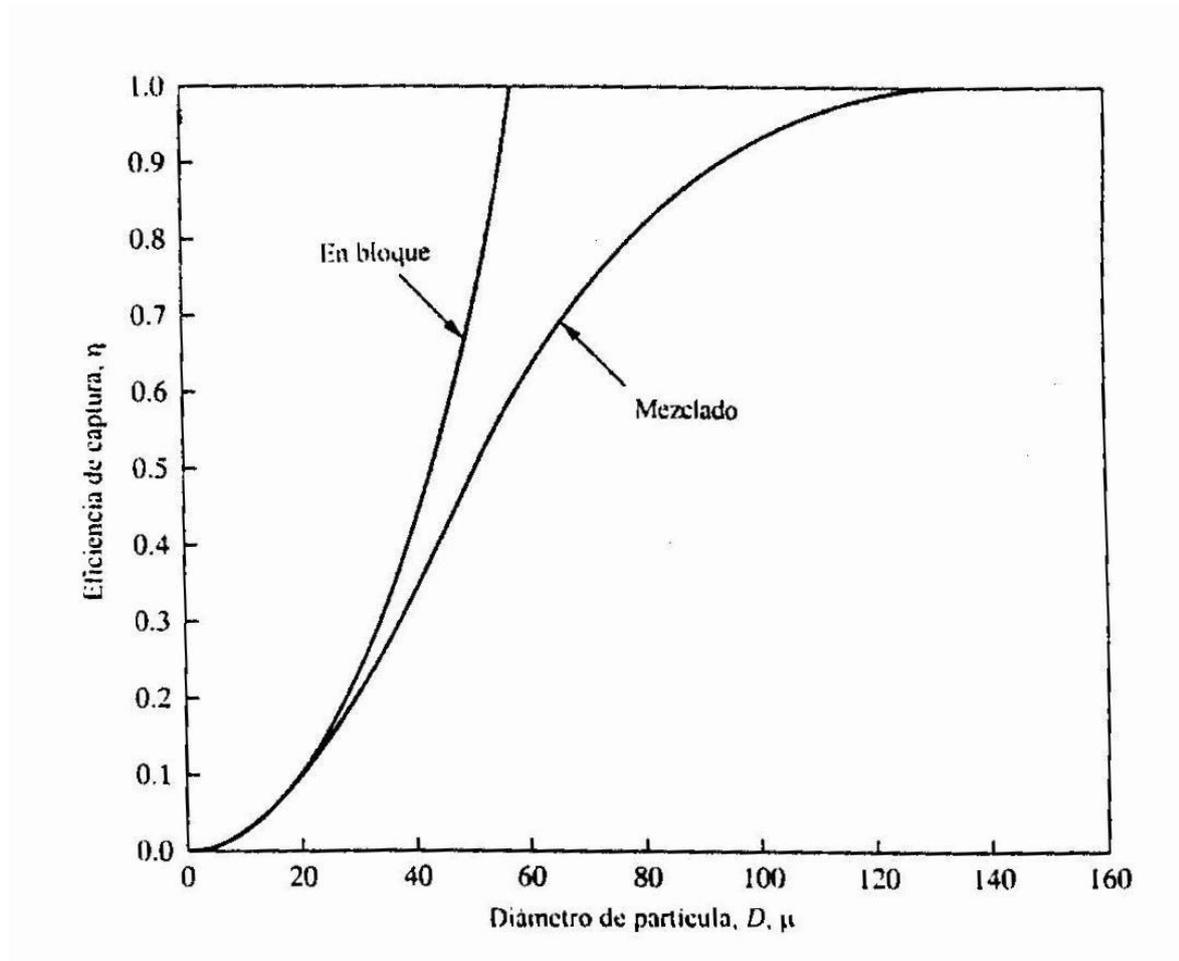


Figura 4.2: Comparación de las eficiencias para un sedimentador por gravedad, calculados por medio de los modelos de flujo en bloque y flujo mezclado.

Fuente: De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 225.

Los costos relacionados a estos aparatos son muy bajos, ya que el costo inicial es mínimo y al no requerir prácticamente mantenimiento los costos por operación son despreciables.

Tabla 4.2: Ventajas y desventajas en el uso de sedimentadores gravitacionales.

Ventajas	Desventajas
El dispositivo es eficiente para material particulado de diámetro mayor de 30 μm	No puede ser usado para tratar contaminantes gaseosos
Fácil construcción y limpieza, es sencillo y requiere poco mantenimiento en intervalos regulares	Para elevar la eficiencia en la captura de partículas pequeñas se debe aumentar la longitud, de manera que el dispositivo se vuelve muy costoso y difícil de mantener
Utiliza solo la fuerza de gravedad para la sedimentación de partículas, es decir, no necesita dispositivos adicionales para lograr otros efectos	Su aplicación esta dirigida para industrias fundidoras y metalúrgicas en las que se tratan gases muy secos que emiten material particulado grande
Cualquiera de los dos modelos de análisis (flujo en bloque y flujo mezclado), requiere cálculos sencillos	Al ser un sistema en seco, se tiene un aumento de cenizas volátiles de salida

Fuente: Autores.

4.2 SEPARADORES CENTRÍFUGOS

Los colectores centrífugos son dispositivos que emplean la fuerza centrífuga en lugar de la gravedad para separar las partículas de la corriente de gas. Debido a que la fuerza centrífuga generada dentro del aparato es varias veces mayor que la fuerza gravitacional, puede remover partículas de diámetros mucho más pequeños que los sedimentadores gravitacionales.

Generalmente se usan dos tipos colectores centrífugos:

Ciclones

Consiste en un cuerpo cilíndrico vertical con una salida para el polvo en el fondo cónico. La corriente de gas ingresa por una admisión rectangular normalmente del doble de alto que de ancho, dispuesta en forma tangencial al cuerpo circular del ciclón, de modo que el gas entrante fluya alrededor de la circunferencia del cuerpo cilíndrico, no de manera radial hacia adentro. El gas se mueve en espiral alrededor de la parte exterior del cuerpo cilíndrico con una componente hacia

abajo; en seguida se vuelve y se mueve en espiral hacia arriba y sale por la parte superior del aparato. Durante el movimiento exterior en espiral del gas, las partículas son impulsadas hacia la pared por la fuerza centrífuga, en donde son capturadas, se juntan entre sí y forman aglomerados más grandes que se deslizan hacia abajo por acción de la gravedad y son recogidas en la tolva para el polvo en el fondo.

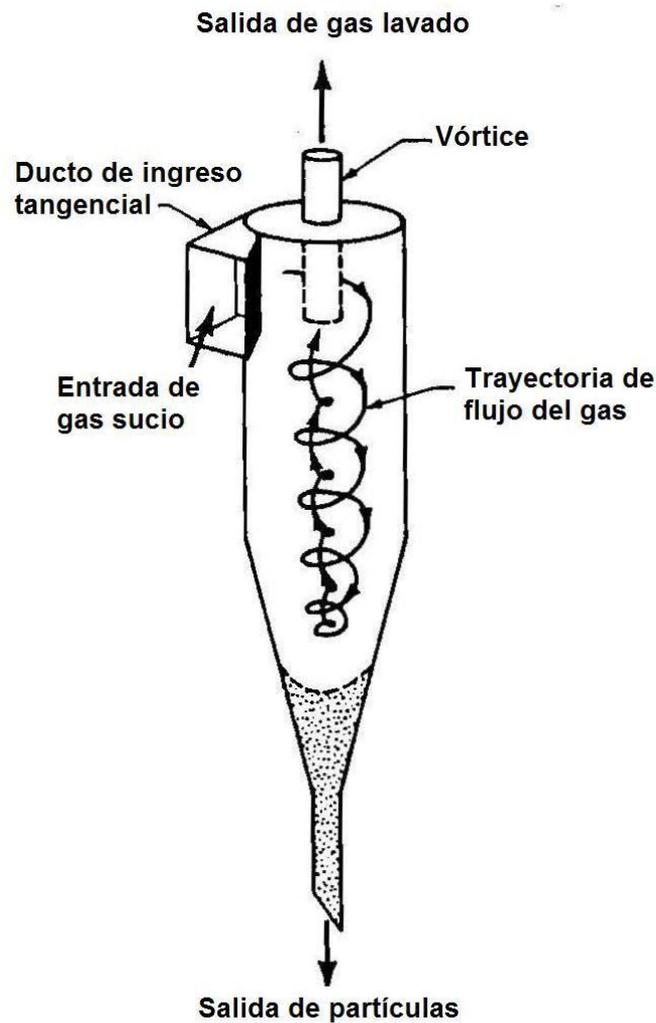


Figura 4.3: Diagrama esquemático del flujo en un ciclón estándar.

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 124.

Precipitadores dinámicos

Son unidades dinámicas que imparten una fuerza centrífuga a la partícula por la acción de veletas rotativas, la fuerza producida es alrededor de siete veces mayor que la de un ciclón convencional de la misma capacidad. Este tipo de unidad puede servir como un ventilador de descarga o como un colector de polvo y es ampliamente usado en industrias de cerámica, alimentos, farmacéutica y de madera. Este dispositivo no puede manejar material fibroso húmedo, el mismo que se acumula en las cuchillas y necesita mucha más energía de entrada que un ciclón del mismo volumen.

