



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**LA GESTION INFORMATICA Y EL CONTROL DE
EMISIONES ATMOSFERICAS EN LA
INDUSTRIA PETROLERA.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA MECANICA)**

**P R E S E N T A :
RAFAEL CARMONA DAVILA**

Asesor de Tesis: Dra. Rina Aguirre S.



MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres, por su apoyo y cariño.

A Juan Carlos.

AGRADECIMIENTOS:

A la Dra. Rina Aguirre Saldivar, asesora de esta tesis, cuyas aportaciones, sugerencias y conducción fueron indispensables para la realización de este trabajo.

Al Ing. Carlos Ruiz de Velasco, quien con sus enseñanzas sentó las bases de la estructura de la base de datos.

Al Lic. Carlos Zolla y a la Lic. Andrea Huerta por la revisión final de este documento.

LA GESTIÓN INFORMÁTICA Y EL CONTROL DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN LA INDUSTRIA PETROLERA.

1. Introducción

- 1.1 Generación de energía
- 1.2 Objetivo

2. Contaminación

- 2.1 Principales contaminantes
 - 2.1.1 Monóxido de carbono
 - 2.1.2 Partículas
 - 2.1.3 Dióxido de azufre
 - 2.1.4 Óxidos de nitrógeno
 - 2.1.5 Compuestos orgánicos volátiles
- 2.2 Fuentes de emisión
- 2.3 Legislación ambiental

3. Equipos de control

- 3.1 Control de partículas
 - 3.1.1 Cámaras de sedimentación
 - 3.1.2 Separadores ciclónicos
 - 3.1.3 Colectores húmedos
 - 3.1.4 Filtros de tela
 - 3.1.5 Precipitadores electrostáticos
- 3.2 Control de gases
 - 3.2.1 Adsorción
 - 3.2.2 Absorción
 - 3.2.3 Incineración
- 3.3 Estrategia de control

4. Gestión informática

4.1 Sistemas de información

4.2 Bases de datos

4.3 Base de datos para uso industrial

5. Ejemplo: Industria petrolera

5.1 Procesos industriales

5.1.1 Separación

5.1.2 Conversión

5.1.3 Tratamiento

5.1.4 Mezclado

5.1.5 Equipos auxiliares

5.2 Principales fuentes de emisión y contaminantes

5.3 Base de datos

5.3.1 Estructura

5.3.2 Pantallas de la base de datos

6. Conclusiones y recomendaciones

7. Referencias bibliográficas

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace algunas décadas, la población mundial ha comenzado a preocuparse por un problema que parecía intrascendente: la contaminación.

Hoy en día es innegable que la contaminación es uno de los problemas más graves que afrontan la mayoría de los gobiernos en el mundo. Las decisiones gubernamentales en política ambiental no siempre son las más adecuadas y, aunque las soluciones tecnológicas muchas veces existen, la influencia de intereses económicos, políticos y personales impiden que se realicen las acciones pertinentes.

Para tomar las decisiones correctas, los gobiernos deben contar con mejores sistemas de análisis e información. Deben, además, existir instituciones tecnológicas competentes que colaboren con las instancias administrativas del país y, lo más importante, debe fomentarse una mayor participación ciudadana para la elaboración, vigilancia y aplicación de las normas ambientales.

Respecto a sistemas de información, actualmente existen sistemas de cómputo capaces de almacenar gran cantidad de datos a los que el usuario puede acceder rápida y fácilmente. Por otro lado, las computadoras son capaces de predecir -mediante modelos matemáticos muy complejos, en función de las condiciones de emisión y de las variables meteorológicas- la dispersión y concentración de contaminantes en una región determinada. Estos modelos son una herramienta muy útil en la prevención de riesgos e impactos ambientales.

En muchas ocasiones los daños ambientales se han producido por ignorancia, como el causado a la capa de ozono por los clorofluorocarbonos, CFC's. Es por esto que se requiere de un esquema en el que se conozcan los hechos y se analicen los costos y beneficios de diferentes medidas de control ambiental, para reducir el peligro potencial.

El resultado más importante de un buen sistema de información y educación ambiental es el

cambio de comportamiento. Cuando la población se encuentra bien informada, es más fácil tomar acciones conjuntas en beneficio del medio ambiente.

El deterioro del medio ambiente se puede considerar como un indicador del desarrollo de la sociedad, pues perjudica la salud de las personas, y "desarrollo" se puede definir como mejoría en nivel de vida de un grupo humano.

En los últimos foros internacionales a favor del medio ambiente, se ha empleado el término "desarrollo sostenible"; según la Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo, el "desarrollo", para considerarse sostenible, debe de cumplir con la siguiente condición: asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias, en otras palabras, el desarrollo sostenible es un desarrollo duradero.

La evaluación de los aspectos que influyen en la determinación de lo que queremos heredar a las futuras generaciones es sumamente compleja, pues deben asignarse valores monetarios a recursos naturales, evaluando los beneficios que se pueden adquirir a futuro con las inversiones que se realicen en el presente, tanto en aspectos ambientales como económicos.

Debemos estar conscientes de que la explotación de los recursos naturales es la base del desarrollo humano, pero se deben establecer medidas que equilibren desarrollo y deterioro ambiental.

1.1 Generación de energía

A partir de la revolución industrial, el desarrollo tecnológico aumentó de manera impresionante en el consumo de energía. La producción de energía es una de las principales actividades tanto en los países industrializados como de los que se encuentran en vías de desarrollo.

La producción masiva de energía ha causado graves problemas de contaminación, lo cual debe servir como antecedente para que los países que se encuentran en vías de desarrollo tomen conciencia del problema para disminuir las consecuencias ambientales que se generan en las etapas de crecimiento.

Algunos de los puntos a considerar para reducir el deterioro ambiental son: intensificar la investigación y el desarrollo de las fuentes alternativas de energía como la energía solar, la eólica, la geotérmica y la mareomotriz; mejorar la calidad de los combustibles reduciendo al máximo sustancias como el plomo y el azufre; disminuir el consumo de combustibles fósiles, en especial las gasolinas mediante mejoras en los sistemas de transporte público en las ciudades; aumentar la eficiencia en los ciclos termodinámicos, y crear sistemas adecuados para la predicción y evaluación de riesgos.

Los combustibles derivados del petróleo se emplean de manera importante en la generación de energía eléctrica, siendo destinado para este fin 30% de la producción mundial. En los países en desarrollo 55% de la producción de petróleo es empleada para el transporte; este consumo ha aumentado en 50% desde 1980, mientras que en los países de la OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo Económico) aumentó en un 10% (Banco Mundial, 1992). Por lo anterior se espera que la industria petrolera siga siendo una de las más importantes varias décadas más, por lo que es de vital importancia hacer hincapié en el control ambiental relacionado con esta fuente de energía.

En lo que respecta a la producción de energía eléctrica y a las políticas económicas que se practican en México y en general en los países en vías de desarrollo, resaltan los precios de ésta en relación con los que existen en los países de la OCDE. En 1988 el precio en dólares por kWh en los países de la OCDE era de \$0.08 mientras que en México era de \$0.035 (Banco Mundial, 1992), dando lugar a una demanda excesiva y reduciendo la capacidad de las plantas para invertir en nuevos equipos más limpios y eficientes. Esto nos lleva a reflexionar sobre la necesidad de realizar un estudio técnico, político y financiero en el que se definan las tarifas adecuadas de la energía eléctrica tomando como un factor importante los efectos ambientales.

1.2 *Objetivo*

Como ya se mencionó anteriormente, la información juega un papel fundamental en el control de la contaminación, por lo que aquella debe ser accesible y confiable. Para organizar la información que existe sobre la producción de energía a partir de la quema de combustibles fósiles y el control de los contaminantes atmosféricos que esta produce, se creará una base de datos en la que se contará con una estructura en la que se reduzcan los problemas de inconsistencia en las consultas que se realicen.

Esta tesis tiene como objetivo desarrollar las bases de una herramienta de consulta, la cual además de actuar como un medio informativo, sea también un elemento auxiliar en la toma de decisiones dirigido a industriales y personas involucradas en el problema de la generación y control de contaminantes atmosféricos dentro de la industria petrolera, tratando de que la información se encuentre ordenada, para que las consultas se realicen de manera sencilla.

Otro objetivo de este trabajo es fomentar una cultura ambiental y crear conciencia sobre los daños que causa el deterioro del medio ambiente tanto al hombre como a su entorno. Es importante mencionar que es imposible interactuar con el medio ambiente sin alterar su estado natural, pero se debe buscar un equilibrio entre el desarrollo tecnológico, económico, político, social y cultural del hombre con el deterioro que sufra nuestro entorno natural.

La estructura de la base de datos que se diseñará contempla aspectos tales como: la clase del proceso de producción; el o los combustibles que se emplean; los contaminantes que se emiten a la atmósfera; los factores de emisión correspondientes a cada contaminante; los efectos que causa cada contaminante, y los equipos de control más empleados.

La base de datos que se presenta en esta tesis se desarrolló empleando como ejemplo los procesos industriales de Pemex, ya que es una de las principales industrias de nuestro país que realizan acciones decisivas para el control de la contaminación.

Esta tesis se ha estructurado en seis capítulos. En el capítulo dos se habla sobre la contaminación, los contaminantes más importantes, sus principales fuentes y efectos. Los principales equipos de control para partículas y contaminantes gaseosos se mencionan en el capítulo tres, el capítulo cuatro se refiere a la estructura de la base de datos y el manejador que se utilizó. En el capítulo cinco, como ejemplo, se analizan los equipos y procesos más importantes en la refinación del petróleo y se mencionan algunos puntos referentes a la legislación ambiental vigente. Se finaliza con las conclusiones y recomendaciones generales de este trabajo.

2. CONTAMINACIÓN

La contaminación ambiental es un problema que nos atañe a todos, pues de una manera directa o indirecta nos afecta. Un contaminante se puede definir como una sustancia que se encuentra en el lugar equivocado, en concentraciones perjudiciales para la vida humana, las plantas o los animales. Por ejemplo, el ozono se puede considerar o no como un contaminante puesto que en la capa exterior de la atmósfera actúa como un filtro de las radiaciones solares ultravioletas, mientras que en la región más cercana a la superficie terrestre produce irritación en ojos y vías respiratorias, dañando tanto al hombre como a la flora y fauna.

En de este trabajo sólo se hará referencia a la contaminación atmosférica producida por fuentes industriales ya que la contaminación del agua y del suelo, a pesar de tener gran importancia, caen fuera de los alcances establecidos en el capítulo anterior.

Para definir un contaminante del aire se establece la composición y concentración de una muestra de aire "limpio" y se clasifica como contaminante a todos los otros materiales o las concentraciones excedentes. En la siguiente tabla (tabla 2.1) se indica la composición química promedio del aire atmosférico seco (Wark, 1992).

Se consideran contaminantes el monóxido de carbono, los hidrocarburos y el ozono, si su concentración excede 0.04 ppm (Wark, 1992). El bióxido de carbono y el vapor de agua no se consideraban contaminantes, pero al aumentar considerablemente su nivel de emisión, el efecto invernadero que producen podría aumentar de manera importante la temperatura de la Tierra.

Es común expresar la concentración de un contaminante gaseoso en partes por millón (ppm), prefiriéndose mg/m^3 o $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para contaminantes particulados.

Tabla 2.1 Composición del aire limpio

<i>Sustancia</i>	<i>Volumen (%)</i>
Nitrógeno	78.0484±0.004
Oxígeno	20.9461±0.002
Argón	0.9341±0.001
Dióxido de carbono	0.0331±0.001
Neón	1.8×10 ⁻³
Helio	5.2×10 ⁻⁴
Metano	1.2×10 ⁻⁴
Criptón	5.0×10 ⁻³
Hidrógeno	5.0×10 ⁻³
Xenón	8.0×10 ⁻⁴
Dióxido de nitrógeno	2.0×10 ⁻⁴
Ozono	(1.0-4.0)×10 ⁻⁴

2.1 Principales contaminantes

En esta sección mencionaré los principales contaminantes atmosféricos, señalando sus características y efectos sobre la salud humana, animales, plantas y materiales.

Al hablar de los efectos que producen los contaminantes, es importante considerar el sinergismo. Esta propiedad nos dice que las sustancias, al mezclarse, pueden cambiar sus efectos ya sea positiva o negativamente; sustancias que por sí solas son tóxicas al mezclarse pueden adquirir otra propiedad. Hasta ahora no se ha podido definir claramente los efectos que producen algunos contaminantes sobre la salud humana, pues existen efectos sinérgicos.

A continuación se revisa brevemente la información conocida sobre los siguientes contaminantes:

monóxido de carbono, partículas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. A pesar de que el ozono es un contaminante de gran importancia, éste no se emite por ninguna fuente, sino que se forma en la atmósfera (contaminante secundario), por lo que no será considerado en este trabajo.

2.1.1 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono, CO, es un gas incoloro e inodoro, con una vida media de 2 a 4 meses (Wark, 1992), oxidándose lentamente al estar en la atmósfera y formando dióxido de carbono, CO₂.

El efecto de envenenamiento que produce el monóxido de carbono en las personas, se debe a la afinidad de este gas con la hemoglobina (Hb), formando carboxihemoglobina (COHb), la cual reduce la capacidad de transporte de oxígeno a todo el cuerpo. Según estudios publicados por Von Post-Lingen en 1964, una concentración entre el 10 y 80% de COHb produce vértigos, fatiga, dolores de cabeza y hasta la muerte. En la tabla 2.2 podemos observar los efectos tanto del CO y de la COHb a diferentes concentraciones y periodos de exposición (Wark, 1992).

La hemoglobina resulta tener una afinidad con el CO unas 210 veces mayor que la que tiene con el oxígeno, por lo que se requiere una presión parcial del CO de 1/200 a 1/250 veces la del oxígeno para saturar completamente la hemoglobina con CO.

La concentración de COHb disminuye rápidamente al suspender la exposición a este gas. Se ha observado que en pacientes sanos se libera la mitad de la COHb acumulada en un periodo de 3 a 4 horas (Parker, 1983).

No se han encontrado efectos producidos por el CO en las plantas ni tampoco en materiales, por lo que se cree que este gas perjudica solamente al hombre y otros animales que efectúan respiración aerobia.

Tabla 2.2 Efectos del CO y COHb

<i>Concentración/exposición</i>	<i>Efectos</i>
9 ppm/8 h	Norma ambiental en E.U. sobre la calidad del aire ambiente
50 ppm/6 semanas	Cambios estructurales en el corazón y cerebro de los animales
50 ppm/30 min	Cambios en el umbral de la luminosidad relativa y la agudeza visual
50 ppm/de 8 a 12 h para no fumadores	Impedimentos en el funcionamiento de las pruebas psicomotoras

Nivel de COHb (%)	Efectos
<1.0	No hay efectos aparentes
1.0-2.0	Evidencias de efectos sobre la conducta
2.0-5.0	Efectos sobre el sistema nervioso central. Efectos en el discernimiento de los intervalos de tiempo, agudeza visual, luminosidad y algunas otras funciones psicomotoras
>5.0	Cambios funcionales cardíacos y pulmonares
10.0-80.0	Dolores de cabeza, fatiga, somnolencia, coma, fallas respiratorias y muerte

2.1.2 Partículas

Partículas es un término que se emplea para describir la materia sólida y líquida dispersa y transportada en el aire, mayor que moléculas individuales (0.0002 μm de diámetro) pero menor de 500 μm . Las partículas en este rango de tamaño tienen una vida media en suspensión que va de unos cuantos segundos hasta meses.