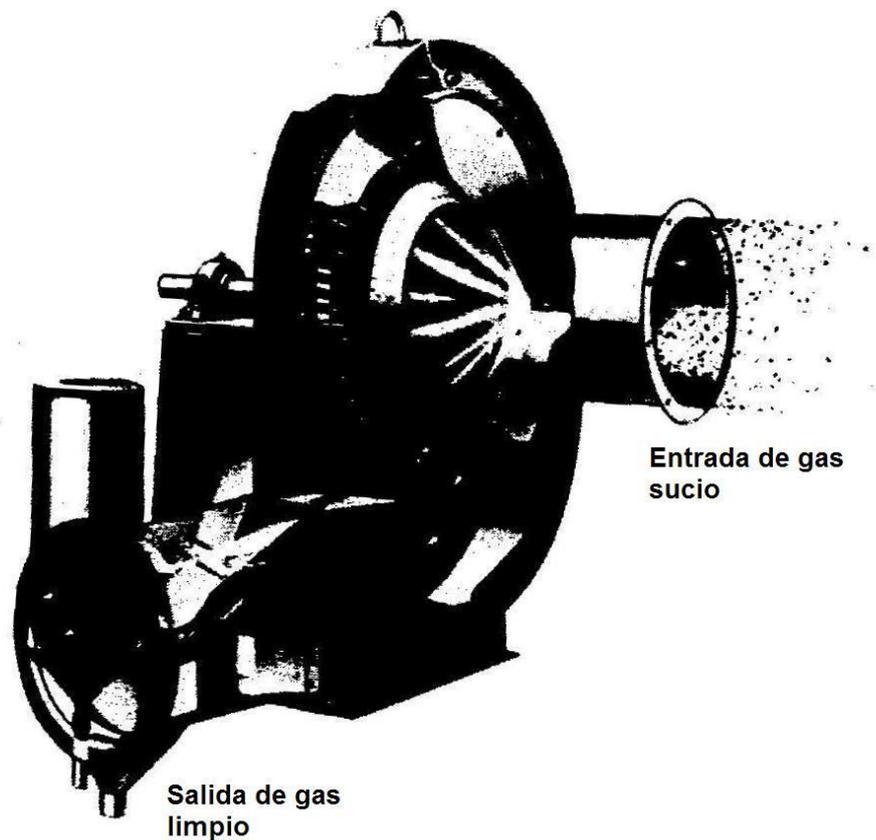


Figura 4.4: Precipitador dinámico.

Fuente: Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, página 528.

El estudio se va a centrar en los ciclones, ya que normalmente se emplean para separar partículas de diámetros desde 5 μm en adelante^{ix}. Los ciclones convencionales pueden separar partículas de hasta 25 μm con una eficacia del 90% mientras que los ciclones de alta eficiencia trabajan muy bien con partículas de 5 μm .

En general, a medida que la eficiencia de un ciclón aumenta, también aumentan los costos de operación, debido a las mayores caídas de presión requeridas por el sistema, lo que se traduce en un mayor consumo de energía.

Podemos agrupar a los ciclones en tres grupos: alto flujo, convencionales, y alta eficiencia.

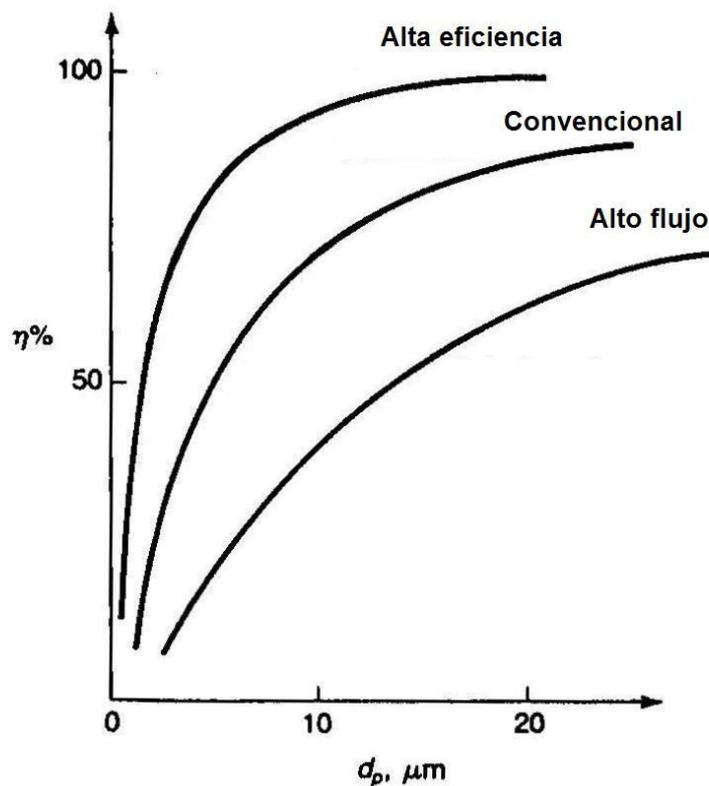


Figura 4.5: Relación entre la eficiencia de recolección y el tamaño de las partículas para diferentes tipos de ciclones.

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 126.

Tabla 4.3: Ventajas y desventajas en el uso de ciclones.

Ventajas	Desventajas
Bajos costos de inversión	Bajas eficiencias (especialmente con partículas muy pequeñas)
La separación del polvo del gas es directa y en seco, con lo cual no genera ningún problema de contaminación	Altos costos de operación (debido a las caídas de presión)
Puede operar a altas temperaturas	Los ciclones de alta eficiencia tienen costos elevados
Diseño simple, fenómeno físico bien conocido	No sirve para grandes volúmenes de gas
Poco mantenimiento requerido debido a que no existen partes móviles	

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 125.

4.3 COLECTORES HÚMEDOS

Los colectores húmedos son dispositivos para el control de la contaminación del aire que recogen las partículas por contacto directo con un líquido (generalmente agua)^x, razón por la cual, también son conocidos como lavadores. Existe un gran número de diseños pero la mayoría de ellos pueden ser agrupados de acuerdo al mecanismo usado de contacto con el líquido.

En la ingeniería del control de la contaminación del aire, originalmente por el término lavador se quería dar a entender que se trataba de un aparato para capturar partículas finas sobre gotas de líquido. Pero posteriormente se usaron gotas de líquido para capturar bióxido de azufre, y a los aparatos que lo hacían también se les llamó lavadores^{xi}.

Un lavador completo tiene varias partes, como se ilustra en la figura 4.6. Lo más frecuente es que el separador del gas-líquido sea un separador centrífugo, ya que las gotas de agua del tamaño encontrado en la mayor parte de los lavadores plantean pocas dificultades para esos ciclones. El separador del líquido-sólido

puede ser de muchas clases, aun cuando los sedimentadores por gravedad parecen ser los más comunes.

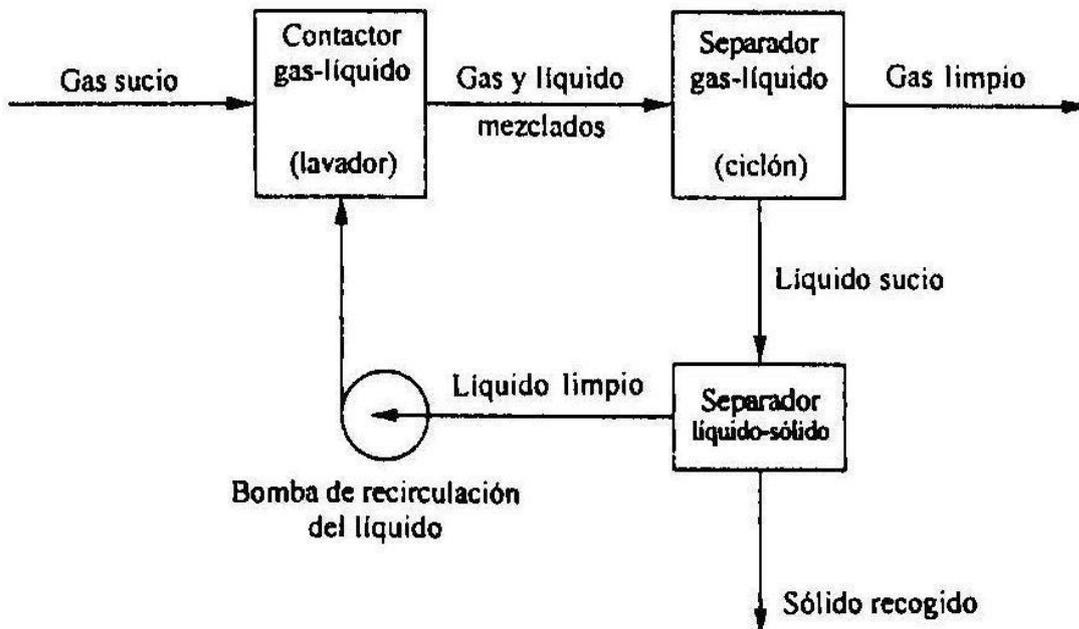


Figura 4.6: Partes componentes de la instalación de un lavador.

Fuente: De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 271.

4.3.1 DISPOSICIONES GEOMÉTRICAS

Para lograr una buena extracción de partículas pequeñas se debe incrementar la interacción gota-partícula, mediante el uso de diferentes configuraciones geométricas, así:

Lavadores de flujo cruzado

Consiste en una caja grande con múltiples boquillas aspersoras que dispersan el líquido entrante de manera uniforme sobre la superficie horizontal y un drenaje en el piso que recoge el líquido en el fondo. Se supone que el gas se mueve a través

del lavador en un flujo uniforme de bloque, o sea, la cantidad de gas que entra es igual a la que sale.