En la tabla 2.3 se muestran las definiciones que se emplean para describir las partículas suspendidas en el aire (Wark, 1992). Es importante conocer el tamaño de las partículas, debido

a que éste es un factor fundamental para poder predecir su movimiento y saber qué efectos producirá a la salud, a las plantas, materiales y a la visibilidad; así como para seleccionar el equipo de control más adecuado.

Tabla 2.3 Clasificación de partículas

Partículas	Cualquier material excepto agua no combinada, que existe en estado sólido o líquido en la atmósfera o en una corriente de gas en condiciones normales.
Aerosol	Dispersión de partículas microscópicas, sólidas o líquidas, en medios gaseosos.
Polvo	Partículas sólidas de un tamaño mayor que el coloidal, capaces de estar en suspensión temporal en el aire.
Ceniza	Partículas de ceniza finamente divididas arrastradas por el gas de la combustión. Las partículas pueden contener combustible no quemado.
Niebla	Aerosol visible.
Vapores	Partículas formadas por condensación, sublimación o reacción química, predominantemente mayores de 1 µm (humano de tabaco).
Nebulina	Dispersión de pequeñas gotas de líquido de suficiente tamaño como para caer desde el aire.
Partícula	Masa discreta de materia sólida o líquida.
Humo	Partículas pequeñas arrastradas por los gases, que resultan de la combustión.
Hollín	Aglomeración de partículas de carbón.

La mayor parte de las partículas se encuentran dentro del rango de 0.1 µm y 10 µm conocidas como PM10. Las partículas con tamaños menores a 0.1 µm se comportan como moléculas individuales y presentan fuertes movimientos aleatorios causados por los choques con las moléculas de aire. Las partículas de más de 0.1 µm pero menores de 20 µm tienden a conservar el movimiento del gas que las arrastra y de esa manera son transportadas a grandes distancias. Para las partículas de más de 20 µm se encuentran velocidades de sedimentación significativas y eso causa que el aire las arrastre por periodos relativamente cortos.

Uno de los efectos más comunes de esta clase de contaminación es la reducción de la visibilidad, debido a la absorción y dispersión de la luz por los materiales que transporta el aire. La reducción de la visibilidad no sólo resulta desagradable para el individuo, sino que puede producir graves trastornos psicológicos y afectar la seguridad.

Si las moléculas de aire fueran el único factor de atenuación de la luz, se tendría una visibilidad media de 240 km, pero hay casos en que los contaminantes del aire reducen la visibilidad hasta 1.5 km. (Wark, 1992).

Las partículas arrastradas por el aire pueden ser químicamente activas o inertes, y dependiendo de su composición química y estado físico, causan grandes daños a los materiales; ensucian las superficies pintadas y la ropa, estimándose el costo de repintado y reposición de textiles en cientos de millones de nuevos pesos al año.

Lo que es más importante, las partículas pueden causar daños químicos directos, ya sea por su corrosividad, toxicidad o por servir de transporte a sustancias peligrosas.

Las partículas más peligrosas para la salud humana son las PM10, pues se estima que 50% de las partículas entre 0.001 y 0.1 μm se depositan en el sistema respiratorio. Es difícil cuantificar el efecto perjudicial de las partículas en los seres humanos; los datos obtenidos se basan en estadísticas sobre el número de pacientes que ingresan a hospitales, el índice de mortalidad por afecciones respiratorias y los niveles de concentración de partículas en el ambiente.

Existen algunos estudios que pretenden demostrar que algunas partículas son carcinogénicas, como las producidas por el humo del cigarro y el hollín, y en especial, las producidas por la quema de diesel.

Existen tres mecanismos de deposición de partículas en el sistema respiratorio: impactación inercial, sedimentación y difusión (movimientos brownianos). La importancia de estos mecanismos depende de factores fisiológicos y anatómicos, de la naturaleza del flujo de aire y de las características de las partículas (tamaño, forma, composición, etc.)

2.1.3 Dióxido de azufre

El dióxido de azufre se produce en los procesos de combustión que incluyen combustibles derivados del petróleo o carbón mineral, pues estos combustibles contienen una gran cantidad de azufre.

El dióxido de azufre, SO_2 , es un gas incoloro, no inflamable ni explosivo, el cual a concentraciones en el aire entre 0.3 y 1.0 ppm se puede detectar por medio del sentido del gusto y a concentraciones mayores de 3.0 ppm genera un olor acre e irritante. Este gas, al contacto con la humedad del aire, se transforma en ácido sulfúrico, H_2SO_4 . La combinación de este gas con la materia particulada y la humedad del aire produce los efectos más dañinos que se le atribuyen a la contaminación.

La lluvia ácida es causada principalmente por el dióxido de azufre, aunque también intervienen en menor proporción los óxidos de nitrógeno (NO_x). Los principales efectos de la lluvia ácida son el aumento de la corrosión por la disminución del pH (Índice de acidez o alcalinidad).

La combinación del SO_2 , dióxido de nitrógeno (NO_2), y algunos hidrocarburos como las olefinas, producen gran parte del neblumo que se forma en la atmósfera, el cual reduce de manera significativa la visibilidad. Existen estudios (Stern, 1986) que determinan la relación entre la concentración de SO_2 , el porcentaje de humedad relativa del aire y la reducción de visibilidad. Los resultados nos indican que si se mantiene constante la humedad relativa y se aumenta la concentración de SO_2 la visibilidad se reduce de manera importante, y al aumentar la humedad del aire, el rango de visión se reduce para una misma concentración de SO_2 . A una concentración de 0.10 ppm de SO_2 y una humedad relativa de 50% la visibilidad es de 8 km.

El SO_2 , en concentraciones alrededor de 0.5 ppm, produce un desagradable olor y los efectos irritantes aumentan la resistencia al flujo de aire por los conductos respiratorios. Si la exposición a este gas es prolongada y frecuente, se puede presentar tos crónica y secreciones de las mucosas, aunque estos efectos no sólo se deben al SO_2 , sino a la combinación de este con otros contaminantes. A concentraciones más elevadas, de 2 a 5 ppm, se pueden presentar ataques severos de asma en personas sanas (Theodore, 1988).

El SO₂ afecta las plantas atacando las células del parenquima esponjoso y de la empalizada, que conforman la estructura de las hojas, causando el colapso de los tejidos. Las áreas afectadas generalmente se secan dando lugar a patrones necróticos.

En lo que respecta a los efectos producidos por este contaminante sobre materiales resalta el aumento que produce en la corrosión sobre algunos metales. Se han realizado muchos estudios a largo plazo sobre la destrucción del acero y del cinc principalmente, ya que son los metales más susceptibles al ataque de este gas. En Pittsburgh, Pennsylvania, se observó una importante disminución en el índice de corrosión del cinc del orden de 3.5 en el periodo de 1926 a 1960, en el cual se redujo la concentración de SO₂ en un factor de 3 (Wark, 1992).

El cuero es otro material que se deteriora en presencia de SO₂, se debilita y termina por convertirse en un polvo rojizo, mientras que el papel se ve afectado en su flexibilidad y color al contacto con SO₂.

Los textiles naturales como el algodón también son atacados por el SO₂, el cual debilita las cadenas de celulosa en los eslabonamientos glucósidos, disminuyendo considerablemente la resistencia de estos materiales.

2.1.4 Óxidos de nitrógeno

Los principales óxidos de nitrógeno que se encuentran en la atmósfera son el óxido nitroso (N₂O), el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂); tanto al NO como al NO₂ se les conoce como NO_x. La concentración de óxido nitroso en la atmósfera está muy por debajo de la que produciría efectos biológicos, además de tener un ciclo natural balanceado que es independiente de los otros óxidos de nitrógeno (Wark, 1992).

Los óxidos de nitrógeno se producen por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante la combustión a elevadas temperaturas. Las principales fuentes de emisión son los motores de

combustión interna (Williamson, 1973).

La producción de NO depende de la cantidad de nitrógeno atómico y de oxígeno, así como de la temperatura de la flama. No depende de la composición del combustible siempre y cuando la temperatura sea mayor a 1000°C. Por debajo de esta temperatura, los procesos de formación de N₂O son más importantes. Si los gases fueran enfriados lentamente, el NO regresaría a ser N₂ y O₂, pero como en las máquinas de combustión se tiene un enfriamiento rápido de los gases de escape, el NO se mantiene estable.

Más de 90% de la generación de NO_x es de origen antropogénico (producido por la actividad humana). En la tabla 2.4 se muestra una estimación de las emisiones de estos gases en Estados Unidos para 1977 (Wark, 1992).

Los efectos que producen los NO_x no son, por sí mismos muy preocupantes, ya que su toxicidad no es tan alta como por ejemplo la del SO₂. El problema de estos contaminantes radica en su actividad en las reacciones fotoquímicas que dan origen al neblumo y a sustancias más peligrosas como el ozono.

Tabla 2.4 Emisiones de NO_x en E.U.

Fuente	Miles de toneladas	%
Transporte	10,100	39.8
Fuentes estacionarias	14,300	56.3
Disposición de desechos sólidos	110	0.4
Miscelánea	110	0.4

2.1.5 Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles, también conocidos como VOC's por sus siglas en inglés (volatile organic compounds), son hidrocarburos volátiles que intervienen en la formación del neblumo fotoquímico favoreciendo la formación de ozono. En muchas ciudades la principal fuente de VOC's es el uso de gasolinas en los vehículos, seguida por el uso de solventes.

Las emisiones de VOC's debidas a las gasolinas dependen directamente de la composición de las mismas. En la tabla 2.5 se puede observar el índice de foto-oxidación dependiendo de la diferente concentración de algunos hidrocarburos en tres marcas distintas de gasolinas. En la gasolina C la presencia de una mayor cantidad de olefinas produce una reacción foto-oxidante casi del doble que la gasolina A (Glason, 1970).

El uso de solventes es otra fuente importante en la emisión de VOC's, ya que el uso de pinturas, barnices y sustancias como el tetracloroetileno que se emplea para el lavado en seco liberan una gran cantidad de orgánicos volátiles. La industria automotriz, por la gran cantidad de pintura que emplea, es una de las que emiten más hidrocarburos volátiles, lo mismo que las tintorerías.

En las refinerías, los VOC's se emiten por evaporación de productos en tanques de almacenamiento, así como por fugas en tuberías, accesorios y en las operaciones de carga y descarga de combustibles y otras sustancias volátiles.

Los hidrocarburos no parecen producir daños apreciables por corrosión sobre materiales (las partículas producidas por hidrocarburos no quemados ensucian las superficies). De todos los hidrocarburos, el etileno es el único que presenta efectos en las plantas a concentraciones habituales, inhibiendo su crecimiento (Wark, 1992). Algunos hidrocarburos poseen efectos carcinogénicos, principalmente los aromáticos polinucleares.

El oxígeno monoatómico que se forma en la atmósfera reacciona con algunos hidrocarburos, en especial con las olefinas, formando radicales libres tanto orgánicos como inorgánicos. Estos

radicales libres son capaces de oxidar el NO transformándolo en NO₂ y el oxígeno molecular produciendo ozono y smog fotoquímico.

2.2 Fuentes de emisión

Las fuentes de emisión de contaminantes se clasifican en antropogénicas y naturales. Las fuentes naturales son las que no tienen que ver con la actividad del hombre (los volcanes en actividad emiten grandes cantidades de cenizas, gases sulfurosos, monóxido de carbono, etc.). Por otro lado las fuentes antropogénicas son las relacionadas con la actividad humana. Las fuentes de emisión también se dividen en fuentes fijas y móviles, las móviles son: automóviles, trenes, aviones, etc., mientras que las fuentes fijas son principalmente las industrias sobre las que esta tesis concentrará su análisis, específicamente sobre las que existen en la industria del petróleo.

Tabla 2.5 Composición de tres marcas de gasolina (% molar)

	Marca		
	A	B	C
Índice de foto-oxidación (ppm/min)	1.7	2.4	3.2
Parafinas	71	66	52
Aromáticos	20	20	24
Olefinas	9	14	24

Dentro de los diferentes ramos de la industria, se encuentra una gran cantidad de operaciones unitarias en los procesos industriales. En estas operaciones unitarias existen equipos que pueden o no ser fuentes de emisiones contaminantes. Los equipos que son considerados como

contaminantes son los que en su funcionamiento intervienen procesos de combustión, producción de polvos, o en los que se producen reacciones químicas que dan como resultado gases contaminantes.

Las diferentes industrias se clasifican en ramos industriales, los cuales agrupan a las industrias que poseen ciertas características en común. Algunos de los ramos industriales más importantes son: industria metalúrgica, química, agrícola y de alimentos, minera no metálica, petrolera y de la madera.

Existen instituciones como la Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (Canacindra) en la que se cuenta con los siguientes Consejos Coordinadores:

- Industrias de alimentos y bebidas
- Industria automotriz
- Industria de bienes de capital
- Industrias diversas
- Industriales técnicos de servicio
- Fabricantes de productos y materiales para la construcción
- Industria metal-mecánica
- Industria mueblera
- Industria elaboradora de artículos de papel, cartón y escritorio
- Industria química y paraquímica

Dentro de los sectores antes mencionados se debe efectuar una clasificación más específica de las industrias para un análisis de impacto ambiental. Por ejemplo, dentro del sector automotriz se encuentran, entre muchas otras, los fabricantes de balatas, pastas de clutch y materiales de fricción, y los fabricantes de carrocerías. Los problemas de contaminación que presentan estas dos industrias son completamente diferentes, por lo que requieren de un estudio por separado.

En cada una de las diferentes industrias se encuentran problemas específicos de contaminación,

ya que los equipos y procesos son muy diversos y difieren en gran medida unos de otros. Es por esto que se debe realizar un análisis particular para cada caso y de esa manera determinar cuáles son los equipos y contaminantes que predominan dentro de cada industria.

En la industria del petróleo, los equipos considerados como fuentes de emisiones atmosféricas son principalmente: las unidades de cracking catalítico por lecho móvil y lecho fluidizado, las calderas y calentadores de proceso y los compresores de combustión interna. Por otro lado existen emisiones a la atmósfera de hidrocarburos evaporados de los tanques de almacenamiento, así como fugas en válvulas, tuberías y accesorios en general. Más adelante se hablará con más detalle de estos equipos.

2.3 Legislación ambiental

Además de conocer las características de los principales contaminantes atmosféricos y las fuentes que los producen es indispensable conocer el marco legal dentro del cual se realizan las actividades industriales de interés, ya que el cumplimiento de las normas establecidas es una de las principales razones por las que deben instalarse equipos de control.

En los últimos años, el modelo económico mundial ha seguido una tendencia de globalización, por lo que México ha firmado varios convenios internacionales. Uno de los aspectos más importantes del Tratado de Libre Comercio, es la asimetría normativa de los tres países, por lo que se han establecido los derechos de cada país a adoptar sus propias medidas de normalización, con sus correspondientes niveles de protección del ambiente, de los consumidores y del desarrollo sustentable. Se han establecido compromisos para lograr la compatibilidad y equivalencia entre las normas ambientales de los tres países, para lo cual se acordó el establecimiento de procedimientos de evaluación de la conformidad en el cumplimiento de estos ordenamientos.

Los principales organismos que regulan en México las cuestiones ambientales son el Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) que

dependen directamente de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol). El INE se encarga de coordinar los trabajos necesarios para la elaboración de las Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental, mientras que la Procuraduría se encarga de vigilar el cumplimiento de estas normas y de imponer las sanciones correspondientes a quienes las violen.

Para la elaboración de la normatividad ambiental, se cuenta con la participación del Gobierno Federal y de los gobiernos de los estados y del Departamento del Distrito Federal, de las asociaciones y cámaras industriales, comerciales y de servicios, de la academia y de los institutos de investigación, de empresas consultoras, profesionistas y de organizaciones no gubernamentales, así como la de todos los ciudadanos que se interesen en aportar su tiempo y conocimientos para mejorar la calidad de vida en materia ambiental.

En la actualidad aún no existe una normatividad completa para las emisiones a la atmósfera por fuentes fijas. La única norma actualmente vigente es la Norma Oficial Mexicana (NOM-085-ECOL-1994), la cual se aplica a fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, así como los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión y los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

En el siguiente capítulo se presentan los equipos de control con los que cuenta la industria para reducir sus emisiones y no violar esta norma.

3. EQUIPOS DE CONTROL

Debido a la creciente necesidad de reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera, es importante tener nociones sobre el diseño de equipo de control, para poder establecer los criterios de selección adecuados para cada caso en particular.

Existen dos maneras de controlar las emisiones de contaminantes: una es evitar o reducir su formación, principalmente en los procesos de combustión, utilizando combustibles más limpios, empleando quemadores más eficientes o mejorando la calidad de los procesos y la otra, consiste en eliminar, de los gases de escape, los contaminantes mediante "equipos de control".

En general, los equipos de control de contaminantes que se emplean, se dividen en colectores de partículas y limpiadores de gases, aunque en algunos casos, existen equipos que remueven tanto partículas como gases.

3.1 *Control de partículas*

Los equipos colectores de partículas operan básicamente sobre el principio de actuación de fuerzas externas sobre las partículas en un flujo gaseoso o por la presencia de objetos interceptores.

Los principales factores que se deben tomar en cuenta para la selección de un equipo de control de partículas son cuatro: la concentración de partículas en el flujo de gas, la distribución de tamaños de las partículas a remover, la magnitud del flujo y la cantidad permitida de partículas en la descarga.

Otro de los aspectos importantes que debe considerarse es el costo del equipo, el cual está ligado directamente a su eficiencia y flujo volumétrico del gas a limpiar. En cuanto a los factores de operación que afectan el costo, se deben considerar la caída de presión, el consumo de energía y el volumen de líquido requerido (si se tratara de un sistema húmedo).

Los equipos que remueven partículas de flujos gaseosos funcionan con base en uno o más de los siguientes fenómenos físicos:

Sedimentación. El flujo con partículas es introducido a una cámara donde por gravedad las partículas caen. A esta clase de equipo se le conoce como cámara de sedimentación.

Campo eléctrico. El flujo de gas se introduce a un aparato en el que las partículas se cargan eléctricamente y después son sometidas a fuerzas electrostáticas que actúan sobre ellas y hacen que se concentren sobre las paredes del dispositivo, separándolas del gas. A los equipos que operan de esta manera se les conoce como precipitadores electrostáticos.

Deposición inercial. Cuando una corriente de gas cambia repentinamente su dirección, las partículas tienden a conservar la dirección original debido a su inercia. Los equipos que funcionan bajo este principio son los ciclones, filtros y lavadores.

Difusión browniana. Las partículas suspendidas en un flujo de gas se encuentran en movimiento browniano. Cuando una corriente de gas fluye alrededor de un obstáculo, los movimientos aleatorios naturales de las partículas las ponen en contacto con los obstáculos haciendo que éstas se adhieran y sean removidas. Entre más pequeña sea la partícula el efecto browniano será mayor, por lo que este sistema es más efectivo para partículas muy pequeñas.

Estos mecanismos físicos varían su eficiencia de colección dependiendo del diámetro de la partícula (D_p), el cual finalmente es el factor más importante para la selección de un equipo.

La tabla 3.1 nos muestra los equipos de control de partículas y los diámetros para los que son recomendados (Wark, 1992).

Tabla 3.1 Colectores de partículas

Nombre del equipo	Rango de partículas(μm)
Ultrasonido	0.001-10
Lavador húmedo	0.001-100
Colector de tela	0.001-70
Filtro de aire de alta eficiencia	0.001-7
Lecho empacado	0.001-900
Precipitador electrostático	0.001-70
Cámara de sedimentación	>10
Filtros de aire	1-100
Separador mecánico	7-700

Existen cinco clases básicas de equipos de colección de partículas: cámara de sedimentación, separadores ciclónicos (centrífugos), colectores húmedos, filtros de tela y precipitadores electrostáticos.

3.1.1 Cámaras de sedimentación

Las cámaras de sedimentación son los dispositivos de control de partículas más sencillos que se pueden encontrar. Su funcionamiento consiste en reducir la velocidad del gas, de tal forma que las partículas se depositen en el fondo de la cámara por efectos de la gravedad. Por lo general, las partículas más pequeñas que pueden ser separadas por estos equipos son de 50 μm , aunque en algunos casos se obtienen buenos resultados con partículas de hasta 10 μm ; esto es función de la velocidad de sedimentación que no sólo depende del tamaño sino también de la densidad de éstas.

Generalmente estos equipos se emplean para una primera etapa de limpieza, retirando las partículas de mayor tamaño. Al reducir la carga de partículas disminuye el tamaño de equipos de control posteriores, bajando su precio así como los costos de operación y mantenimiento. Existen procesos en los que las partículas son reciclables, por lo que las cámaras de sedimentación, al separar las partículas de mayor tamaño que representan un porcentaje muy alto de la masa a recuperar, son muy útiles.

Para calcular la eficiencia de una cámara de sedimentación para partículas de un diámetro determinado se emplea la ecuación siguiente (Crawford, 1976):

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{nLW\rho_p g d^2}{18\mu Q}\right) \quad (3.1)$$

donde:

- η = eficiencia de colección
- n = número de charolas colectoras
- L = longitud de la cámara [m]
- W = ancho de la cámara [m]
- ρ_p = densidad de la partícula [kg/m³]
- g = aceleración de la gravedad [m/s²]
- d = diámetro de la partícula [m]
- μ = viscosidad dinámica del gas [kg/m·s]
- Q = flujo volumétrico [m³/s]

A estas cámaras se les colocan charolas adicionales para disminuir la altura de sedimentación y aumentar la eficiencia de estos dispositivos, aunque al aumentar el número de charolas también aumenta el costo del equipo y la dificultad de la limpieza.

Para el funcionamiento de estos equipos y su limpieza se debe tomar en cuenta la concentración

de partículas en el gas. Las cuatro formas más comunes de presentar esta concentración son: concentración másica, concentración volumétrica, concentración masa-volumen y finalmente la concentración en partes por millón (Crawford, 1976). Esto es:

concentración másica:

$$C_m = \frac{m_p}{m_a + m_p} \quad (3.2)$$

concentración volumétrica:

$$C_v = \frac{V_p}{V_a + V_p} \quad (3.3)$$

concentración masa-volumen:

$$C_{mv} = \frac{m_p}{V_a + V_p} \quad (3.4)$$

concentración en ppm:

$$C_{ppm} = \frac{V_p}{V_a} * 10^6 \quad (3.5)$$

donde m hace referencia a la masa, V al volumen, a a la mezcla gaseosa y p a las partículas, siendo la forma más empleada la concentración masa-volumen.

3.1.2 Separadores ciclónicos

Los separadores ciclónicos son dispositivos en los que se emplea la fuerza centrífuga que experimentan las partículas dentro de una corriente circular. Existen dos tipos principales de separadores ciclónicos: los de involuta y los de paletas axiales. La diferencia es la manera en que se introduce el gas dentro de un casco cilíndrico donde se imparte un movimiento giratorio. Los

separadores de involuta poseen una entrada rectangular tangencial al cilindro, de tal manera que en una involuta de 180° el flujo se acopla paulatinamente al cilindro. En el caso de los ciclones de aletas axiales, el gas entra axialmente al cilindro impulsado por un anillo de paletas. En ambos casos, la fuerza centrífuga lanza las partículas contra las paredes del cilindro para ser colectadas en un cono en la parte inferior del equipo.

Por lo general, estos dispositivos se emplean para separar partículas de 10 μm de diámetro o más, y los ciclones convencionales no tienen eficiencia de más de 90% a menos que las partículas sean mayores de 25 μm . Existen equipos de alta eficiencia que son capaces de remover partículas de hasta 5 μm . Pero, sin importar el diseño del equipo, la eficiencia cae rápidamente al disminuir el tamaño de las partículas.

En la tabla 3.2 se muestran los valores promedio de eficiencia global de los ciclones convencionales y de los de alta eficiencia (Wark, 1992).

Las proporciones de las dimensiones de los ciclones, normalizadas por Lapple en 1951 se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.2 Eficiencia global de ciclones

Tamaño de la partícula (μm)	Ciclones convencionales	Ciclones de alta eficiencia
<5	<50	50-80
5-20	50-80	80-95
15-50	80-95	95-99
>40	95-99	95-99

Tabla 3.3 Proporciones dimensionales de los ciclones

Longitud del cilindro	$L_1=2D_o$
Longitud del cono	$L_2=2D_o$
Altura de la entrada	$H=D_o/2$
Ancho de la entrada	$W=D_o/4$
Diámetro del cilindro de salida	$D_e=D_o/2$
Diámetro de salida del polvo	$D_d=D_o/2$

D_o se refiere al diámetro exterior del cilindro.

La ecuación siguiente nos da la eficiencia colectora fraccionaria, mostrándonos las variables de los ciclones que intervienen en su determinación (Wark, 1992).

$$\eta_d = \frac{\pi N_e \rho_p d_p^2 V_g}{9 \mu W} = \frac{\pi N_e \rho_p d_p^2 Q}{9 \mu H W^2} \quad (3.6)$$

donde:

N_e = número de giros efectivos dentro del ciclón

V_g = velocidad de entrada del gas

3.1.3 Colectores húmedos

En un colector húmedo se emplea generalmente agua para aumentar el tamaño de los aerosoles y partículas, y así facilitar su remoción de la corriente de gas. Los colectores húmedos son capaces de limpiar partículas que varían su tamaño de 0.1 a 20 μm .

El objetivo principal de estos equipos es lograr una buena dispersión del líquido para ponerlo en contacto con las partículas; esto se logra atomizando el líquido de colección en gotas entre 0.1

a 1.0 mm que producen las más altas eficiencias.

Los equipos lavadores que se mencionarán aquí son los siguientes: lavadores de cámaras de aspersión, lavadores ciclónicos (ciclones húmedos) y lavadores venturi.

Cámaras de aspersión:

Esta clase de colectores es la más sencilla, consiste en introducir líquido por la parte superior de una cámara vacía, empleando boquillas de aspersión. Las gotas caerán por su propio peso a su velocidad terminal, viajando en contraflujo con respecto al gas que se introduce por la parte inferior de la cámara. El lodo producido se colecta en un recipiente localizado en la parte inferior del equipo, después se lleva a tratamiento para separar los sólidos del agua y poder recircularla.

También existen las cámaras de flujo cruzado, en las que el gas, en vez de viajar verticalmente hacia arriba, se dirige en dirección horizontal. Estos equipos se pueden encontrar con o sin placas de choque, las cuales ayudan a la eliminación de partículas pero aumentan la caída de presión.

Lavadores ciclónicos:

Un lavador ciclónico es un ciclón al que se le colocan boquillas de aspersión en su interior; las gotas de agua actúan sobre el vórtice exterior y sobre la pared interna del equipo.

Lavadores venturi:

Estos dispositivos difieren de los anteriores en que el agua no es atomizada por boquillas, sino por el gas que se acelera en un venturi y realiza la atomización. El venturi consiste en un canal de flujo rectangular o circular que converge a una garganta de sección estrecha y luego diverge a su área original. Si se emplea una relación de reducción de área de 4:1 en un lavador venturi, se pueden alcanzar velocidades de 50 a 180 m/s. Por lo general el líquido es introducido al flujo de gas en la garganta del venturi, que es donde se tiene la mayor velocidad.

3.1.4 Filtros de tela

La filtración de partículas es uno de los métodos de limpieza de gases más antiguo, y consiste en colocar en la trayectoria del gas algún material, ya sea granular o fibroso, que retenga las partículas. El filtro debe ser compatible con las condiciones del gas (temperatura, pH, humedad, etc.) para obtener valores adecuados en la vida media de éste. Los filtros de tela generalmente tienen forma cilíndrica con diámetros que van de 10 a 35 cm y longitudes de hasta 1.30 m, colocando el número necesario dentro de una casa de bolsus. Las cargas típicas de polvo que se manejan son de 0.23 a 23 g/m³.

Las telas tejidas que se emplean como filtros tienen una relación entre el espacio de aire y el área de tela de 1:1 a 5:1, por lo que los fenómenos de colección que intervienen son: impactación por inercia, intercepción directa y difusión. Las partículas mayores de 1 µm son recolectadas principalmente por impactación e intercepción directa, mientras que las partículas menores de 1 µm son colectadas por difusión.

La principal desventaja de los filtros es que se deben limpiar con frecuencia para evitar que se produzcan caídas de presión innecesarias; es por esto que el diseño de estos equipos debe estar enfocado a obtener una facilidad relativa de limpieza. Otro aspecto que se debe considerar es la relación geométrica entre el área superficial (m²) y el gasto volumétrico de gas (m³/s). El inverso de esta relación se conoce como relación aire a tela, o relación de filtración. Los valores óptimos de esta relación van de 0.5 a 4 cm/s (Wark, 1992).

Por lo general, el gas con partículas entra por la parte inferior de la bolsa, el gas atraviesa las paredes y las partículas quedan dentro de ella. Existe una gran cantidad de diseños de filtros de bolsas y una de las clasificaciones más empleada es por el sistema de limpieza y por su operación. Los métodos de limpieza pueden ser por vibraciones mecánicas, choques de impulsos o flujo invertido. La operación de los filtros puede ser periódica o intermitente y automática o continua. Los equipos con operación intermitente requieren de un paro del filtro, por lo que se debe poder cerrar una parte del filtro para limpiarla, tener filtros auxiliares o en el peor de los

casos, parar el proceso para realizar la limpieza.