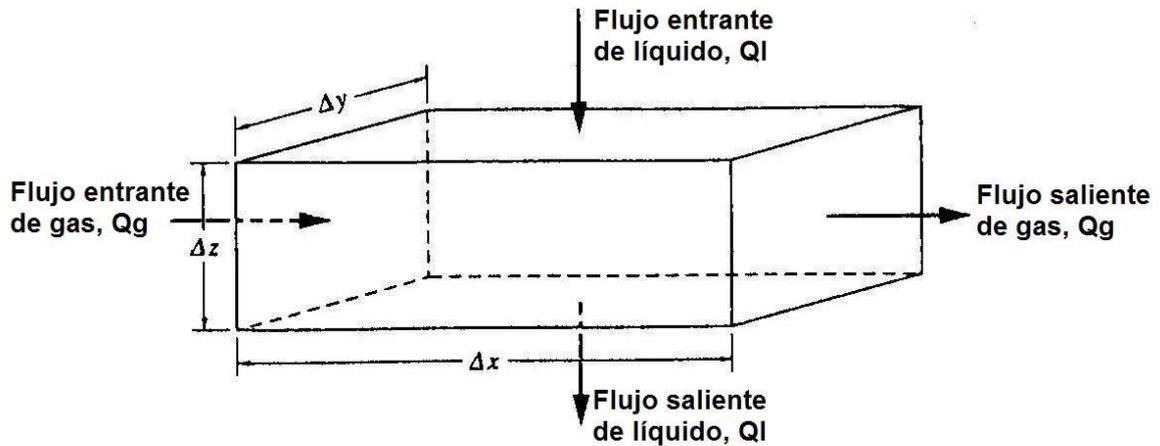


Figura 4.7: Esquema de un lavador de flujo cruzado.

Fuente: De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 275.

Lavadores de flujo coordinado

Tanto el gas como el líquido ingresan por un costado y salen por el otro, sin embargo, el líquido entra formando un ángulo recto con el flujo de gas y con una velocidad mucho menor.

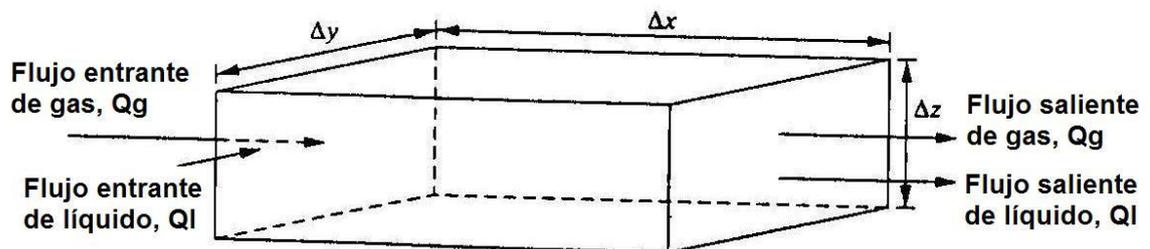


Figura 4.8: Esquema de un lavador de flujo coordinado.

Fuente: De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 278.

Lavadores a contraflujo

El líquido entra por la parte superior del lavador a través de una serie de boquillas aspersoras que lo distribuyen en forma uniforme y cae por gravedad. El gas entra por abajo del lavador y fluye hacia arriba en un flujo uniforme de bloque.

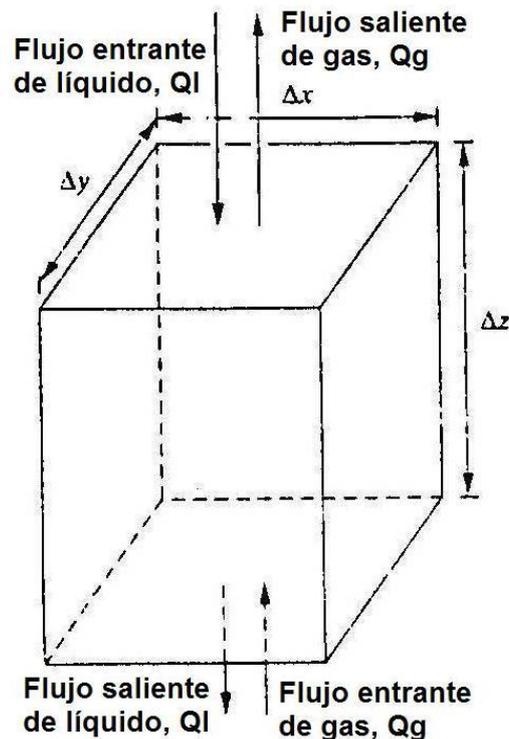


Figura 4.9: Esquema de un lavador a contraflujo.

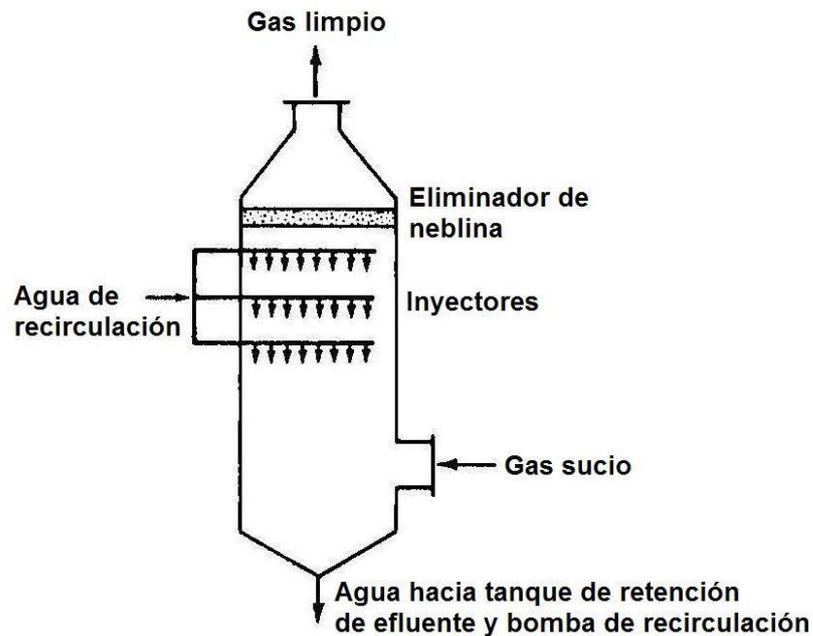
Fuente: De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 276.

4.3.2 PRINCIPALES TIPOS DE LAVADORES

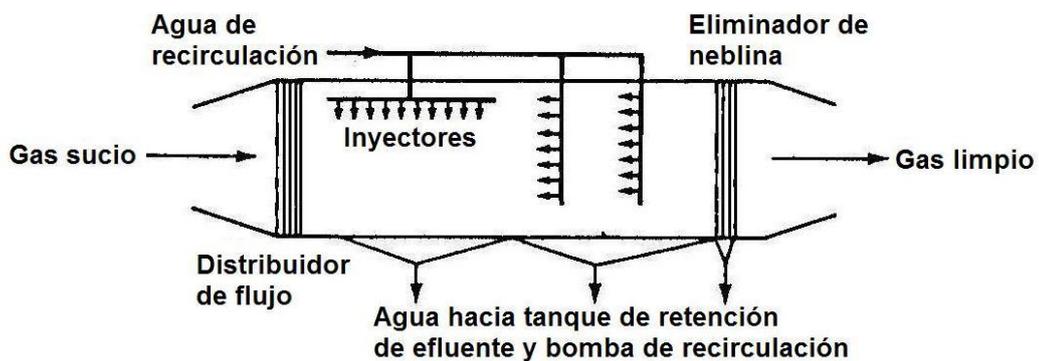
Lavador de cámara de rocío

En este tipo de lavador, el aire sucio pasa a través de una cámara circular o rectangular y recibe el contacto de un líquido atomizado por medio de inyectores dispuestos en su camino para este efecto. El tamaño de las gotas del líquido es controlado para optimizar el contacto con las partículas y facilitar su separación de la corriente de aire.

Los requerimientos de agua están en el orden de 1.5 a 2.5 l/m³ de aire^{xii} y el tamaño óptimo de las gotas se obtiene con presiones de líquido entre 35 a 50 psi en los inyectores^{xiii}. Los inyectores de forma cónica son los más efectivos. EL agua de recirculación debe ser lo suficientemente filtrada para evitar taponamientos en los inyectores. La limpieza y cuidado de los inyectores constituyen el único mantenimiento que requieren este tipo de lavadores.



(a) Lavador de cámara de rocío vertical (contraflujo)



(b) Lavador de cámara de rocío horizontal (flujo cruzado)

Figura 4.10: Arreglos comunes en los lavadores de cámara de rocío.

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 210.

Los lavadores de cámara de rocío alcanzan una eficiencia del 90% para atrapar partículas mayores de 8 μm y su consumo de energía es relativamente bajo y únicamente se ve reflejado en la recirculación del agua.

Ciclón de cámara de rocío

Es un colector más eficiente por cuanto su forma permite la actuación de fuerzas centrífugas que mejoran la separación de las gotas de líquido generadas por una columna de inyectores en el centro de la cámara, de la corriente de aire al aumentar la velocidad tangencial del gas sobre las paredes del recipiente. Se puede lograr una eficiencia del 95% en partículas mayores a 5 μm . La rata de recirculación de líquido esta en el rango de 0.5 a 1 l/m^3 de aire^{xiv}.

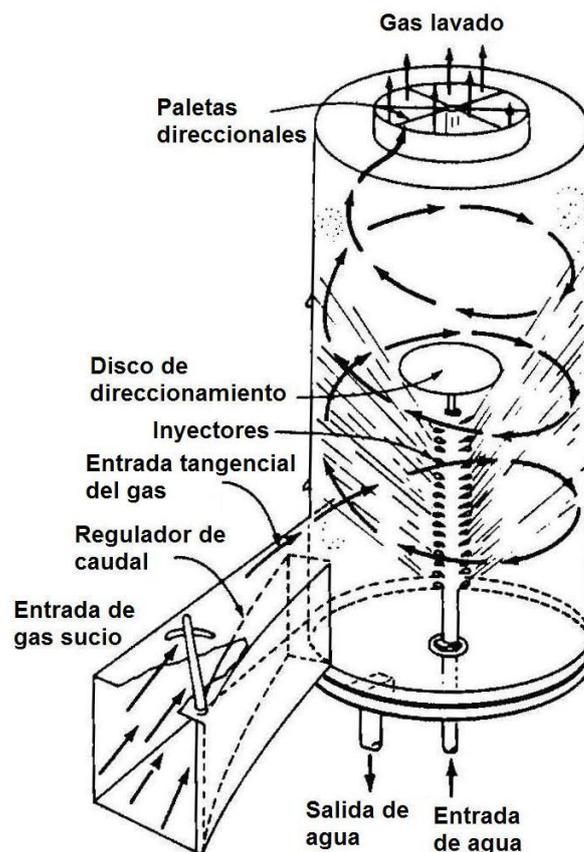


Figura 4.11: Ciclón de cámara de rocío.