Los filtros con limpieza por vibraciones mecánicas presentan el costo más bajo por tasa de flujo volumétrico, la máxima velocidad de filtración para estos equipos está entre 1 y 1.6 cm/s.

El sistema de limpieza a contraflujo consiste en detener el flujo de gas contaminado e introducir aire limpio por la salida del filtro, esto hace que las capas de polvo se remuevan del interior de las bolsas.

El sistema de limpieza por pulsos consiste en introducir a las bolsas de tela pequeñas ráfagas de aire a presión, aceleradas por medio de venturis para obtener altas velocidades (en estos equipos el polvo se almacena por la parte exterior de las bolsas). A causa de que el conjunto de bolsas se limpia por secciones y que los tiempos que duran las ráfagas a contra flujo son muy cortos, el equipo puede seguir en funcionamiento durante la etapa de limpieza.

La eficiencia de colección de estos equipos es mayor al aumentar el espesor de la capa de polvo, pero también aumenta la caída de presión dentro del equipo. Es recomendable limpiar los filtros cuando producen una caída de presión de 15 mbar o más. Para filtros nuevos se tienen eficiencias de colección menores a las de los filtros con un cierto uso, ya que al ir limpiando los filtros, un porcentaje de las partículas permanece adherida al filtro, aumentando su capacidad colectora.

Existe una gran cantidad de telas para los filtros de bolsa. Entre las de uso común se encuentran la lana, el algodón, el nylon, las fibras de vidrio, los poliésteres y las poliamidas aromáticas. El tipo de tela estará determinado por las características físicas y químicas tanto del gas como de las partículas. Es importante mencionar que los filtros no pueden operar con flujos de aire con una temperatura inferior a la del punto de rocío, ya que la humedad hace que los filtros se tapen rápidamente y no se puedan limpiar fácilmente.

La eficiencia de los filtros limpios de tela es superior a 90% para partículas menores de 0.1 a 0.5 μm , pero mayor de 98% para partículas mayores de 1 μm . En general, los filtros de tela tendrán

eficiencias colectoras fraccionarias de 90% y mayores después de varios ciclos de limpieza. La eficiencia total usualmente excederá 99 por ciento.

Las ventajas de los filtros de tela son:

- Alta eficiencia colectora sobre un amplio intervalo de tamaños de partículas.
- Extrema flexibilidad de diseño, proporcionada por la disponibilidad de varios métodos de limpieza y medios filtrantes.
- Capacidad volumétrica en una sola instalación que puede variar de 0.05 a 2500 m³/s.
- Caídas de presión y requerimientos de energía razonables.
- Capacidad para manejar una diversidad de materiales sólidos.

Sin embargo, entre las desventajas reconocidas están las siguientes:

- Factores espaciales podrán prohibir la consideración de casas de bolsas.
- Posibilidad de explosión por la presencia de chispas en la cercanía de una casa de bolsas.
- Por lo general no es posible manejar materiales hidrofóbicos debido a problemas de limpieza.

En lugares donde no se tengan problemas por la dimensión de los filtros, éstos pueden competir con los lavadores de alta eficiencia y con los precipitadores electrostáticos, en términos de eficiencia de recolección de partículas sólidas, en especial polvos finos.

3.1.5 Precipitadores electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos son los equipos más utilizados en el control de partículas, con tamaños que van desde los empleados para la limpieza de gases en las plantas de energía más grandes, hasta equipos pequeños de uso casero. El principio básico de operación consiste en cargar eléctricamente las partículas para posteriormente hacerlas pasar por un campo magnético, en donde son atraídas hacia el polo con carga contraria a la partícula. En términos generales, los

precipitadores electrostáticos se diferencian de otros equipos de control por el hecho de que las fuerzas que separan las partículas se aplican directamente sobre éstas y no sobre toda la corriente de gas como en el caso de los ciclones.

La carga de las partículas se produce mediante la generación de iones en una corona eléctrica que se forma alrededor de un electrodo con un alto voltaje. Estos iones son mucho más pequeños que las partículas más pequeñas y en cantidad son muchos más, por lo que al viajar hacia el electrodo colector, chocan con casi todas las partículas que se encuentran dentro del gas y las cargan eléctricamente. Es importante aclarar que las partículas que se remueven pueden ser sólidas o líquidas.

Una vez cargadas las partículas, se dirigen hacia el electrodo colector pegándose a éste, formando una capa que con el tiempo aumenta su espesor. Las partículas que se encuentran más cerca del electrodo ceden lentamente su carga a éste, disminuyendo la fuerza de atracción, pero las partículas que se encuentran en la parte exterior de la capa, gracias a la resistencia del polvo que funciona como aislante, no pierden su carga con tanta facilidad y son las que proporcionan la fuerza necesaria para mantener adherida la capa de polvo al electrodo. Finalmente, para efectos de limpieza, cuando la capa de polvo alcanza un espesor entre 3 y 6 mm se desprende por vibraciones y se colecta en la parte inferior del equipo. Cuando se colectan partículas líquidas, éstas se adhieren a la placa colectora y caen por gravedad depositándose en el fondo del precipitador.

Algunas de las ventajas de los precipitadores son: capacidad para manejar grandes volúmenes de gas, altas eficiencias colectoras aun para partículas muy pequeñas, bajo consumo de energía y bajas caídas de presión, además de capacidad para operar con gases a temperaturas relativamente altas.

Existen precipitadores electrostáticos para gastos volumétricos desde 0.047 hasta 2000 m³/s y se utilizan para remover partículas desde 0.05 hasta 200 µm. La eficiencia de los precipitadores van de 98 a 99.9%. La caída de presión es de menos de 1.25 mbar y se pueden manejar gases de

hasta 650°C y presiones de 10 bar.

En la tabla 3.4 extraída del *Air Pollution Engineering Manual* se presentan algunos datos típicos de los usos de los precipitadores electrostáticos.

Tabla 3.4 Datos de precipitadores electrostáticos

Industria (uso)	Gasto de gas (m ³ /s)	Temperatura °C	Concentración del polvo (g/m ³)	Eficiencia típica %
Termoeléctrica (ceniza)	25-350	130-320	0.9-12	98-99.6
Cemento Portland (polvo de horno)	25-470	150-400	1.1-35	85-99
Acero	15-35	40-65	0.01-1.1	95-99
Pulpa y papel (vapores)	25-95	135-180	1.1-4.5	90-95
Petróleo (catalizador)	25-70	180-290	0.2-60	99-99.9

Finalmente, en la tabla 3.5 se resumen algunas características de operación de los principales equipos de control de partículas mencionados (Wark, 1992), y en la tabla 3.6 se muestran las eficiencias colectoras fraccionarias típicas de los mismos (Flagan, 1988).

3.2 Control de gases

Existen diversos fenómenos físicos y químicos que permiten la remoción de gases contaminantes de un flujo de gas. Los principales son: adsorción, absorción e incineración.

3.2.1 Adsorción

La adsorción se emplea para remover bajas concentraciones de gases contaminantes de una corriente de gas, produciendo un contacto íntimo entre esta corriente y un sólido poroso al cual se adhieren las moléculas de los gases contaminantes. Al sólido se le llama medio adsorbente, mientras que al gas o vapor adsorbido se le llama adsorbato. Los gases que se remueven por este mecanismo son principalmente solventes volátiles como benceno, etanol y tricloroetileno.

La adsorción comprende dos procesos: adsorción física y adsorción química. En la adsorción física, las moléculas de gas o líquido se adhieren a la superficie del adsorbente sólido como resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre ellas (fuerzas de Van der Waals). Estos procesos son exotérmicos y el calor producido es proporcional a la magnitud de las fuerzas de atracción entre las moléculas. Una de las principales ventajas de la adsorción física es que es un proceso reversible. Al aumentar la temperatura del proceso, el gas adsorbido es fácilmente desadsorbido sin cambio en su composición química. Esta propiedad es muy importante si se tienen que recuperar sustancias valiosas o para la regeneración del adsorbente. Por lo general, la adsorción es directamente proporcional a la cantidad disponible de superficie sólida.

La adsorción química es el resultado de una interacción entre el adsorbato y el medio adsorbente. Las fuerzas de atracción que actúan en esta operación son mucho más altas que las de Van der Waals, por lo que la energía liberada es mucho mayor que la que existe en la adsorción física. Este calor de adsorción permite la acción catalítica, ya que las moléculas adsorbidas requieren de una menor energía para reaccionar con otras sustancias. Este proceso generalmente es irreversible.

Una de las principales características que debe poseer el adsorbente es presentar una estructura interna porosa que proporcione grandes áreas de contacto. Por ejemplo, el carbón activado puede contener una superficie específica del orden de 10^5 a 10^6 m²/kg.

Tabla 3.5 Principales equipos de control de partículas

Clase general	Tipo específico	Capacidad típica	Caída de presión (mvsus)	Energía requerida (W/m ³ /min)
Colectores mecánicos	Cámara de sedimentación	15-25 m ³ /min por m ³ de volumen de la envoltura	0.5-1.3	1-4
	Mampara	30-1000 m ³ /min por m ² de área de entrada	1.3	
	Ciclones de alta eficiencia	770-1100 m ³ /min por m ² de área de entrada	7.5-12.5	15-35
Filtros de tela	Automático	0.3-2 m ³ /min por m ² de área de tela	10-15	35-45
Lavadores húmedos	Mampara de impacto	120-180 m ³ /min por m ³ de la mampara	5-13	7-35
	Torre empacada	150-210 m ³ /min por m ² del área transversal del lecho	15-20	
	Venturi	1800-9000 m ³ /min por m ³ del área de la garganta	25-125	140-425
Precipitadores electrostáticos	Seco, de un solo campo	0.6-2.5 m ³ /min por m ³ del área del electrodo	0.5-1.3	15-35
	Húmedo (lavador de gota cargada)	1.5-4.5 m ³ /min por m ³ del área del electrodo	1.3-1.8	10-15

Para que las partículas de adsorbato puedan penetrar en el adsorbente, las cavidades de éste deben ser mayores a un diámetro crítico, el cual es función del tamaño de las partículas que se desean adsorber.

Las principales sustancias que se emplean como adsorbentes son carbón activado, alúmina activada, sílica gel y tamices moleculares. Los primeros tres son adsorbentes amorfos con una estructura interna no uniforme. Los tamices moleculares son estructuras cristalinas con una distribución interna de canales bien definida. A continuación se presenta una breve descripción de estas sustancias.

Tabla 3.6 Eficiencias fraccionarias típicas

	Eficiencia para un tamaño dado (%)		
	5 μm	2 μm	1 μm
Ciclón de eficiencia media	30	15	10
Ciclón de alta eficiencia	75	50	30
Precipitador electrostático	99	95	85
Filtro de tela	99.8	99.5	99
Torre de aspersión	95	85	70
Lavador venturi	99.7	99	97

Carbón activado.- Las materias primas que se emplean para producir carbón activado son carbón vegetal, cáscaras de nuez y de coco, así como algunas semillas de frutas. Estos componentes se someten a un tratamiento térmico en ausencia de aire. Se emplea principalmente en la recuperación de vapores de hidrocarburos, la eliminación de olores y la purificación de gases.

Alúmina activada.- La alúmina activada se produce por medio de un tratamiento térmico especial efectuado a alúmina o bauxita. Es muy efectiva para el secado de gases, particularmente si se encuentran a presión.

Sílica gel.- La elaboración de la sílica gel consiste en la neutralización de silicato de sodio por medio de un mineral ácido diluido. El gel que se obtiene se lava para retirar las sales formadas en la reacción de neutralización y posteriormente se somete a un proceso de tostado. Su principal aplicación es el secado, aunque también se usa para desulfurizar y purificar.

Tamices moleculares.- Los tamices moleculares son esencialmente zeolitas deshidratadas, como

silicatos de aluminio, en los que los átomos se acomodan siguiendo un patrón definido. En el interior de la estructura se forman conductos relativamente grandes a manera de panal de abeja, donde cada conducto se comunica con otros seis conductos adyacentes por medio de aperturas o poros. La estructura de estos materiales se puede seleccionar con la finalidad de adsorber ciertas sustancias dependiendo de su tamaño molecular.

El proceso de adsorción consta de tres etapas: primero el flujo debe estar en contacto con el adsorbente, para que el adsorbato sea adsorbido; luego se retira el fluido no adsorbido del adsorbente-adsorbato y finalmente, se debe regenerar el adsorbente o desocharlo y restituirlo con material fresco.

Los equipos que se emplean en las operaciones de adsorción, por la manera en que manejan el adsorbente, se clasifican en: lecho fijo o estacionario, lecho móvil y lecho fluidizado.

Una de las configuraciones más comunes para los adsorbedores de lecho fijo, es la de colocar dos equipos de adsorción en paralelo. Este arreglo permite regenerar una unidad mientras la otra sigue operando o también se pueden operar las dos unidades al mismo tiempo para aumentar la capacidad de adsorción.

Las unidades de lecho móvil cuentan con un sistema mecánico que hace girar el adsorbente, de tal manera que la mitad opera normalmente mientras la otra se regenera. Esta configuración ofrece una mayor eficiencia en el uso del carbón activado que la de los equipos de lecho fijo, pues permite que se reduzcan las dimensiones del equipo y las caldas de presión. La desventaja de estos equipos es el desgaste de las piezas móviles y de los empaques.

En los equipos de lecho fluidizado, el carbón es recirculado continuamente en el ciclo adsorción-regeneración. El carbón saturado que llega a la parte inferior del equipo es elevado hacia la zona de regeneración, en donde entra en contacto con vapor a contraflujo. El carbón regenerado se introduce al adsorbedor en donde se fluidiza con el flujo de gas que entra a contraflujo por la parte inferior del equipo. Se requieren velocidades de 1.2 m/s para fluidizar el lecho. Las corrientes a contraflujo elevan la eficiencia tanto de la adsorción como de la regeneración

(Theodore, 1988).

En este sistema (lecho fluidizado) se reduce el consumo de vapor de regeneración, ya que el carbón que llega a la cámara de regeneración se encuentra saturado. Los fabricantes de estos equipos recomiendan efectuar operaciones de filtrado a la salida, ya que el gas arrastra ciertas cantidades de adsorbente y la tasa de impactación de partículas sólidas de la corriente gaseosa con las partículas del adsorbente es muy baja.

En todos los procesos de adsorción se requiere de equipos auxiliares: un generador de vapor, un condensador, decantador columna de destilación, un ventilador, ductos y tuberías. Es importante una buena selección de estos equipos para una operación eficiente de los adsorbedores.