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 211.

Lavador venturi

La eficiencia de un colector es una función que depende de la velocidad relativa entre la gota de líquido y las partículas suspendidas, por lo que un colector venturi, gracias a su forma, produce este efecto al inyectar agua a baja presión en la corriente de aire que atraviesa la garganta del venturi a gran velocidad. La eficiencia obtenida llega al 98% para partículas mayores a $5 \mu\text{m}$. La rata de recirculación de líquido va de 0.5 a 1.5 l/m^3 de aire^{xv}. El diseño de un venturi es simple y casi no requiere mantenimiento.

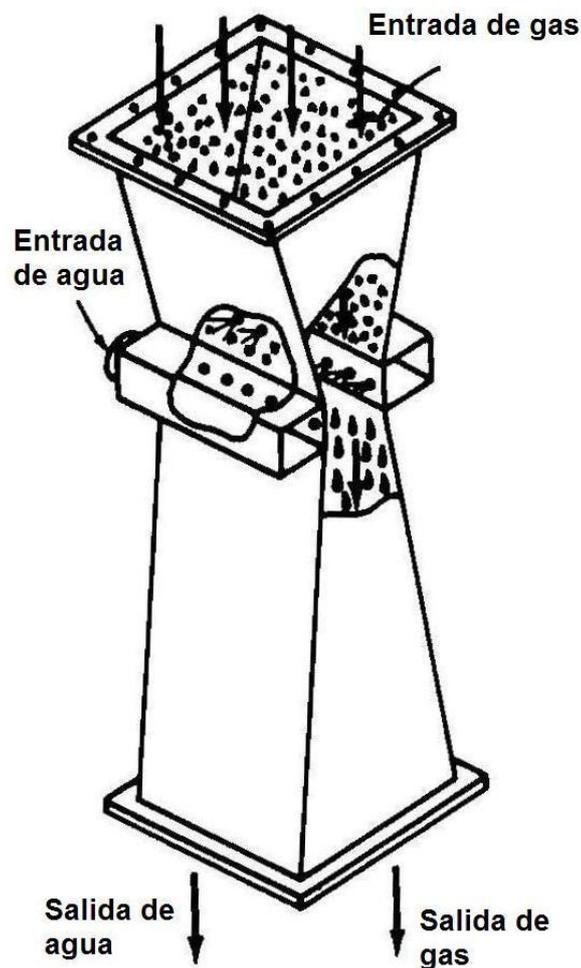


Figura 4.12: Lavador venturi

Fuente: Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, página 532.

Tabla 4.4: Ventajas y desventajas en el uso de colectores húmedos.

Ventajas	Desventajas
Puede manejar productos no inflamables y explosivos con poco riesgo	Gran posibilidad de desarrollar problemas de corrosión
Produce absorción de gas y recolección de partículas en una misma unidad	El líquido efluente puede tornarse en un problema de contaminación de agua
Puede trabajar con vapores gaseosos	De ser necesario, el gas a la salida deberá ser recalentado para evitar la formación de brumas
Puede enfriar gases calientes	El agua de recirculación puede ser no reciclable
La eficiencia de recolección puede ser ajustada según sean las necesidades	La disposición de los lodos puede ser costosa
Gases y productos corrosivos pueden ser neutralizados	

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, páginas 215-216.

Los costos de los colectores húmedos están directamente relacionados con los materiales para su fabricación (como presentan una gran posibilidad de corrosión deben ser fabricados en acero inoxidable) y con el consumo energético del soplador y de la bomba de recirculación. Los costos referentes al mantenimiento, disposición de lodos y tratamiento de agua, son relativamente bajos y no influyen de forma significativa.

4.4 LAVADORES DE CALCIO

Son los dispositivos más difundidos en el tratamiento de problemas con óxidos de azufre, debido a sus características de operación y funcionamiento.

En la figura 4.13 se muestra un sistema completo, en el se ve que el gas contaminado entra a una torre en donde circula en contraflujo una solución lavadora que contiene agua y algún compuesto de calcio, el SO_2 se disuelve en la solución y reacciona con el Ca, con lo que se produce CaSO_3 , el cual entra en la corriente de gas, y CaSO_3 (este último se oxida casi por completo hasta CaSO_4 gracias al exceso de oxígeno presente en los gases que entran a la torre) en el

tanque de retención de efluente, desde donde recircula la solución lavadora hacia la torre, una corriente lateral es llevada hacia un espesador (sedimentador) y se filtra para extraer los sólidos. Finalmente en el tanque de retención del efluente se añade más cantidad del compuesto de calcio.

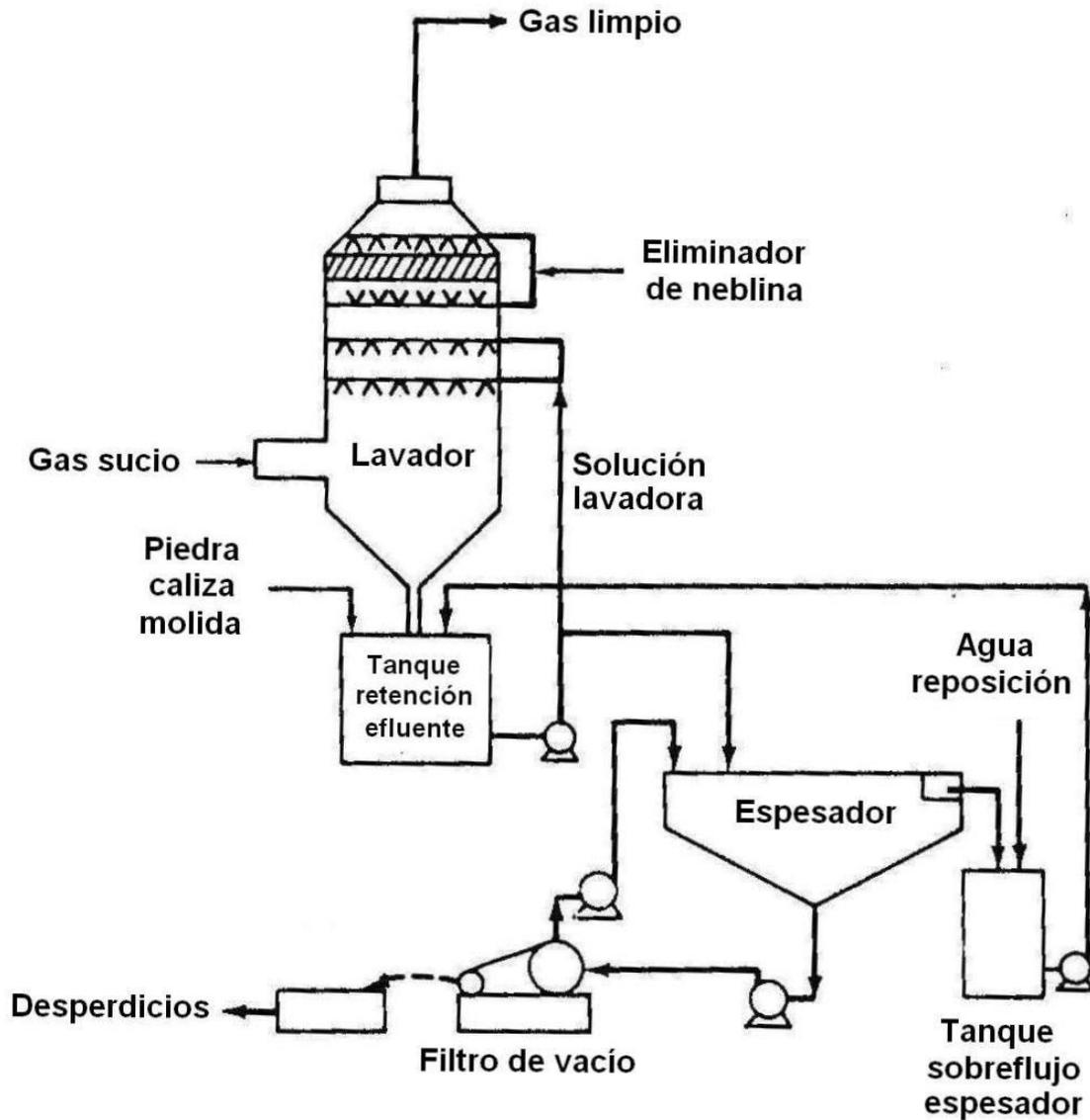


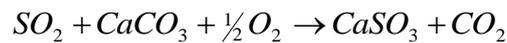
Figura 4.13: Diagrama de flujo del esquema del proceso para un sistema de lavador de SO_2 de piedra caliza.

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 465.

Existen básicamente tres configuraciones de lavadores de calcio, los mismos que son:

Lavadores de piedra caliza

En este caso se utiliza una pasta aguada lavadora que contiene agua y partículas de piedra caliza finamente molida. El SO_2 es absorbido, neutralizado y parcialmente oxidado a $CaSO_3$ y $CaSO_4$. La mayor ventaja de estos lavadores radica en que el absorbente es muy abundante y barato y que poseen una gran aceptación comercial. Las desventajas incluyen formación de precipitados dentro de la torre, incrustaciones y corrosión.

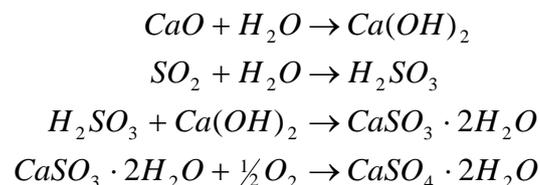


Ecuación 4.1: Reacción producida en un lavador de piedra caliza.

Fuente: De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 357.

Lavadores de cal hidratada

El proceso es muy similar al sistema anterior, excepto por la utilización de cal hidratada en lugar de piedra caliza, ya que tiene un grado de reacción muy superior a la piedra caliza. Las ventajas incluyen una mejor utilización del agente y mayor flexibilidad de operación, sin embargo, la mayor desventaja es el alto costo de la cal hidratada respecto a la piedra caliza. La eficiencia de remoción de SO_2 esta en el orden de 90% y 95% respectivamente para cada sistema^{xvi}.



Ecuación 4.2: Reacción producida en un lavador de cal hidratada.

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 465.

Sistema de álcali doble

Este sistema fue desarrollado para eliminar la mayoría de problemas encontrados en los sistemas anteriores (especialmente la formación de precipitados, incrustaciones y corrosión dentro de la torre). Utiliza dos agentes reactivos y dos lazos de proceso individuales para remover el SO₂.

Por último, se debe mencionar que existen otros sistemas que emplean otros químicos como el carbón activado, óxidos cúpricos, óxidos de magnesio, entre otros, en conjunto con sales de calcio para mejorar la remoción del SO₂, sin embargo, estos métodos únicamente son empleados donde los procesos exigen un mayor control de emisiones a costa del incremento del precio por metro cúbico de gas a lavar.

Tabla 4.5: Ventajas y desventajas en el uso de lavadores de calcio.

Ventajas	Desventajas
El elemento absorbedor es muy abundante y barato	Corrosión de los elementos metálicos
Tiene un alto rango de aceptación comercial	Depósito de sólidos, incrustación y taponamiento
Operación simple	Grandes cantidades de desechos sólidos generadas.
Costos de operación bajos	

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 465, 473. De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, páginas 380-381.

4.5 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DEL SISTEMA ÓPTIMO

Para definir que tipo de sistema se debe usar, se va a plantear una matriz de decisión donde constan las dos alternativas posibles que mejor se adaptan al problema en cuestión, en ella se evaluarán los diferentes aspectos técnicos y económicos ponderados de forma adecuada y la decisión va a ser tomada en base al sistema que obtenga una mayor puntuación.

Tabla 4.6: Matriz de decisión.

Criterios evaluación	Factor peso	Colectores húmedos		Lavadores de calcio	
		Factor solvencia	Puntaje	Factor solvencia	Puntaje
Aspectos técnicos	70%				
Contaminantes físicos	10	10	1.0	6	0.6
Contaminantes químicos	35	0	0.0	10	3.5
Contaminantes físicos y químicos	25	5	1.3	8	2.0
Aspectos económicos	30%				
Costos bajos de operación y mantenimiento	20	8	1.6	6	1.2
Costos medios de operación y mantenimiento	5	6	0.3	4	0.2
Costos altos de operación y mantenimiento	5	2	0.1	2	0.1
Sumatoria	100	---	4.3	---	7.6

Fuente: Autores.

De la matriz de decisión se concluye que el sistema que mejor se adapta a las necesidades de la REE, es un lavador de calcio, debido a sus características propias de operación y funcionamiento.

CAPÍTULO 5

DISEÑO DEL SISTEMA

Los lavadores de piedra caliza se han convertido en los dispositivos más ampliamente aceptados por la industria petrolera para el control del dióxido de azufre, debido a sus menores costos y a la simpleza de su operación, respecto a otros sistemas.

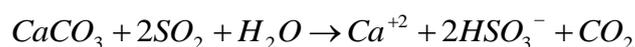
5.1 QUÍMICA DE PROCESO Y FACTORES OPERACIONALES

Antes de realizar el diseño del sistema, es necesario entender la química que rige el proceso en los siguientes puntos:

- Maximizar la remoción de SO_2 .
- Evitar la precipitación de CaSO_3 y CaSO_4 dentro del lavador.
- Aprovechar al máximo la piedra caliza.

Los dos primeros puntos se pueden lograr mediante el uso de dos recipientes separados (el lavador y el tanque de retención de efluente), y el tercer punto se consigue con un adecuado control del pH, con el uso de piedra caliza finamente molida, y con una relación líquido/gas adecuada.

En general, la absorción del dióxido de azufre es un proceso de dos pasos, en el cual, el primero ocurre en el lavador y el segundo en el tanque de retención de efluente, como se observó en la figura 4.13. En el lavador, una mol de CaCO_3 , reacciona con dos moles de SO_2 , así:

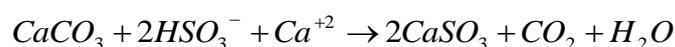


Ecuación 5.1: Reacción producida en el lavador.

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 474.

Si una excesiva cantidad de $CaCO_3$ es introducida al sistema, el ión bisulfito no es estable y el $CaCO_3$ va a precipitarse dentro del lavador^{xvii}. De igual manera, un alto pH (6.0 - 6.5) constituye un indicador de precipitación de $CaCO_3$ ^{xviii}, sin embargo, si el pH es muy bajo (menor a 4.5), la absorción del SO_2 se va a ver muy adversamente afectada, debido a que a diferentes pH, existen diferentes especies predominantes, siendo el rango óptimo de pH para el lavado, el comprendido entre 5.0 - 5.5.

En el tanque de retención de efluente se añade más piedra caliza para causar la precipitación del $CaSO_3$, la reacción es la siguiente:

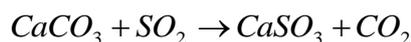


Ecuación 5.2: Reacción producida en el tanque de retención de efluente

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 475.

Para producir esta reacción, es necesario un adecuado tiempo de residencia en el tanque de retención de efluente, así como un volumen adecuado del mismo.

La ecuación estequiométrica general del proceso de remoción del SO_2 desde una corriente de gas, está dada por:



Ecuación 5.3: Ecuación general del proceso de remoción del SO_2 .

Fuente: Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 475.

Si existe un exceso de oxígeno en la corriente de gas, parte del CaSO_3 se oxida a CaSO_4 , para evitar la precipitación de CaSO_4 dentro del lavador se debe mantener alta la relación líquido/gas, así, el pH de la solución permanece constante mientras el SO_2 es absorbido.

5.2 FACTORES FÍSICOS

Adicionalmente a los factores químicos antes discutidos, existen algunos factores físicos importantes que afectan la absorción del SO_2 , uno de los más importantes es la relación líquido/gas (L/G). En general, mientras mayor sea la relación L/G, mayor es la eficiencia de absorción de SO_2 , debido a la mayor interacción entre el líquido y el gas, sin embargo, altas relaciones L/G representan altos costos de operación debido a la mayor cantidad de energía empleada para el bombeo y a las mayores caídas de presión producidas por el sistema. Las relaciones L/G típicas se encuentran en el rango de 5 a 15 l/m³ de gas a limpiar.

De igual manera, una distribución adecuada en el flujo tanto del gas como del líquido es importante para prevenir la formación de precipitados y asegurar un buen contacto gas-líquido.

Por último, el control del pH es importante para prevenir la formación de precipitados, hay que considerar que la cantidad de precipitado producido a un pH de 6 o menor, es tan solo el 5% que el producido a un pH de 6.2 o mayor.

5.3 DISEÑO DEL PROCESO

En la tabla 5.1 se muestran las principales características de la corriente de gas generada en la refinería, información que fue proporcionada por el Departamento de Seguridad, Salud y Ambiente de la REE. En la tabla 5.2 se indican algunas suposiciones necesarias para simplificar el diseño del sistema.

Tabla 5.1: Características de diseño de la corriente de gas a ser lavada.

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal volumétrico	m ³ /d	2000
Concentración SO ₂	ppm	> 8000

Fuente: Autores.

Tabla 5.2: Suposiciones de diseño del sistema

Número	Suposición
1	El flujo de gas y la concentración de SO ₂ en el mismo, son constantes
2	La piedra caliza esta compuesta en su 94% por CaCO ₃ y el 6% por sustancias inertes
3	Todo el sulfuro que ingresa al sistema es SO ₂ (no hay ingreso de SO ₃)
4	El gas se humidifica por completo dentro del lavador

Fuente: Autores.

Nota: El diseño del sistema se muestran en detalle en el Anexo A.

Ahora se debe determinar el caudal y masa de SO₂ presente en la corriente de gas. La norma indica que la concentración máxima permisible de SO₂ emitido al ambiente debe ser de 1000 ppm, y la eficiencia mínima del sistema del 90%.

Tabla 5.3: Caudal y masa de SO₂.

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal SO ₂	m ³ /d	20.00
Masa SO ₂	kg/d	55.40
Masa SO ₂ absorbida	kg/d	49.86
Masa SO ₂ emitida	kg/d	5.54

Fuente: Autores. Los valores presentados fueron calculados teóricamente.

Por medio de la ecuación 5.3 se calcula la masa de CaCO_3 necesaria para lavar el gas, y las masas de CaSO_3 y CO_2 que se van a producir como resultado del lavado de gases.

Tabla 5.4: Masas de CaCO_3 , CaSO_3 y CO_2 .

Parámetro	Unidad	Valor
Masa CaCO_3	kg/d	77.91
Masa CaSO_3	kg/d	93.49
Masa CO_2	kg/d	34.28

Fuente: Autores. Para determinar la masa de piedra caliza hay que dividir la masa CaCO_3 para la pureza (0.94 según las suposiciones de diseño del sistema).