Dentro de los parámetros de operación de estos equipos son importantes el tiempo y la capacidad de operación. El tiempo de operación es el tiempo que tarda el adsorbente en llegar casi al punto de saturación. Este tiempo decrece al reducir la altura del lecho, incrementar el tamaño de las partículas del adsorbente, incrementar el flujo de gas o al aumentar la concentración inicial del contaminante. Con la siguiente ecuación podemos estimar el tiempo de operación (t_b):

$$t_b = \left(\frac{A}{VC_o} \right) (X_S L_S + X_Z L_Z) \quad (3.7)$$

donde:

A = área del lecho de adsorción [m²]

V = flujo volumétrico de la corriente [m³/s]

C_o = concentración inicial del contaminante [kg/m³]

X = capacidad de adsorción por unidad de volumen [Kg/m³]

L = longitud del lecho [m]

ST se refiere a la zona saturada

Z se refiere a la zona de adsorción

Y la capacidad de operación del equipo se determina por medio de la ecuación (Wark, 1992):

$$WC = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{CAPI} \right)} \quad (3.8)$$

donde:

WC = capacidad de operación [kg/m³]

n = número de unidades de adsorción

w_i = fracción másica de i en n unidades de adsorción

CAPI = capacidad de equilibrio de la unidad i [kg/m³]

Una vez que se han determinado el tiempo de operación y la capacidad de operación, se deben considerar los siguientes factores de diseño:

a) El tamaño de las partículas (d), de adsorbente afecta principalmente la caída de presión y la tasa de adsorción del equipo. La presión decrece si las partículas son esferas de tamaño uniforme. La caída de presión varía con el número de Reynolds. El índice de transferencia de masa y la tasa interna de adsorción son inversamente proporcionales a d^{3/2} y d², respectivamente. Considerando fijos los demás parámetros, la caída de presión aumenta al disminuir el tamaño, pero se obtiene una mejor adsorción.

b) La profundidad del lecho de adsorción o zona de transferencia de masa, ZTM, se diseña para ser mayor que la zona de adsorción. La zona de adsorción es la porción del lecho que se encuentra realizando, en un momento determinado, el fenómeno de adsorción. Cualquier múltiplo de la profundidad mínima requerida aumenta considerablemente la capacidad del equipo.

c) La velocidad del flujo estará en función del adsorbente y se obtiene de datos que proporciona el fabricante. La velocidad es proporcional a la profundidad del lecho: a mayor velocidad, el lecho deberá ser más profundo.

d) Un aumento en la temperatura del gas produce una reducción en la capacidad de adsorción.

Cuando el flujo de gas se encuentra en la zona de adsorción, absorbe calor generado por la adsorción y cuando sale de la zona de adsorción, le cede calor al adsorbente.

e) Existe una correlación directa entre la concentración de adsorbato y la capacidad de adsorción. La ZTM es inversamente proporcional a la concentración del contaminante. Cuando se manejan gases combustibles es necesario que la concentración de éstos se encuentre siempre por debajo de su límite inferior de explosividad. Este valor es la mínima concentración de un vapor que permitirá la propagación hacia arriba de una flama dentro de un tubo cilíndrico.

3.2.2 Absorción

La absorción es una operación que involucra transferencia de masa entre un componente gaseoso soluble y un solvente líquido en un dispositivo que produce un contacto adecuado entre el gas y el líquido. La fuerza que ocasiona la absorción es la diferencia de la presión parcial del gas soluble en la mezcla de gases y su presión de vapor, justo sobre la superficie del líquido (interfase líquido-gas).

Es necesario emplear un líquido solvente en el cual el gas sea soluble. El agua, por sí sola, es bastante eficiente para remover algunos gases ácidos como el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido fluorhídrico (HF), así como el amoníaco (NH₃) que es un gas básico. Otros gases con menor índice de solubilidad como dióxido de azufre (SO₂), cloro (Cl₂) y ácido sulfhídrico (H₂S), se absorben con una solución diluida de hidróxido de sodio (NaOH). Los equipos de absorción deben tener sistemas adecuados para producir pequeñas gotas o paredes delgadas de solvente, con la finalidad de aumentar el área de contacto e incrementar la transferencia de masa.

Estos equipos se conocen como torres de absorción y se clasifican en torres empacadas y en torres de platos o charolas. De éstas, las torres empacadas son las más usadas en la absorción de contaminantes gaseosos.

Las torres empacadas por lo general son columnas verticales, en las que continuamente se produce un contacto directo entre las fases líquida y gaseosa. Estas columnas se llenan con un material especial de empaque, que genera grandes áreas de contacto, y sobre el que se esparce un líquido que se inyecta desde la parte superior del equipo.

Los principales tipos de empaques son: los anillos Rasching que son baratos aunque menos eficientes que otros; los anillos Pall, que producen una caída de presión de menos de la mitad que los Rasching; los estribos Berl, que son costosos, más eficientes que los anillos Rasching aunque más frágiles, y los estribos Intalox, que son los más eficientes aunque también se rompen fácilmente (Theodore, 1988).

En la mayoría de los equipos, el gas entra a contraflujo por la parte inferior del equipo, pasando entre el empaque por donde baja esparcido el líquido solvente. Como la concentración de soluto (contaminante) es menor a medida que el gas sube por la columna, siempre va a existir líquido fresco en las partes altas de los equipos. Esto produce un alto coeficiente de difusión dentro del equipo.

En ocasiones muy especiales se utilizan equipos con flujo paralelo; por ejemplo, en los casos en que se requiera de un flujo de solvente muy grande, cuando los gases sean muy solubles o cuando se retiren vapores ácidos con sustancias cáusticas y los coeficientes de difusión son muy altos. La ventaja de esta configuración es que el diámetro del equipo puede ser menor, ya que no existe peligro de inundación y la caída de presión también es menor.

Las torres empacadas también operan con flujos cruzados, en donde el gas circula en dirección horizontal y el líquido se introduce por la parte superior del equipo. Esta configuración presenta ciertas ventajas sobre los equipos a contraflujo, ya que permite grandes flujos volumétricos de gas sin producir altas caídas de presión.

Para definir la altura de la torre (Z), debemos conocer el número necesario de unidades de transferencia, así como la altura de cada una de ellas. Generalmente la altura de cada unidad de

transferencia es recomendada por el fabricante para cada caso en particular o se obtiene mediante correlaciones empíricas en las que intervienen variables que involucran concentraciones molares del contaminante tanto en la fase líquida como en la gaseosa (Wark, 1992).

Los principales problemas que ocurren en la operación de estos equipos son el deterioro del empaque, así como las incrustaciones que producen obstrucciones en tuberías, boquillas y en el mismo empaque, y que reducen la eficiencia.

3.2.3 Incineración

La incineración o combustión auxiliar es un proceso que se utiliza para remover contaminantes combustibles de una corriente gaseosa. Estos contaminantes pueden ser gases o vapores. Este sistema se emplea cuando el flujo de gases es alto pero la concentración de contaminantes es baja.

Algunas industrias, como las refineras, producen grandes cantidades de gases residuales altamente combustibles y materiales orgánicos que serían peligrosos si se trataran de otra manera. Por lo general, el método más seguro de control del efluente es mediante la combustión en antorchas, mecheros o quemadores elevados.

Los factores principales en el diseño de un proceso de incineración son: la composición química de los contaminantes y su concentración, la temperatura del gas residual a la entrada, el gasto volumétrico del gas residual y los niveles permisibles de emisión para los contaminantes. Los tres tipos básicos de incineración se clasifican como 1) de flama directa, 2) térmico y 3) catalítico.

1) La incineración por flama directa, como su nombre lo indica, es un método por el cual los gases residuales se queman directamente en una flama, con o sin la adición de combustible adicional. Lo anterior depende de si la concentración del contaminante se encuentra dentro de

los límites de flamabilidad. En el caso de tener que agregar combustible adicional (generalmente gas natural), por razones económicas, se recomienda emplear este método sólo cuando el poder calorífico de los contaminantes represente más de 50% del poder calorífico requerido para la combustión.

Uno de los principales problemas que se presenta en los quemadores de flama directa es la generación de óxidos de nitrógeno, ya que no se puede controlar la temperatura de combustión.

Las antorchas (quemador flame) son un ejemplo de incineración por flama directa, que se utiliza en las plantas petroquímicas y refinerías. Se trata sencillamente de una cámara de combustión abierta en su extremo y dirigida verticalmente hacia arriba. La antorcha se usa principalmente para combustibles gaseosos que no se pueden eliminar convenientemente por otros métodos. Comúnmente se emplea un piloto para asegurar la combustión continua. Estos equipos son diseñados para que la flama se mantenga encendida a diferentes gastos de gas, velocidades de viento y composición de combustibles.

Uno de los problemas más comunes que presentan las antorchas es la generación de humos producidos por una relación en el contenido de carbón mayor a 1/3 con respecto a los otros elementos que constituyen el contaminante. Este problema se soluciona con la inyección de vapor de agua en la zona de la flama; dicha inyección incrementa eficazmente la turbulencia en la región ardiente, y proporciona un mejor contacto entre el oxígeno, el carbono y el combustible presentes en la zona. La inyección de vapor de agua reduce tanto la temperatura como la longitud de la flama, lo que le ayuda a estabilizarse con un viento violento (Jones, 1973).

2) La incineración térmica se emplea cuando la concentración de los contaminantes combustibles es tan baja que sólo suministra una pequeña fracción del poder calorífico requerido por una flama directa. Por lo general el flujo de gases se precalienta en un intercambiador de calor y posteriormente se pasan por la zona de alta temperatura. De esta manera los combustibles en la corriente de gas residual se llevan por encima de sus temperaturas de autoencendido y se queman con el oxígeno presente en la corriente contaminada. En algunos casos se requiere agregar aire

a la corriente de gases para tener la cantidad de oxígeno requerida.

Las variables más importantes en el diseño de los incineradores térmicos son la temperatura, la turbulencia y el tiempo que permanecen los gases dentro del equipo. La temperatura debe mantenerse lo más baja posible, pues esto representa un ahorro en el consumo de combustible. La turbulencia es uno de los factores más fáciles y baratos de aumentar, ya que con un diseño adecuado del equipo se pueden obtener niveles altos de turbulencia. El tiempo de permanencia del gas dentro del equipo está relacionado directamente con el tamaño del equipo, y éste con el costo, por lo que se tiene que encontrar un punto de equilibrio entre el costo y el tiempo de estancia de los gases.

3) La incineración catalítica, al igual que la térmica, se emplea cuando los combustibles dentro de un gas residual tienen una concentración muy baja. Un catalizador acelera la tasa de reacción química, de manera que el tiempo de estancia de los gases dentro de estos equipos es menor al de los incineradores térmicos. Los quemadores auxiliares térmicos pueden requerir de 20 a 50 veces el tiempo de residencia que requiere una unidad catalítica. La ventaja principal que presentan estos equipos es la baja temperatura a la que operan, ya que el catalizador permite que se lleven a cabo las reacciones de oxidación a temperaturas más bajas que en la incineración térmica.

Los rangos de temperatura de operación de estos equipos se encuentran entre los 320° y 540°C. La eficiencia de combustión catalítica es de 95 a 98 por ciento, de modo que los gases de escape están constituidos principalmente por dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno.

Los materiales catalíticos empleados para combustión deben cumplir con ciertos requisitos: su precio debe ser relativamente bajo, de larga duración, capaces de funcionar a la temperatura requerida y susceptibles de ser moldeados en una variedad de perfiles. Independientemente de la configuración del lecho, este debe proveer el área requerida de superficie catalítica y mantener una densidad constante a temperaturas altas. La matriz catalítica debe producir una calda de presión relativamente baja y durabilidad estructural (Theodore, 1988).

El costo de operación de los incineradores catalíticos es relativamente bajo, con excepción del costo del catalizador. En algunos casos se tendrán que eliminar del gas residual las partículas en suspensión, ya que la deposición de éstas sobre el catalizador reduce el área superficial y baja la eficiencia del equipo. La vida de operación normal de un catalizador sin problemas de deposición de partículas será de 3 a 5 años.

3.3 Estrategias de control

La tecnología de control de contaminantes sería inútil si se producen efectos colaterales que incrementen el deterioro ambiental. El control de contaminantes atmosféricos se debe considerar tanto en términos de los sistemas tecnológicos (equipos y procesos) como de las consecuencias ambientales, tales como el tratamiento y manejo de los contaminantes recolectados.

Las estrategias de control para reducir el impacto ambiental se enfoca hacia cinco alternativas que tienen como propósito reducir y/o eliminar las emisiones de contaminantes:

- i. eliminación total o parcial de la operación
- ii. modificación de la operación
- iii. reubicación de la operación
- iv. aplicación de los sistemas de control apropiados
- v. una combinación de los puntos anteriores

A causa de los elevados costos que genera la implementación de sistemas de control, los ingenieros tienden a modificar los procesos para reducir al máximo los problemas de contaminación a partir de la fuente de emisión. Esto implica evaluar técnicas alternativas de manufactura y producción, sustituir materias primas, e implementar mejores sistemas de control dentro de los procesos. Desafortunadamente en algunos casos se debe considerar la opción de usar un sistema de control de contaminantes. En vista de los altos costos, debe de realizarse una correcta selección de los equipos, así como una correcta evaluación de los gastos de operación

para que los equipos operen continuamente de manera eficiente.

Existe una gran cantidad de factores que deben analizarse antes de seleccionar un equipo de control; en general se pueden clasificar en tres categorías: ambientales, ingenieriles y económicas. Pero, además de realizar la selección adecuada de los equipos de control es indispensable elaborar "estrategias" que permitan atacar a fondo el problema de la contaminación.

Una de las principales medidas que deben tomarse para reducir las emisiones contaminantes es fomentar en la sociedad una cultura de ahorro energético, por medio de la cual se tendrá un aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos. Acciones simples como apagar las luces que no estén en uso, compartir y reducir el uso del automóvil, mantener en buen estado cualquier tipo de motor de combustión interna, entre muchas otras, servirán para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Por otro lado, se tienen que fomentar las investigaciones y el desarrollo de proyectos en disciplinas como la energía solar, la mareomotriz, la eólica, la geotérmica y la nuclear.

Un ejemplo del desarrollo de nuevas tecnologías es el Proyecto Tonatiuh, en el que un grupo de estudiantes de diversas carreras y universidades construimos el primer automóvil solar mexicano de carreras. La finalidad de este proyecto es demostrar que el diseño de alta eficiencia nos permite utilizar pequeñas cantidades de energía limpia y renovable para el transporte. Sabemos de antemano que los automóviles solares por el momento no son una alternativa viable, pero los resultados obtenidos en este proyecto servirán para el desarrollo de la tecnología fotovoltaica, así como de las baterías necesarias.

Además, la simulación y análisis de los impactos ambientales que producirá una nueva industria son de suma importancia, pues permiten desarrollar las medidas adecuadas para la disminución de los efectos adversos al medio ambiente antes de que se realice el proyecto en cuestión.

Finalmente, es indispensable que el personal dentro de las industrias cuente con la capacitación

adecuada en materia ambiental, de tal forma que tomen conciencia de los efectos que producen acciones como el derrame accidental de combustible, la existencia de fugas en equipos y tuberías, la evaporación de hidrocarburos por tanques mal cerrados, etcétera.

Es imposible reducir eficientemente la producción de contaminantes si el uso de equipo de control no es acompañado por otras acciones paralelas.