Con la relación L/G (líquido/gas) se determina el caudal de agua necesario para lavar el gas y a continuación se selecciona la bomba adecuada, considerando las recomendaciones de presión en los inyectores para obtener una adecuada atomización del líquido, así como las pérdidas del sistema. De igual manera se procede para seleccionar el ventilador ya que el caudal de aire a mover es conocido, así como también se puede estimar la caída de presión en el sistema.

Tabla 5.5: Parámetros de selección de la bomba y el ventilador.

Equipo	Parámetro	Unidad	Valor
Bomba	Relación L/G	l/m^3	10
	Presión en los inyectores	psi	50
	Caudal de agua	m^3/h	0.83
	Altura de agua	m	35.21
Ventilador	Caudal de aire	m^3/h	83.33
	Caída de presión	m	0.0254

Fuente: Autores.

Por último, dimensionamos el lavador y el tanque de retención de efluente, en base a los tiempos de residencia recomendados (para el lavador entre 4 - 12 segundos y para el tanque de retención de efluente entre 5 - 15 minutos^{xix}).

Tabla 5.6: Parámetros de diseño del lavador.

Parámetro	Unidad	Valor
Tiempo de residencia	s	10
Área transversal	m ²	0.25
Altura de la torre	m	0.93

Fuente: Autores.

Tabla 5.7: Parámetros de diseño del tanque de retención de efluente.

Parámetro	Unidad	Valor
Tiempo de residencia	min	10
Volumen del tanque	m ³	0.14

Fuente: Autores.

Se debe recordar que tanto la torre como el tanque deben ser fabricados en materiales inoxidable debido a las características del gas a lavar y a los productos resultantes altamente corrosivos.

5.4 ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

Una de las principales motivaciones para que una empresa implemente maquinaria o dispositivos nuevos en cualquiera de sus procesos, es aumentar la eficiencia en general, lo que conlleva beneficios económicos (en la mayoría de los casos), pero si se habla de dispositivos para el control de emisiones, esta idea no es atractiva a simple vista, ya que lejos de que la introducción de estos dispositivos generen beneficios económicos, lo que generan son gastos adicionales como agua, energía, insumos y otros.

Sin embargo, se debe hacer notar a los empresarios, de que este tipo de dispositivos, como el que se propone en el presente proyecto, muy distante de representar un gasto, es una inversión, no solo en el tema económico sino en el social. Además que a mediano o corto plazo pueden comenzar a notar beneficios económicos, los cuales no se aprecian en la generación de capitales, sino en la eliminación de ciertos rubros que la empresa está obligada a pagar como multas ambientales, las cuales pueden ir desde 1000 hasta 2000 salarios mínimos vitales, según el artículo 222 de la sección II del capítulo V libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental (TULAS), además de la suspensión de la Licencia Ambiental, entre otros.

Con lo expuesto anteriormente se tiene un argumento válido para declarar al proyecto como viable, aunque la falta de políticas claras en el manejo de desechos y residuos que afectan al medio ambiente, hace sumamente difícil cuantificar valores que podría ahorrar la Refinería Estatal Esmeraldas con la implementación de este tipo de proyectos, o el gasto de no hacerlo.

En este punto, sobra decir, que el cálculo normal de recuperación del capital invertido es muy complejo de estimar, ya que según toda la información que se pudo recopilar, primero, no es posible determinar si la REE paga multas ambientales, y segundo, cual es su valor económico por la contaminación que genera. Los dos puntos anteriores son datos necesarios para poder evaluar el tema de recuperación de capital. Sin embargo, a pesar de no tener una cláusula explícita en las leyes nacionales, en la que se exponga el hecho de emitir al ambiente un gas con una concentración mayor a 1000 ppm de SO₂ (como es el caso de la REE), se sabe que es motivo de una multa económica elevada, además se debe tener conciencia de que el costo social es altísimo.

Nota: El análisis económico financiero del sistema se muestran en detalle en el Anexo B.

En la tabla 5.8 y en la tabla 5.9 se muestran los costos de los equipos y elementos respectivamente, que van a ser utilizados en el sistema.

Tabla 5.8: Costo de los equipos del sistema de lavado de gases.

Equipo	Marca	Procedencia	Modelo	Motor	Capacidad	Presión	Precio
Bomba	Myers	Usa	HJ50S	1/2 HP	5.5 GPM	50 lb	\$ 322
Ventilador	Woods	Canadá	J4	1/3 HP	50 CFM	1 in H ₂ O	\$ 248

Fuente: Autores.

Tabla 5.9: Costo de los elementos del sistema de lavado de gases.

Elemento	Material	Diámetro	Altura	Espesor plancha	Precio
Torre	Acero inoxidable	0.50 m	1.20 m	2 mm	\$ 370
Tanque	Acero inoxidable	0.50 m	0.80 m	2 mm	\$ 265

Fuente: Autores.

En la tabla 5.10 se muestran los costos de instalación del sistema. Se debe aclarar, que los rubros presentados constituyen valores promedio de una instalación general de estas características y que podrían variar drásticamente según los requerimientos propios de la REE.

Tabla 5.10: Costos de instalación del sistema de lavado de gases.

Ítem	Porcentaje	Precio
Tuberías y accesorios	30%	\$ 362
Ductos y accesorios	30%	\$ 362
Material eléctrico y control	25%	\$ 301
Obra civil	25%	\$ 301
Trabajos por terceros	28%	\$ 337
Gastos varios	15%	\$ 181

Fuente: Autores. El rubro precio, corresponde al porcentaje indicado de la suma parcial de los rubros de precio de las tablas 5.8 y 5.9, es decir \$ 1,205.

El costo total del sistema esta dado por la suma de los rubros de precio de las tablas 5.8, 5.9 y 5.10, y es igual a \$ 3,049.

Costo equipos + Costo elementos + Costo instalación = Costo sistema

Costo sistema = \$ 3,049

En la tabla 5.11 se muestran los costos de operación anuales por concepto de electricidad que consume el sistema.

Tabla 5.11: Costo anual de operación por consumo de electricidad del sistema.

Equipo	Potencia kW	Tiempo h	Energía kW*h	Costo kW*h \$	Costo anual
Bomba	0.3728	24	8.9472	0.25	\$ 816.43
Ventilador	0.2486	24	5.9664	0.25	\$ 544.43

Fuente: Autores.

En la tabla 5.12 se muestra el costo de operación anual por insumos químicos que emplea el sistema.

Tabla 5.12: Costo anual de operación por consumo de insumos químicos del sistema.

Químico	Consumo kg/d	Costo kg \$	Costo anual
CaCO3	85	0.20	\$ 6,205.00

Fuente: Autores.

En la tabla 5.13 se muestra el costo de operación anual por consumo de agua que emplea el sistema.

Tabla 5.13: Costo anual de operación por consumo de agua del sistema.

Ítem	Consumo l/d	Reposición diaria	reposición diaria l	Consumo anual m3	Costo m3 \$	Costo anual
Agua	20000	3%	600	239000	0.20	\$ 47,800

Fuente: Autores.

El costo anual de operación del sistema esta dado por la suma de los rubros de costo anual de las tablas 5.11, 5.12 y 5.13, y es igual a \$ 55,366.

**Costo anual operación electricidad + Costo anual operación químicos +
Costo anual operación agua = Costo anual operación sistema**

Costo anual operación sistema = \$ 55,366

Al no tener equipos complejos en el sistema, los costos de mantenimiento son relativamente bajos, ya que simplemente hay que enfocar el esfuerzo en trabajos de mantenimiento de bombas y ventiladores, que son equipos básicos en cualquier empresa, además de tomar en cuenta la limpieza de la torre y el tanque, así como la verificación del pH del agua en el sistema. En la tabla 5.14 se detallan los costos debido al mantenimiento del sistema para un periodo de un año.

Tabla 5.14: Costo anual de mantenimiento del sistema.

Acción de mantenimiento	Costo c/acción \$	Costo anual
Mantenimiento trimestral bomba, ventilador e inyectores (limpieza, ajuste, lubricación)	50	\$ 200
Revisión semanal de pH y sistema en general	1	\$ 52

Fuente: Autores.

Costo anual mantenimiento sistema = \$ 252

Como se dijo anteriormente el calculo del Valor Actual Neto (VAN) y de la Tasa Interna de Retorno (TIR) no se puede realizar de forma directa, ya que el proyecto no devuelve retorno de capital por la producción de un bien o servicio, sino por el no pago de multas ambientales, por lo que, el VAN y el TIR van a ser calculados de forma indirecta.

En la tabla 5.15 y 5.16 se presenta el flujo de capital usando una tasa de inflación sugerida del 2.7 % y un tiempo de vida de diez años.

Tabla 5.15: Flujo de capital entre los años 0 - 5.

Año	0	1	2	3	4	5
Inversión	\$ -3,049	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Operación	\$ -	\$ -55,366	\$ -56,861	\$ -58,396	\$ -59,973	\$ -61,592
Mantenimiento	\$ -	\$ -252	\$ -259	\$ -266	\$ -273	\$ -280
Multas	\$ -61,000	\$ 62,647	\$ 64,338	\$ 66,076	\$ 67,860	\$ 69,692
Totales	\$ -64,049	\$ 7,029	\$ 7,219	\$ 7,414	\$ 7,614	\$ 7,820

Fuente: Autores.

Tabla 5.16: Flujo de capital entre los años 6 - 10.

Año	6	7	8	9	10
Inversión	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -3,049
Operación	\$ -63,255	\$ -64,963	\$ -66,717	\$ -68,518	\$ -70,368
Mantenimiento	\$ -288	\$ -296	\$ -304	\$ -312	\$ -320
Multas	\$ 71,574	\$ 73,506	\$ 75,491	\$ 77,529	\$ 79,622
Totales	\$ 8,031	\$ 8,248	\$ 8,470	\$ 8,699	\$ 5,885

Fuente: Autores.

Se encuentra un VAN de \$ 2005.06, lo que demuestra que el proyecto es rentable ya que nos arroja un valor que aunque no es significativo es positivo, lo que indica que el dispositivo genera ganancias, que a pesar de ser mínimas, son bastante buenas para un proyecto ambiental, ya que el sistema no representa solo gastos para la empresa.

$$\text{VAN} = \$ 2005.06$$

De igual manera se calcula un TIR del 3.31 %, definido como la tasa de descuento para la cual el VAN es igual a cero, lo que significa, que a pesar de ser menor a la tasa pasiva indicada por el Banco Central (4.26 % a la fecha), no dista demasiado, por lo que sigue siendo un muy buen proyecto.

$$\text{TIR} = 3.31 \%$$

Por último, se determina la relación costo/beneficio (C/B), definida como los gastos sobre los ingresos, que para el proyecto es igual a 0.96, al ser menor a 1, demuestra que el proyecto es rentable al existir más ingresos que gastos.

$$\text{C/B} = 0.96$$

Por lo tanto, queda demostrado que para la REE, el dispositivo es factible de implantar desde el punto de vista económico, a pesar, de que el retorno de la inversión es un estimado propuesto por este proyecto.

Según la Ley de Gestión Ambiental del Ecuador, es una obligación de la REE, el regular y promover la conservación del medio ambiente y el uso sustentable de los recursos naturales en armonía con el interés social, mantener el patrimonio natural de la nación, velar por la protección y restauración de la diversidad biológica, garantizar la integridad del patrimonio genérico y la permanencia de los ecosistemas, por lo que la implantación de este dispositivo debería constituir una prioridad, mas no una simple alternativa al no pago de multas, ya que el costo social que genera la REE al no implantar sistemas para el control de emisiones a las comunidades aledañas, es muy elevado.

Nota: En el Anexo G se presenta un análisis detallado sobre el manejo de sulfatos de calcio y sus respectivas repercusiones económicas-financieras, es importante su revisión detallada para conseguir un mejor diseño del sistema.

CAPÍTULO 6

MODELACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Para poder evaluar el sistema diseñado, se va a diseñar y construir un modelo a escala, donde se pueda realizar evaluaciones y corroborar los resultados esperados del sistema.

6.1 MODELACIÓN DEL SISTEMA

El primer paso consiste en la obtención de una corriente de gas constante con elevada concentración de SO_2 , para lo cual se optó por quemar en un motor de combustión interna, un combustible de alto contenido de azufre, para lavar a continuación los gases de combustión. En primera instancia como combustible se utilizó diesel, ya que tiene un altísimo contenido de azufre (0.70% en peso), pero se observó que debido a las características de operación de un motor de encendido por compresión (exceso de aire), la concentración de SO_2 en los productos de combustión era muy baja (100 ppm) y el volumen de gases producidos era demasiado alto ($69 \text{ m}^3/\text{h}$), de forma tal, que no permitía una adecuada simulación del proceso real, por lo que se optó por usar gasolina como combustible, que a pesar de tener un menor contenido de azufre (0.20% en peso), y debido a las características de operación de un motor de encendido por chispa, produjo mejores resultados que al usar diesel, obteniéndose mejores concentraciones de SO_2 (145 ppm) pero con un volumen de gases mucho menor ($16 \text{ m}^3/\text{h}$). Los valores presentados fueron calculados teóricamente.

Una vez generada la corriente constante del gas, el segundo paso es elevar su concentración de SO_2 , para lograr tal meta, se trató de disolver azufre elemento en el combustible, meta que no se logró, debido a las propiedades de disolución del azufre, por lo que se decidió, quemar azufre elemento por medio de un quemador, y recolectar los gases producidos, para que aporten a la corriente primaria de gases, incrementándose de esta forma la concentración total de SO_2 .

Tabla 6.1: Concentración de SO₂ y volumen de gases producidos según el combustible usado.

Combustible	Concentración de SO ₂ (ppm)	Volumen de gases (m ³ /h)
Diesel	100	69
Gasolina	145	16
Azufre	165000	3.5
Gasolina + Azufre	30000	19

Fuente: Autores. Los valores presentados fueron calculados teóricamente y las prácticas fueron realizadas en los Laboratorios del CEINCI y de Motores de Combustión Interna de la ESPE.

La necesidad de llevar a cabo estos dos procesos (quemar gasolina y azufre por separado) se determinó porque, al quemar únicamente gasolina se obtenía una corriente uniforme pero con baja concentración de SO₂, mientras que al quemar únicamente azufre, la corriente era muy irregular aunque con elevado contenido de SO₂. Al combinar los dos procesos, se obtuvo un comportamiento uniforme y con características óptimas para el lavado posterior.

Nota: El diseño del modelo se muestran en detalle en los Anexos C y D.

Una vez superado el problema de la generación de la corriente de gas y de la concentración de SO₂, se procede a diseñar el sistema de la misma manera que en el capítulo anterior, pero considerando las nuevas variables y parámetros de diseño.

Tabla 6.2: Características de diseño de la corriente de gas a ser lavada modelo.

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal volumétrico	m ³ /h	20
Concentración SO ₂	ppm	30000

Fuente: Autores.

Tabla 6.3: Suposiciones de diseño del modelo

Número	Suposición
1	El flujo de gas y la concentración de SO ₂ en el mismo, son constantes
2	El CaCO ₃ a utilizarse es de grado técnico
3	El gas se humidifica por completo dentro del lavador

Fuente: Autores.

Tabla 6.4: Caudal y masa de SO₂ modelo.

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal SO ₂	m ³ /h	0.60
Masa SO ₂	kg/h	1.66
Masa SO ₂ absorbida	kg/h	1.50
Masa SO ₂ emitida	kg/h	0.17

Fuente: Autores.

Tabla 6.5: Masas de CaCO₃, CaSO₃ y CO₂ modelo.

Parámetro	Unidad	Valor
Masa CaCO ₃	kg/h	2.34
Masa CaSO ₃	kg/h	2.80
Masa CO ₂	kg/h	1.03

Fuente: Autores.

Tabla 6.6: Parámetros de selección de la bomba modelo.

Parámetro	Unidad	Valor
Relación L/G	l/m ³	15
Presión en los inyectores	psi	50
Caudal de agua	m ³ /h	0.30
Altura de agua	m	35.21

Fuente: Autores.

Tabla 6.7: Parámetros de selección del ventilador modelo.

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal de aire	m ³ /h	20
Caída de presión	m	0.0254

Fuente: Autores.

Tabla 6.8: Parámetros de diseño del lavador modelo.

Parámetro	Unidad	Valor
Tiempo de residencia	s	15
Área transversal	m ²	0.16
Altura de la torre	m	0.52

Fuente: Autores.

Tabla 6.9: Parámetros de diseño del tanque de retención de efluente modelo.

Parámetro	Unidad	Valor
Tiempo de residencia	min	10
Volumen del tanque	m ³	0.05

Fuente: Autores.

6.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Para construir el modelo, la prioridad fue poder observar el proceso de lavado de gases de forma directa, para lo cual, que se optó por construir un recipiente de acrílico transparente, donde se albergarían tanto la torre de lavado como el tanque de retención de efluente, y los demás equipos (bombas, tuberías, ventilador y ductos) irían acoplados al cuerpo del recipiente.

De igual manera, se decidió hacer un circuito de lavado de gases de dos etapas, primero un lavado de partículas (lavado físico) y segundo un lavado de SO₂ (lavado químico), el primero consta de un solo paso en sentido contrario, y el

segundo consta de dos pasos en el mismo sentido y sentido contrario respectivamente, para garantizar una mejor remoción del contaminante.

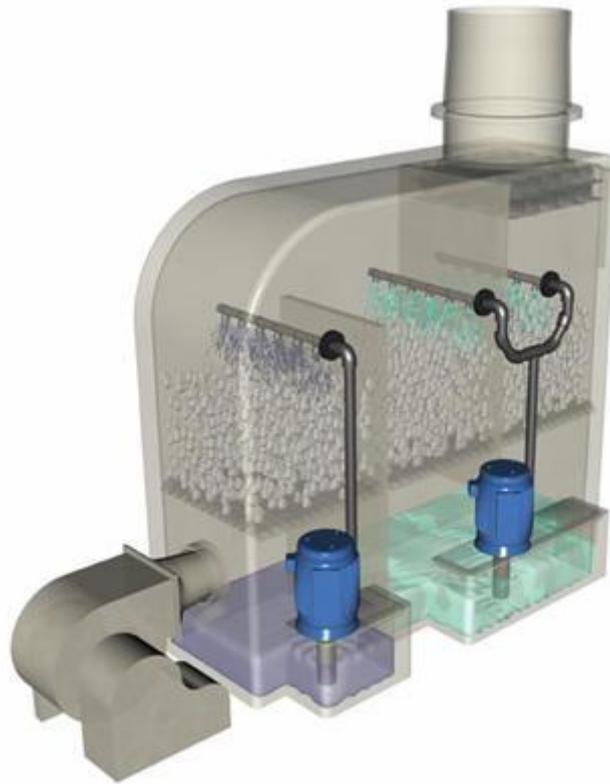


Figura 6.1: Esquema general del prototipo de lavador de dióxido de azufre.

Fuente: Autores.

En la figura 6.1 se muestra el esquema general del modelo.

Nota: Los planos de construcción y ensamble del recipiente, así como fotografías del modelo ya construido, se muestran en detalle en los Anexos E y F.

6.3 PARÁMETROS Y VARIABLES DE EVALUACIÓN

Para asegurar un correcto funcionamiento del modelo se deben controlar algunos parámetros, como el pH (el rango óptimo está entre 5.0 - 5.5, pero en ningún caso debe ser inferior a 4.5 o superior a 6.5), la relación líquido/gas (una L/G elevada

ayuda a mantener un pH constante durante la absorción del SO_2 , una L/G adecuada esta alrededor de 15 l/m^3 de gas a limpiar).