4. GESTIÓN INFORMÁTICA

Una de las primeras acciones que deben llevarse a cabo para atacar los problemas de contaminación es perfeccionar los sistemas de información en materia ambiental con que cuentan las instituciones y empresas. Estos sistemas de información deben tener como objetivo mostrar datos referentes a ingeniería ambiental para brindar un panorama amplio a las personas encargadas de tomar decisiones sobre las políticas ambientales a seguir.

Una definición de información es: "el conjunto de datos que se han puesto en un contexto útil para un receptor que los usa en la toma de decisiones". La información involucra la emisión y recepción de conocimiento, revela alternativas adicionales, influenciando y motivando a los individuos para que actúen.

En la actualidad, los flujos de información que existen son tan grandes que pueden llegar a ser un obstáculo, introduciendo al usuario en un ambiente contaminado de reportes e información incorrecta. La información, para considerarse de calidad, tiene que cumplir con las siguientes características: debe ser exacta, oportuna y relevante.

Exactitud significa que la información sea completa, clara y no que no contenga errores. En las organizaciones, los empleados de niveles medios alteran la información para obtener beneficios propios de las decisiones que toman sus jefes a partir de esa información; para solucionar este problema, es necesario contratar empresas independientes para que produzcan y diseminen adecuadamente la información.

La información debe ser oportuna. Ésta es la segunda característica, que se cumple cuando la información se encuentra disponible en el momento y en el lugar en que el usuario la requiere.

La tercera característica de la información es la relevancia; es decir, que responda específicamente las preguntas del receptor. Por ejemplo, si un piloto de avión desea saber a que hora llegará a su destino final deberá conocer su posición exacta y la velocidad promedio que

mantendrá durante el resto del viaje, en esos momentos datos como la cantidad de refrescos que hay en el avión no es relevante.

El término informática surge de la fusión de dos palabras: *información* y *automática*, es decir, se refiere a la automatización que permite que la información se encuentre disponible y sea accesible a través de sistemas computacionales. De esta manera, la gestión informática se refiere al proceso de obtención de la información requerida para una adecuada toma de decisiones.

Para que lo anterior pueda ser posible se requiere de un sistema de información en el cual se encuentren todas las respuestas a las preguntas del analista.

4.1 Sistemas de Información

En cualquier organización, la información de calidad es un recurso muy valioso y la manera de obtenerla es por medio de un sistema de información.

Un sistema de información consta de bloques, y su calidad después de la construcción de estos bloques y de los factores que influyen en dicha construcción. Los bloques de un sistema son: entrada, modelos, salida, tecnología, bases de datos y controles. La adecuada comunicación entre estos bloques da las bases para desarrollar un sistema de información (García, J., 1994).

Bloque de entrada.- La entrada consiste en la incorporación de todos los datos que se requieren en el sistema. La forma de introducir los datos puede variar desde un teclado hasta un lector láser.

Bloque de modelos.- Los modelos se encargan de manipular la información que se encuentra almacenada dentro del sistema, con la finalidad de obtener los resultados de una consulta. Existen modelos lógicos, matemáticos y/o metodológicos. Un modelo lógico se encarga de analizar

lógicamente los datos de una consulta y dar una respuesta. En cuanto a los modelos matemáticos, pueden ser tan sencillos como efectuar una resta o tan complicados como los modelos diferenciales de dispersión de contaminantes. Los modelos metodológicos toman una entrada para modificar un archivo.

Bloque de salida.- Al realizar una consulta a un sistema de información, la respuesta constituye la salida del sistema. Esta respuesta es información clasificada y con una cierta calidad. El nivel de calidad de esta salida está en función de la calidad de información de entrada y los modelos usados para producirla.

Bloque tecnológico.- Dentro de este bloque se encuentran todas las herramientas que nos permitirán crear y trabajar con un sistema de información. Las tres herramientas más importantes de este bloque son: las técnicas, el *hardware* y el *software*. Los aspectos técnicos son las personas encargadas de realizar los programas de cómputo y de efectuar todas las instalaciones técnicas requeridas para el sistema. El *hardware* está compuesto por la unidad central de proceso, monitores, teclados, unidades de disco duro, impresoras, etc. El *software* contiene programas que hacen que trabaje el *hardware* y le indican cómo manejar los modelos.

Bloque de bases de datos.- En la base de datos se almacenan todos los datos necesarios para efectuar una consulta y obtener una respuesta. Este bloque tiene mucho que ver con el *software* del sistema y con los modelos lógicos, ya que nos indica cómo efectuar una consulta, cómo asociar los datos y cómo recuperarlos.

Bloque de control.- Los bloques de control se crean para dar seguridad al sistema de información. Los sistemas son vulnerables de ser modificados voluntaria o involuntariamente, por lo que se deben crear los mecanismos adecuados para evitar modificaciones no deseadas. Por ejemplo, para la actualización de una base de datos se debe dar acceso únicamente a personal autorizado.

Por otro lado se deben considerar los factores que afectan la construcción del sistema de

información, a estos factores se les conoce como fuerzas de diseño. Las principales son ocho: integración, interfaz usuario/sistema, fuerzas competidoras, calidad y capacidad en el uso de la información, requerimientos del sistema, requerimientos del procesamiento de datos, requerimientos costo/efectividad y requerimientos de factibilidad. A continuación se mencionarán las características de estas fuerzas (García, J., 1994).

1) *Integración*.- Los sistemas de información deben de ser integrales, es decir deben abarcar aspectos tanto administrativos como técnicos, ya que estos elementos están muy ligados entre sí.

2) *Interfaz usuario/sistema*.- La finalidad de todo sistema de información es la de interactuar con los usuarios, por lo que deben de eliminarse los obstáculos o interferencias externas que afectan el flujo de información entre el sistema y el usuario.

3) *Fuerzas competidoras*.- El mundo es cada vez más competitivo, por lo que el acceso a información de calidad debe ser oportuno para poder competir dentro del mercado actual de la informática.

4) *Calidad y capacidad en el uso de la información*.- En este sentido deben identificarse las necesidades específicas de cada usuario para proveer la información en forma relevante, oportuna y exacta.

5) *Requerimientos del sistema*.- Un sistema de información debe ser confiable, es decir, debe proporcionar información de calidad; además de ser flexible para poder actualizarse y acoplarse a los cambios de necesidades del usuario.

6) *Requerimientos del procesamiento de datos*.- Las necesidades del procesamiento de datos tienen que ver con el trabajo detallado del sistema y están divididas en cuatro categorías: el volumen, que se refiere a la cantidad de datos que se tienen que procesar en un periodo de

tiempo dado, para cumplir con la meta de información; la complejidad, referente al número de operaciones de datos interrelacionados que deben efectuarse para cumplir con los objetivos; las restricciones de tiempo, que marcan la pauta de un intervalo temporal aceptable en el que se deben obtener los resultados, y las demandas computacionales, que son una combinación única de volumen, complejidad y restricciones de tiempo para un requerimiento determinado de información.

7) *Requerimientos costo/efectividad.*- Un sistema de información ofrece recursos con los que se pueden obtener ciertos beneficios, por lo que es necesario identificar los costos y los beneficios del sistema antes de invertir.

8) *Requerimientos de factibilidad.*- Existen cinco tipos de factibilidad que debe reunir un sistema de información: técnica, económica, legal, operacional y temporal.

En la actualidad, es posible encontrar un gran número de sistemas de información manejados por computadoras. Estos sistemas de información pueden ser de dos tipos:

Locales.- Son sistemas desarrollados para que el usuario disponga de la información en el mismo lugar físico donde está realizando la consulta. Dentro de éstos se incluyen los sistemas almacenados en CD-ROM (discos compactos), en cintas magnéticas o en la memoria principal de la computadora.

Remotos.- Son aquellos que permiten el acceso a centros de información ubicados a larga distancia de la terminal de consulta. Los centros de información a los que puede accederse, por ejemplo vía Internet, son grandes bancos de memoria con información muy específica.

Con base en el desarrollo de las nuevas tecnologías computacionales, surgieron los sistemas de información geográfica (SIG), los cuales trabajan con información georreferenciada. Por ejemplo, un modelo de dispersión de contaminantes trabajando con un SIG combina las condiciones de

relieve del suelo, viento, temperaturas, etc., con datos referentes a la emisión de contaminantes para simular las condiciones de dispersión de la manera más real posible.

Con las nuevas políticas ecológicas de Pemex se han desarrollado proyectos muy interesantes en materia de control ambiental y evaluación de riesgos. Tal es el caso del proyecto a cargo del ingeniero Carlos Ruiz de Velasco que realiza la Unidad de Planeación de la Dirección Corporativa de Administración (DCA) apoyándose en la plataforma que ofrece el sistema de información geográfica Sicori (Sistema Corporativo de Información).

El Sicori fue creado a finales de 1991 por la DCA de Pemex, con el objetivo de diseñar y construir una infraestructura computacional para capturar y digitalizar la información geográfica de la República Mexicana, dando énfasis a las regiones en las que se encuentran las instalaciones de Pemex.

El sistema desarrollado por el ingeniero Ruiz de Velasco (Ruiz de Velasco, 1995), denominado UPMDC_2 (Unidad de Planeación Modelos de Dispersión de Contaminantes 2ª versión) consiste en el uso de modelos matemáticos para la dispersión de contaminantes atmosféricos que, aunado al poder de despliegue gráfico georreferenciado, a las aplicaciones de análisis y a la base de datos del Sicori, produce una poderosa herramienta para la planeación.

4.2 Bases de datos

Una base de datos se forma por los siguientes componentes: información, *hardware*, *software* y usuarios. En lo que respecta a la información, ésta es integrada y compartida; es integrada porque se compone de varias tablas para facilitar el manejo de los datos y se dice compartida porque diversos usuarios pueden consultar las partes que les interese. El *hardware* que se requiere para el manejo de bases de datos se compone de las unidades centrales de proceso (CPU) las cuales pueden ser unidades personales, servidores o terminales de red, de monitores, teclados y de

dispositivos de almacenamiento de la información como discos duros, discos flexibles, etc. Actualmente, el *software* se está desarrollando de manera impresionante, brindando al usuario paquetes, conocidos como DBMS (Data Base Management Systems), que facilitan y reducen, por medio de funciones gráficas, la programación que se requiere para el manejo de la información.

Los usuarios se clasifican en tres niveles: el primer nivel corresponde al programador de aplicaciones que es quien se dedica a la creación del *software*; en el segundo nivel se encuentran los usuarios propiamente dichos que son quienes realizan las consultas pertinentes a la información, y finalmente, ésta el administrador de la base de datos, que es la persona que se encarga de crear la estructura de ésta e introduce, borra y modifica la información existente.

Para contar con una base de datos eficiente, ésta se debe diseñar siguiendo algunos lineamientos conocidos como formas normales, las cuales nos ayudan a evitar que se produzcan inconsistencias en la información y evitar errores al efectuar alguna consulta.

Una base de datos se compone de una o más tablas en las que se ordena la información en columnas y renglones. Las columnas se denominan campos, en los cuales existe información de un mismo tipo, mientras los renglones combinan elementos de los campos de la tabla y se les llama registros. Para aclarar estos conceptos pensemos en una tabla que contenga una agenda telefónica, en la primera columna se colocará el nombre de la persona, en la segunda el o los apellidos, en la tercera el número telefónico y posteriormente se colocará una última columna con la dirección correspondiente. En la tabla 4.1 se ejemplifica lo anterior.

De esta manera al ir aumentando el número de personas en nuestra lista telefónica, ésta crecerá hacia abajo y no hacia los lados.

Es importante definir cuáles son las necesidades de los usuarios de una base de datos; por ejemplo, en el caso de la agenda telefónica lo que le interesa al usuario es tener a la mano el teléfono y/o la dirección de una persona en particular. Para que la base de datos pueda responder

correctamente a una consulta de este tipo se deben definir los "campos llave". Estos campos se pueden definir como la variable independiente y todos los demás campos son variables dependientes de ellos. Dicho de otra manera, en la tabla anterior los campos llave son el "nombre" y "apellido", ya que los campos "teléfono" y "dirección" dependen únicamente de la combinación de los campos "nombre" y "apellido". La llave debe ser la combinación de los dos campos ya que si la llave es únicamente el apellido, se generaría una incongruencia cuando pregunte por el teléfono de Jorge Díaz, ya que también existen los datos de Carlos Díaz y la computadora no sabría distinguirlos.

Tabla 4.1 Ejemplo de una base de datos

NOMBRE	APELLIDO	TELÉFONO	DIRECCIÓN
Luis	González	568-7988	Av. Revolución #16
Felipe	Muñoz	598-7636	Moras #45
Carlos	Díaz	654-4697	Fuentes #567
Jorge	Díaz	569-3329	Av. de la Paz #123

Para que una tabla se considere ordenada, los registros dentro de ella deben ser únicos. Si se llegara a dar el caso de dos personas con el mismo nombre y apellido paterno, se deberá agregar un tercer campo a la llave que sea "apellido materno".

Del análisis anterior surge la necesidad de establecer una metodología en el diseño de las tablas para evitar incongruencias y repeticiones innecesarias. Las formas normales de una tabla muestran los lineamientos a seguir al estructurar la información.

La primera forma normal de una relación nos indica que el dominio de los elementos de una

tabla debe ser atómico, es decir, se debe emplear un solo campo para cada clasificación de información; por ejemplo, no se recomienda colocar en un solo campo el teléfono y la dirección o el nombre completo de la persona. Para necesidades más complejas que las de la agenda telefónica, es conveniente separar la dirección en campos más específicos como ciudad, código postal, delegación, estado y país, con la finalidad de hacer consultas más específicas como qué personas viven en determinada ciudad, etcétera.

Se dice que para que una relación se encuentre en segunda forma normal debe estar en primera forma normal y además no deben existir dependencia parcial, es decir, todos los elementos dentro de un mismo registro que se encuentren en campos que no sean llave, deben depender totalmente de la llave. Por ejemplo, en nuestra agenda telefónica tanto el teléfono como la dirección dependen completamente del nombre y apellido de la persona.

Una relación en tercera forma normal debe estar en segunda forma normal y además no deben existir dependencias transitivas. Esto quiere decir que a una persona dentro de la agenda telefónica no le corresponden dos teléfonos o dos direcciones. Suponiendo que una o varias personas tengan casa de campo, se deberán agregar a la tabla dos campos más: "teléfono de la casa de campo" y "dirección de la casa de campo", en los que se guardarán estos datos.

4.3 Base de datos para uso industrial

La descripción de la base de datos que se propone en este trabajo, corresponde a un sistema de información global de emisiones de contaminantes a la atmósfera para cualquier ramo industrial, para que a partir de esta información puedan seleccionarse los lineamientos para la creación de normas de emisión específicas, dependiendo de la industria y los equipos empleados.

En México, existen actualmente sólo cuatro normas que regulan la emisión de contaminantes a la atmósfera tomando en cuenta el tipo de industria (INE, Sedesol, 1994b):

NOM-039-ECOL-1993. Norma Oficial Mexicana que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico, en plantas productoras de ácido sulfúrico.