Así mismo es importante durante el experimento, cuidar que las bombas, tuberías, ventiladores y ductos, no presenten fugas, ya que estamos trabajando con elementos tóxicos, que a pesar de no ser muy peligrosos, pueden causar molestias al organismo, además de constituir una posible falla al circuito eléctrico del sistema (esta por demás mencionar que el circuito eléctrico esta debidamente sellado y protegido contra posibles fugas y humedad excesiva, además de poseer elementos de protección y estar aterrizado tanto al chasis como a tierra). Por último hay que considerar la limpieza de los inyectores, ya que estos garantizan una adecuada atomización del fluido y por ende una mejor remoción del contaminante.

6.4 TOMA DE DATOS

En la figura 6.2 se muestra un esquema del experimento.

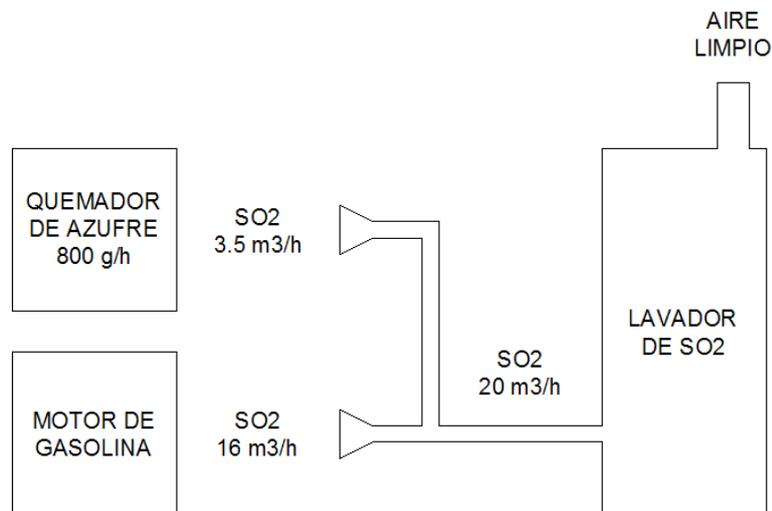


Figura 6.2: Esquema del experimento.

Fuente: Autores.

A continuación se detalla los pasos a realizar para llevar a cabo el experimento y a continuación proceder a la toma de muestras.

- 1) Conectar al lavador el escape del motor de gasolina (el motor debe generar 16 m³/h de SO₂).
- 2) Conectar el ducto de recolección de gases del quemador de azufre (se debe quemar 800 g/h de S₂, lo que significa una generación de 3.5 m³/h de SO₂).
- 3) Cerrar las válvulas de paso a la descarga de las bombas.
- 4) Llenar ambos depósitos del recipiente (lavado físico y lavado químico) con agua a una altura de 30 cm y de ser necesario purgar las bombas.
- 5) Disolver 2.34 kg de CaCO₃ en agua y añadirlos al depósito de lavado químico.
- 6) Encender el ventilador y las bombas.
- 7) Abrir las válvulas de paso a la descarga de las bombas y comprobar una adecuada atomización del fluido por los inyectores.
- 8) Arrancar el motor de gasolina, regular la aceleración y esperar un momento hasta que su comportamiento se estabilice.
- 9) Encender el quemador, regular su llama y colocar el azufre a quemar.
- 10) Dejar correr por una hora los equipos.
- 11) Apagar el quemador y después el motor de gasolina.
- 12) Dejar correr el lavador unos minutos más, acto seguido cerrar las válvulas de paso y a continuación desconectar las bombas y por último desconectar el ventilador.

6.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para poder comprobar el funcionamiento del prototipo, se tomaron cinco muestras del agua residual, tanto en el depósito de lavado físico como en el depósito de lavado químico, en las cuales se realizaron análisis para determinar la presencia de sulfatos (SO_4^{2-}). Así mismo se midió el pH en ambos tanques, y los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 6.10: Resultados obtenidos en las muestras tomadas.

Muestra	Tanque	pH	Descripción	Líquido	Sólido
1	Lavado físico	3.5	Medio	1050 mg/l	---
2			Medio	925 mg/l	---
3	Lavado químico	5.5	Superficie	1070 mg/l	5500 mg/l
4			Medio	1000 mg/l	6500 mg/l
5			Fondo	975 mg/l	13000 mg/l

Fuente: Autores. Los valores presentados fueron determinados en los Laboratorios de la Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica (www.ecunuclear.gov.ec).

De la tabla anterior se puede observar que los resultados obtenidos son los esperados debido a:

- El pH en el depósito de lavado físico confirma la presencia de un medio ácido, y en el depósito de lavado químico está dentro del rango óptimo de absorción de SO_2 (4.5 - 6.0).
- Existe un gradiente de concentración de sulfatos entre la superficie y el fondo en el tanque de lavado químico, de 95 mg/l (1070 mg/l - 975 mg/l) para el líquido, y de 7500 mg/l (13000 mg/l - 5500 mg/l) para el sólido.
- En el tanque del lavado físico el agua adquirió una coloración oscura, confirmando la retención de partículas sólidas, mientras que el tanque del

lavado químico tanto el agua como el precipitado adquirieron un color amarillento, lo que supone la presencia de sales de azufre.

- El olor característico del azufre era prácticamente nulo a la salida del dispositivo.

Tabla 6.11: Efectos producidos luego del lavado de gases.

Propiedades		Descripción	Lavado físico	Lavado químico
Físicas	Color	El agua o el precipitado adquieren un color particular	✓	✓
	Olor	Disminuye la presencia de olores fuertes	✓	✓
Químicas	pH	Esta dentro del rango deseado	✓	✓
	SO ₄ ²⁻	Esta dentro del rango deseado	✗	✓

Fuente: Autores.

Por consiguiente, se puede concluir que el dispositivo funciona correctamente, ya que se produce un eficaz lavado de partículas sólidas y una adecuada remoción de SO₂.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La contaminación atmosférica afecta a millones de personas de todo el mundo, especialmente a aquellas que viven en los grandes núcleos urbanos y en áreas fuertemente industrializadas, con denso tráfico de vehículos. Las emanaciones de polvos y gases corrosivos deterioran el medio ambiente dando lugar a olores desagradables, pérdida de visibilidad y daños para la salud humana, para los cultivos y otras formas de vegetación y sobre los materiales de construcción.
- En Ecuador existen suficientes leyes y reglamentos ambientales, pero no existe un régimen legal propio, que controle y regule el manejo de los contaminantes.
- La estrategia global de control para las emisiones de SO₂ es convertir el azufre hasta llevarlo a CaSO₄ y regresarlo al suelo en algún tipo de terraplén.
- Los lavadores de piedra caliza son los dispositivos más ampliamente aceptados por la industria petrolera para el control del SO₂, debido a sus menores costos (\$ 3049) y a la simpleza de su operación y mantenimiento.
- La instalación de dispositivos para el control de emisiones no conlleva a beneficios económicos directos, sino que a través del no pago de multas ambientales, se pueden comenzar a notar a corto plazo los beneficios económicos de forma indirecta.
- El costo anual de operación del sistema es elevado, debido al alto consumo de agua (\$ 47800) en comparación a la electricidad (\$ 1360) y a los químicos (\$ 6205).

- A través del uso de dispositivos para el control de emisiones, si es posible mitigar, casi por completo, los efectos producidos por contaminantes ambientales, lo que conlleva a un desarrollo sustentado entre la empresa, la comunidad y el ecosistema.
- A través del dispositivo se pudo remover hasta 13000 mg/l de sulfatos, lo que demuestra que el sistema es eficiente y constituye una solución efectiva al problema de contaminación por SO₂ de la REE.

RECOMENDACIONES

- Se debe buscar la forma de unificar todas las leyes y reglamentos ambientales existentes en el Ecuador, en un único y definitivo documento, donde se definan claramente los estatutos de control, regulación y manejo de los contaminantes.
- Se debe investigar el impacto social verdadero que ha venido produciendo la REE en la comunidad y en el ecosistema durante los últimos años.
- Se debe buscar una fuente alterna más económica de agua para la operación del sistema, ya que esto influye de forma directa en el costo anual de operación, disminuyéndolo drásticamente.
- Se debe continuar en la búsqueda de soluciones a otros problemas ambientales causados por los procesos industriales en el sector.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- Cooper / Alley, Air Pollution Control, Waveland Press, 2002.
- De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, McGraw Hill, 1997.
- Obert, Motores de Combustión Interna, Cecsa, 1997.
- Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, McGraw Hill, 1985.
- Strauss / Mainwaring, Contaminación del aire, Trillas, 1997.

REFERENCIAS

- i. De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 1.
- ii. De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 1.
- iii. De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 36.
- iv. Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, página 449.
- v. OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.
- vi. OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.
- vii. OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.
- viii. OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.

- ix. De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 231.
- x. Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 209.
- xi. De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 271.
- xii. Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 209.
- xiii. Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 209.
- xiv. Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 211.
- xv. Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 212.
- xvi. Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 466.
- xvii. Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 474.
- xviii. Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 474.
- xix. Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 475.

-
- ⁱ De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 1.
- ⁱⁱ De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 1.
- ⁱⁱⁱ De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 36.
- ^{iv} Peavy / Rowe / Tchobanoglous, Environmental Engineering, página 449.
- ^v OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.
- ^{vi} OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.
- ^{vii} OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.
- ^{viii} OMS, Guías y normas de calidad del aire en exteriores.
- ^{ix} De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 231.
- ^x Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 209.
- ^{xi} De Nevers, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, página 271.
- ^{xii} Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 209.
- ^{xiii} Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 209.

^{xiv} Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 211.

^{xv} Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 212.

^{xvi} Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 466.

^{xvii} Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 474.

^{xviii} Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 474.

^{xix} Cooper / Alley, Air Pollution Control, página 475.