NOM-040-ECOL-1993. Norma Oficial Mexicana que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas, así como los requisitos de control de emisiones fugitivas, provenientes de las fuentes fijas dedicadas a la fabricación del cemento.

NOM-046-ECOL-1993. Norma Oficial Mexicana que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido de azufre, neblinas de trióxido de azufre y ácido sulfúrico, provenientes de procesos de producción de ácido dodecibencensulfónico en fuentes fijas.

NOM-085-ECOL-1994. Norma Oficial Mexicana para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión (*Diario Oficial*, 1994).

Para un control estricto de las emisiones de contaminantes en la industria, se requieren normas más específicas.

Los pasos a seguir para la creación de una base de datos de emisiones a la atmósfera son: 1) realizar un estudio de los procesos y equipos dentro de una industria en particular; 2) una vez realizado este estudio, deben seleccionarse los procesos y equipos que emiten contaminantes a la atmósfera, siendo éstos los de interés para el trabajo; 3) para la elaboración y diseño de las tablas de datos, debemos basarnos en las variables que intervienen para la aplicación de las normas de emisión, para la norma NOM-085-ECOL-1994 las variables son: la capacidad del

equipo, el tipo de combustible y la zona donde se encuentra la fuente. Como variable adicional se agregó la clase de equipo (únicamente de combustión interna). Estas variables, que se pueden denominar "independientes", serán los campos llave de cada tabla.

Para definir el número necesario de tablas y su contenido, de una base de datos, es necesario definir las respuestas que se quieren obtener del sistema.

Una de las herramientas más útiles en las bases de datos son las formas de salida, las cuales se emplean para mostrar la información, útil para el usuario, de una o varias tablas de manera clara, selectiva y ordenada. Existe información dentro de las tablas que no es del interés del usuario (como el número de referencia que sirve para relacionar una tabla con otra), por lo que se omite de las formas de salida.

En el siguiente capítulo referente a la industria petrolera se presenta la metodología recomendada para la creación de una base de datos de emisiones a la atmósfera y equipos de control.

5. EJEMPLO: INDUSTRIA PETROLERA

La industria petrolera en nuestro país es de vital importancia para el desarrollo económico, por lo que se espera un incremento en la actividad de este ramo industrial y, es por esto, que se deben enfatizar las medidas de control de emisiones contaminantes en esta industria.

Como ya se mencionó, debido a los alcances establecidos en esta tesis, los contaminantes que se analizarán se reducirán a los atmosféricos, sin olvidar que la contaminación del suelo, ruido y especialmente del agua son muy importantes para este ramo industrial.

Dentro de la industria petrolera podemos considerar tres grandes áreas: producción, refinación y comercialización. En estas áreas, los principales problemas de contaminación se encuentran dentro de la producción y refinación, aunque el área de comercialización también requiere de algunas acciones para el control de emisiones ambientales.

Dentro de la producción se encuentra la exploración, perforación, extracción y transportación del crudo a las refinerías. Uno de los principales problemas de contaminación que produce la industria petrolera puede ocurrir durante la transportación y es el derrame de crudo en el mar. Debido a las graves consecuencias de estos eventos, las técnicas y equipos empleados en la recuperación de petróleo, se perfeccionan y modernizan continuamente.

El principal problema de contaminación atmosférica es la evaporación de hidrocarburos en tanques de almacenamiento, tuberías y accesorios (válvulas, bombas, cople, etc.), así como en operaciones de carga a pipas y carros tanque, y la quema de gas residual. Recientemente, Pemex puso en marcha la instalación de sistemas de recuperación de vapores en todos los sistemas de almacenamiento, transporte y venta al público de gasolinas. Estos sistemas son dispositivos que regresan los vapores de los tanques de gasolina de los coches a los tanques de las gasolineras. Las pipas de distribución de combustible cuentan con un sistema que colecta los vapores y los lleva de regreso a las plantas de almacenamiento en donde se condensan para volverse a

distribuir. En la figura 5.1 se muestra un diagrama de este proceso (Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, 1994).

Por otro lado, la refinación cuenta con un gran número de procesos, aunque no todos son fuentes de contaminantes atmosféricos. En casi todos los procesos se producen sustancias contaminantes, pero no siempre se emiten a la atmósfera; además, existen varios procesos en los que las sustancias residuales son empleadas como materias primas para otros procesos de manera que no afectan el medio ambiente.

El control de emisiones contaminantes se puede realizar por medio de cambios en los procesos, con un buen sistema de mantenimiento o instalando equipos de control. Los mejores resultados se obtienen al combinar las acciones anteriores.

Cambios dentro del proceso pueden reducir la cantidad de emisiones contaminantes arrojadas a la atmósfera. Algunos ejemplos son: el mejoramiento en las operaciones de paro y arranque de los equipos y la transportación del producto por tuberías en vez de en pipas o carros tanque.

Un sistema de mantenimiento adecuado que incluya la capacitación de todos los empleados, es por lo general la mejor manera de reducir las emisiones de hidrocarburos por la existencia de fugas o durante la realización de muestreos.

5.1 *Procesos Industriales*

En esta sección mencionaré únicamente los procesos relacionados con la refinación del petróleo, ya que los procesos de extracción y comercialización presentan problemas de diferente índole a los alcances de esta tesis.

Dentro de las refinerías se cuenta con cuatro áreas fundamentales: separación, conversión, tratamiento y mezclado, y en cada una existen equipos auxiliares de operaciones industriales que pueden emitir contaminantes. Los procesos de cada área son:

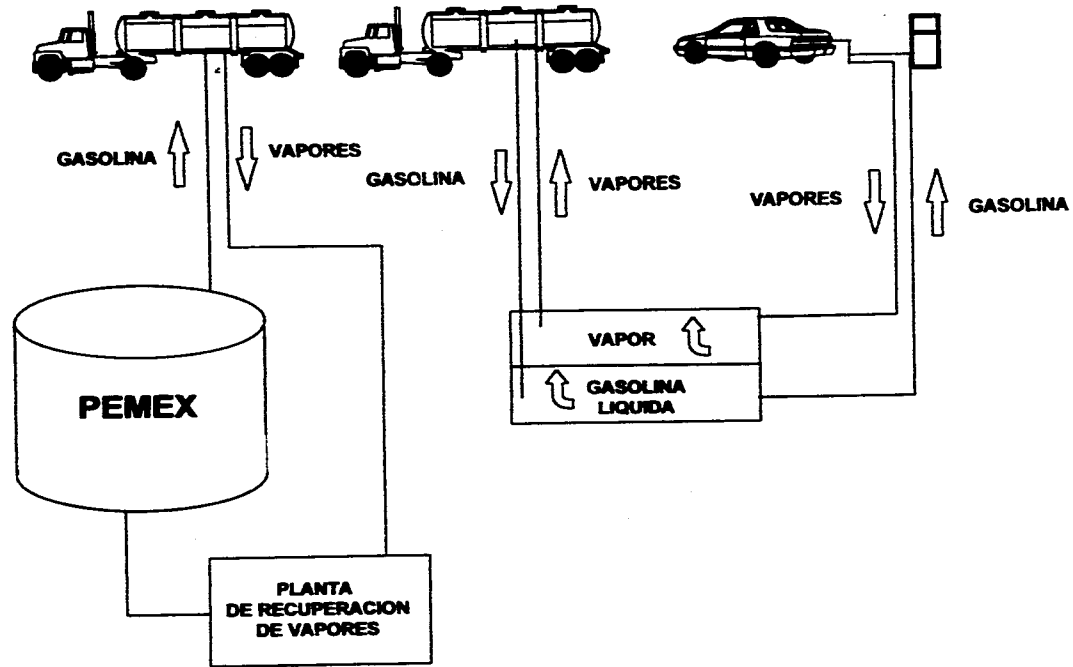


Fig. 5.1 Sistema de recuperación de vapores en los puntos de distribución de combustible.

1.- Separación

- a) Destilación atmosférica
- b) Destilación vacuométrica

2.- Conversión

- a) Coquizado
- b) *Cracking* catalítico
- c) *Hydrocracking*
- d) Reformado catalítico de naftas
- e) Alquilación
- f) Isomerización

3.- Tratamiento

- a) Endulzado y secado

4.- Mezclado

5.- Equipos auxiliares

- a) Generadores de vapor
- b) Calentadores de proceso
- c) Compresores de combustión interna
- d) Sistemas de control de descargas

En la figura 5.2 se muestra un diagrama de los principales procesos de una refinería. La separación es la primera etapa de refinación y generalmente se emplean la destilación atmosférica seguida de la vacuométrica. Los productos obtenidos servirán como materias primas para procesos posteriores.

En la conversión, el objetivo es obtener sustancias útiles a partir de compuestos residuales provenientes del área de separación. El tamaño y forma de las moléculas define el valor de los compuestos, por ejemplo, moléculas muy grandes dan como resultado asfaltos y combustóleos pesados, mientras que moléculas muy ligeras producen gases ligeros de bajo poder calorífico.

En el tratamiento de hidrocarburos se retiran sustancias indeseadas como azufre, mercaptanos, ácido sulfhídrico y agua, entre otros. Los principales procesos son el endulzado y el secado.

El mezclado se emplea para obtener productos finales, que cumplan con las especificaciones requeridas, al menor costo posible. En seguida se analizan estas áreas de refinación de manera más detallada.

5.1.1 Separación

La separación es el primer tratamiento que se hace al petróleo, en el que por medio de las torres de destilación, también llamadas torres fraccionadoras, se separan los componentes del petróleo. El principio físico de la destilación fraccionada es la diferencia entre los puntos de ebullición de los diferentes componentes del petróleo.

En el proceso de separación se hace pasar el crudo por una operación de desalinización, en la cual son removidas sales minerales y algunos sólidos suspendidos que producirían incrustaciones y corrosión en tuberías y equipos del proceso. El crudo desalinizado pasa por un precalentador para entrar a la torre de destilación atmosférica de donde se obtienen los siguientes productos: gas natural, gasolinas, kerosene, combustóleo ligero, combustóleo y sedimentos. Los sedimentos son transportados a una torre de destilación vacuométrica donde se obtienen bases para lubricantes, combustóleo, residuos para la fabricación de asfaltos e hidrocarburos no condensables que salen del condensador barométrico. En la figura 5.3 se muestra un diagrama de bloques de este proceso (Jones, 1973).

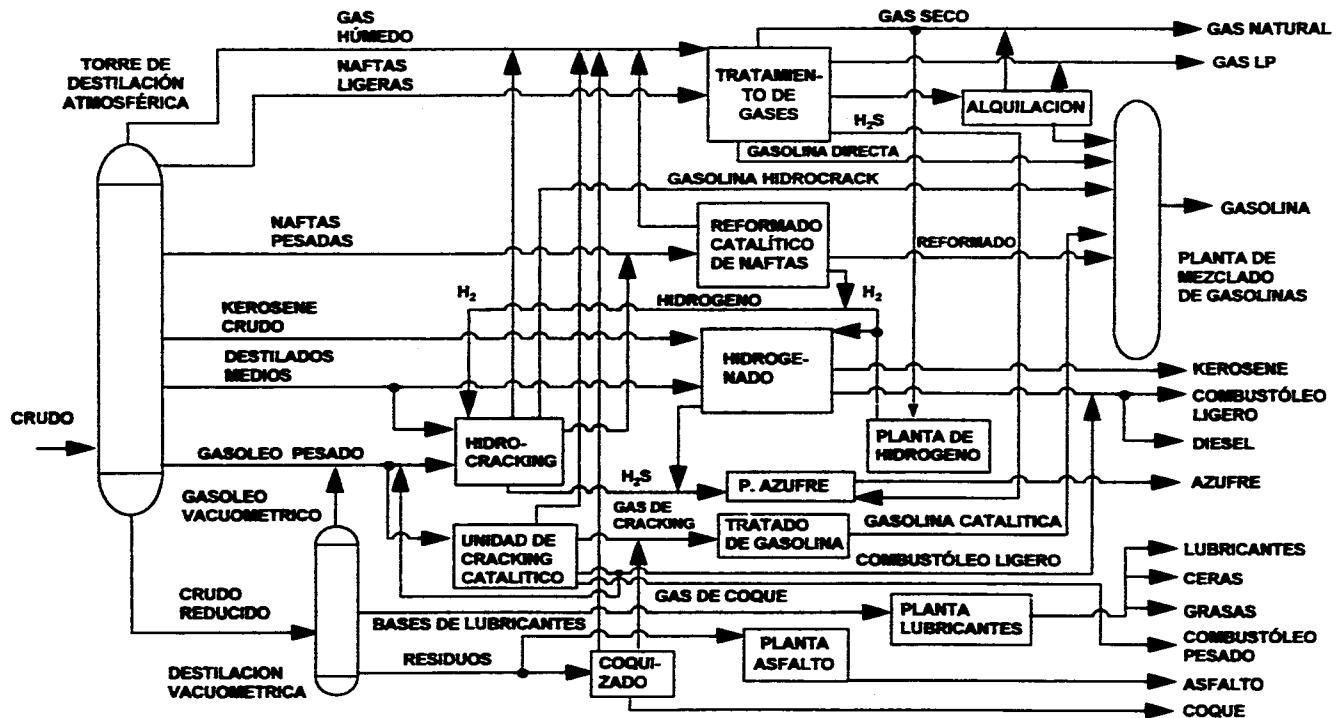


Fig. 5.2 Diagrama de bloques de una refinería petrolera.

Destilación atmosférica

Dentro de las torres de destilación, existe un número determinado de charolas fraccionadoras en donde se obtienen productos que serán tratados posteriormente en otros procesos.

En este proceso, las emisiones de contaminantes a la atmósfera se deben a los calentadores de proceso, en donde se emiten óxidos de azufre y de nitrógeno, partículas y monóxido de carbono, debiendo controlarse estas emisiones de equipos auxiliares.

Destilación vacuométrica

La destilación vacuométrica es una fuente importante de emisiones a la atmósfera. El principal problema lo representan los compuestos orgánicos volátiles (VOC's).

El petróleo crudo reducido que se obtiene de los residuos de la columna de destilación atmosférica, está compuesto por hidrocarburos con un elevado punto de ebullición. Para poder descomponer este crudo se requieren altas temperaturas y bajas presiones.

En la unidad de destilación vacuométrica, el crudo es calentado en un intercambiador de calor a temperaturas de 370 a 425 °C. Posteriormente se pasa a las cámaras de vacío, donde existen presiones de 350 a 1400 kgf/m² (1 atm = 10332 kgf/m²). En la columna de vacío, el crudo es separado en grupos con puntos de ebullición similares, por medio de evaporación y condensación. Las principales fracciones que se obtienen de este proceso son: bases para lubricantes, asfalto y aceites residuales. El vacío que se requiere en la columna de destilación generalmente se produce por medio de eyectores de vapor, aunque en ocasiones se emplean bombas de vacío.

La mayor fuente de emisiones contaminantes en la destilación vacuométrica está ligada a los eyectores de vapor o a las bombas de vacío. Gran parte de estos gases son recuperados en condensadores, pero existe una porción de hidrocarburos no condensables (aproximadamente 23

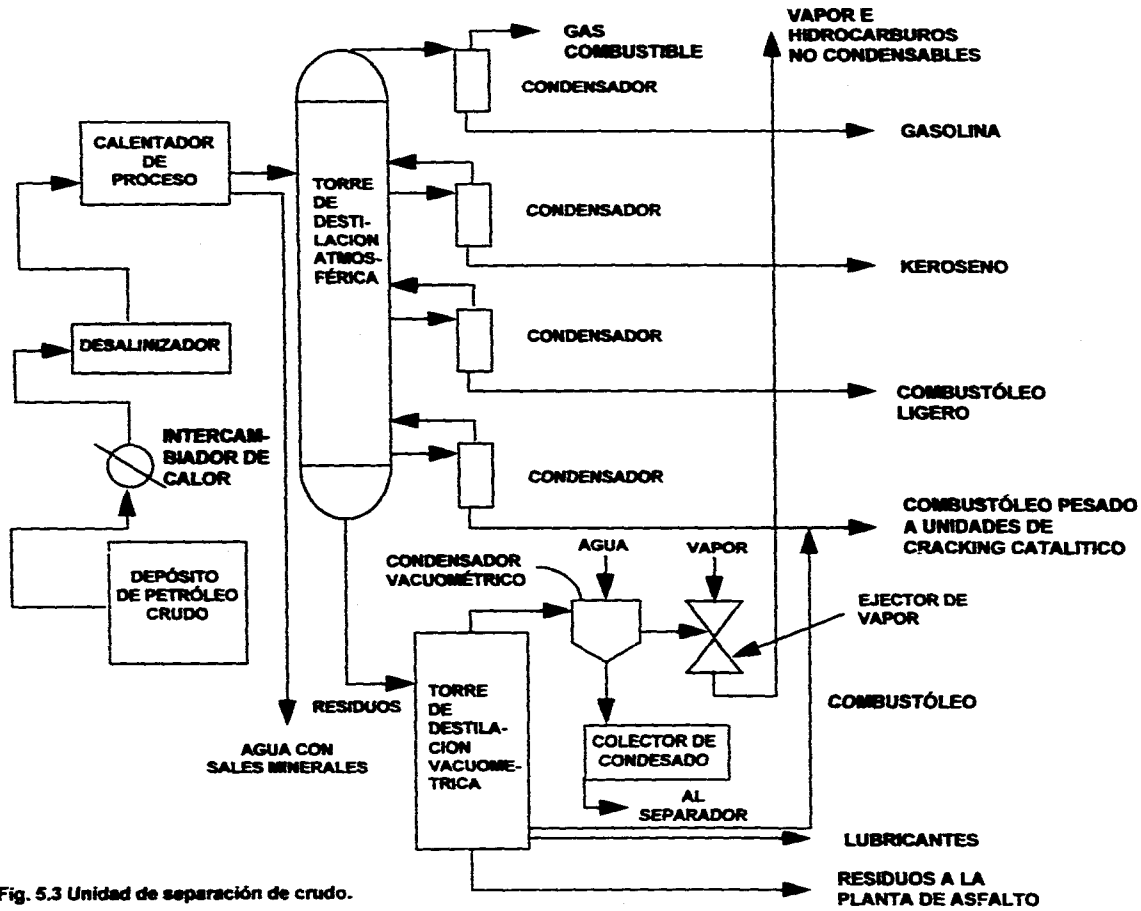


Fig. 5.3 Unidad de separación de crudo.

kg/1000 bbl de crudo procesado). Una segunda fuente de emisiones a la atmósfera dentro de este proceso son los calentadores o intercambiadores de calor, los cuales emiten gases de combustión. Las emisiones de hidrocarburos en fugas de equipos y tuberías se reducen considerablemente a causa de las bajas presiones de operación en este proceso.

La tecnología de control que se aplica a las emisiones de hidrocarburos consiste en oxidar los incondensables en incineradores o calderas. Este sistema de control reduce hasta en 99% las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC), pero contribuye a la emisión de productos de combustión.

5.1.2 Conversión

Al aumentar la demanda de gasolinas también aumentó la producción de combustóleo, hidrocarburos pesados, y otras sustancias ligeras que no eran muy útiles, por lo que se desarrollaron procesos de conversión para producir combustibles de alto octanaje o materias primas para otras industrias (Jones, 1973). Es así como surgen los procesos de conversión.

Los procesos de *cracking* catalítico, *hidrocracking* y coquizado se emplean para romper las moléculas de los hidrocarburos pesados y convertirlos en sustancias más ligeras. La polimerización y alquilación se emplean para unir moléculas muy pequeñas y convertirlas en moléculas de mayor peso molecular. El proceso de isomerización y el de reformación de naftas se emplean para reordenar la estructura de las moléculas con la finalidad de crear moléculas de mayor valor comercial.

Coquizado

Este proceso se emplea para convertir gasóleo residual en gasolinas de baja calidad y coque de petróleo. El coquizado retardado es el proceso más empleado en la actualidad, aunque se espera

que el coquizado fluido se empleará más en el futuro.

En el proceso de coquizado retardado, el gasóleo residual precalentado es alimentado por la parte inferior de un fraccionador, donde se despoja de las fracciones más ligeras. El resto de la alimentación es mezclado con material reciclado del tambor de coque y se calienta rápidamente en el calentador de la unidad de coquizado a una temperatura de 480 a 590°C. Los vapores del tambor se mandan a un fraccionador para ser recuperados.

En el coquizado fluido, el combustible residual es inyectado al interior del reactor, donde se realiza el cracking térmico y se produce coque y una amplia gama de productos gaseosos. Los gases se fraccionan posteriormente. El coque del reactor se manda a un calentador, donde se desvolatiliza. A los volátiles del calentador se les retiran las partículas y el azufre, para dar lugar a un gas combustible bajo en azufre y libre de partículas. El coque restante es mandado a un gasificador, donde 95% del coque del reactor es gasificado a altas temperaturas con vapor y aire u oxígeno. Los productos gaseosos y el coque del gasificador se mandan al calentador para suministrar calor para la desvolatilización.

Las emisiones a la atmósfera generadas en este proceso constan de: partículas de coque, gases de combustión de los calentadores de proceso y fugas. Las emisiones de los calentadores y las descargas fugitivas, de gran importancia por las altas temperaturas empleadas en los procesos, se analizarán más adelante. Las emisiones de partículas del proceso de coquizado retardado, están asociadas con las operaciones de remoción de coque de los tambores y el subsecuente manejo y almacenamiento. Las emisiones de hidrocarburos se asocian con el enfriamiento y ventilación de los tambores antes de la limpieza, pero no se ha establecido claramente su formación durante el proceso de coquizado retardado.

Las emisiones de partículas se controlan humedeciendo el coque antes de la operación de limpieza, y para las de hidrocarburos se cuenta con equipos que colectan los vapores y los mandan a un incinerador de gases.

Cracking catalítico

El *cracking* catalítico, por medio de presión y calor en presencia de un catalizador, convierte aceites pesados en productos más ligeros, principalmente gasolinas y destilados que se emplean en operaciones de mezclado. Las sustancias que se introducen a este proceso son gasóleos que provienen principalmente de la destilación atmosférica y de la vacuométrica, con puntos de ebullición de 340 a 540°C. Los catalizadores más comunes son: alumina-silica, bentonita tratada, hidrosilicatos de aluminio y bauxita.

El regenerado del catalizador es una de las principales fuentes de contaminantes, ya que se emiten grandes cantidades de CO, partículas de catalizador e hidrocarburos (HC), por lo que se deben emplear equipos de control de gases, como quemadores para el CO y los HC y colectores de partículas, principalmente precipitadores electrostáticos o ciclones de alta eficiencia.

Los equipos de *cracking* catalítico se pueden clasificar en unidades de lecho fluidizado o en unidades de lecho móvil, las cuales se muestran en las figuras 5.4 y 5.5, respectivamente.

Unidades de lecho fluidizado (FCC).- Este proceso emplea un catalizador en forma de partículas muy finas que se comportan como un fluido al introducirse en una corriente de vapor. El gasóleo, que se introduce como alimentación a este proceso, se precalienta y posteriormente se introduce por la parte inferior de una línea de transferencia vertical o elevador que contiene catalizador caliente. El catalizador vaporiza la corriente de alimentación y se alcanza la temperatura adecuada para la reacción entre 470 y 525°C. La elevada actividad de los catalizadores modernos produce la mayor parte de las reacciones de *cracking* en el elevador mientras fluye la mezcla de aceites junto con el catalizador en dirección ascendente. Las partículas de catalizador son separadas de los vapores de hidrocarburos en ciclones y los productos son llevados a un fraccionador para ser separados.

El catalizador empleado es mandado al regenerador, donde se quema el coque que se depositó

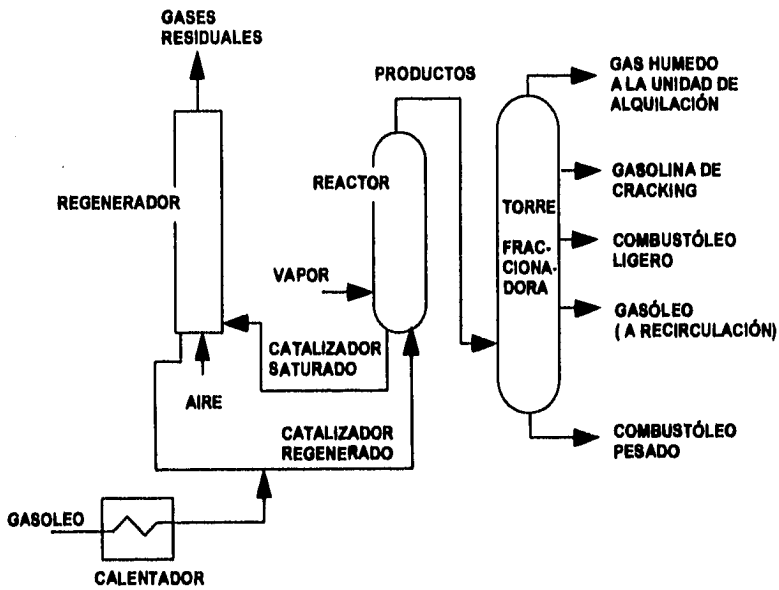


Fig. 6.4 Unidad de cracking catalítico de lecho fluidizado.

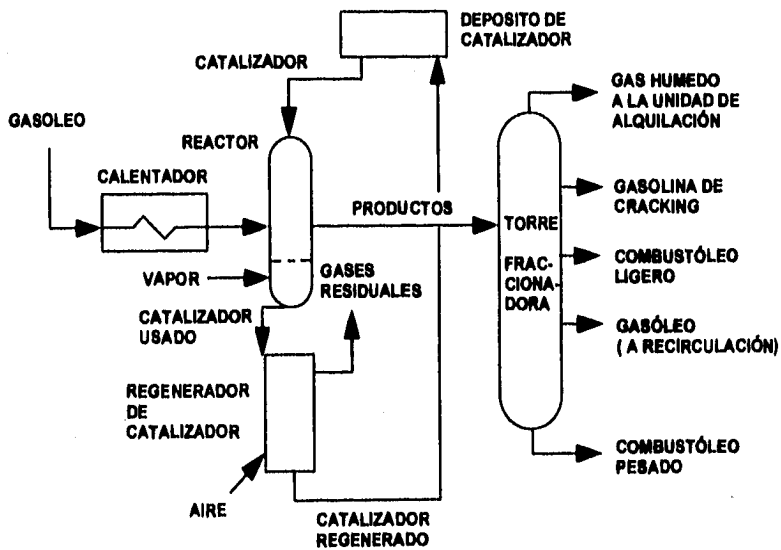


Fig. 6.5 Unidad de cracking catalítico de lecho móvil.

en el catalizador por medio de una combustión controlada con aire precalentado. La temperatura del regenerador está entre los 590 y 675°C. El catalizador regenerado se regresa al reactor para reiniciar el ciclo.

Unidades de lecho móvil (TCC).- En este proceso las capas de catalizador, de aproximadamente 5 mm de espesor, caen por gravedad desde la parte superior del reactor, donde entran en contacto con la alimentación de hidrocarburos. Las reacciones de *cracking* tienen lugar mientras el catalizador y los hidrocarburos se desplazan en la misma dirección hacia la parte baja del reactor. El resto del proceso es análogo al que se realiza con las unidades FCC.

La emisión de partículas es mucho mayor en las unidades FCC que en las TCC debido a la diferencia en las cantidades de catalizador en circulación.

Hidrocracking

Éste es un proceso que se emplea para transformar hidrocarburos como gasóleo y residuos pesados en: gasolinas, isoalcanos de alto octanaje, combustibles para jets, combustibles diesel y combustóleo con bajo contenido de azufre.

El proceso se muestra en la figura 5.6 y consiste en un *cracking* catalítico en presencia de hidrógeno, el cual satura los alquenos u olefinas (hidrocarburos no saturados) convirtiéndolos en alcanos o parafinas, evitando la producción de coque. Los productos del reactor son pasados por un separador, un estabilizador y finalmente por una torre fraccionadora. El hidrógeno gaseoso es reciclado del separador al reactor. Los productos del fraccionador que resulten más pesados de lo que se requiere pasarán nuevamente al reactor.

El principal residuo de este proceso es el azufre que se separa de los productos, principalmente como ácido sulfhídrico, y se manda a una planta de recuperación de azufre.

Reformación catalítica de naftas

El reformado es un proceso que convierte naftas en gasolinas de alto octanaje y produce aromáticos para la producción de combustibles para aviones. Las principales reacciones en este proceso son la deshidrogenación de los naftenos y la isomerización de parafinas. Para realizar estas reacciones se debe contar con la presencia de un catalizador que por lo general es platino o molibdeno. El diagrama del proceso se muestra en la figura 5.7.

La materia prima de este proceso son naftas pesadas provenientes de la torre de destilación atmosférica y de la unidad de *hidrocracking*. Las naftas son previamente tratadas en un proceso de hidrogenación, posteriormente pasan a tres o cuatro reactores en serie, los cuales contienen el catalizador; cada reactor está precedido por un calentador. El flujo del último reactor es enfriado y pasa a un tambor de separación donde se divide el flujo líquido del gaseoso. Los líquidos se estabilizan en una cámara de estabilización y los gases son recirculados al primer reactor. Los productos que se obtienen de este proceso son: gasolinas de alto octanaje, algunos aromáticos como benceno, tolueno y xileno. El hidrógeno es un subproducto muy importante en este proceso. Este proceso es relativamente limpio y no presenta mayor problema para la contaminación del aire.

Alquilación

La alquilación se aplica para transformar hidrocarburos gaseosos como isobutano, propileno y butileno en combustibles de alto octanaje (ver figura 5.8).

La alquilación consiste en la reacción de una olefina con un hidrocarburo aromático o parafínico (alcanos). Esta reacción se realiza en presencia de un catalizador a presiones y temperaturas controladas. Los productos del reactor pasan a una sección de recuperación de catalizador, en donde se separan los hidrocarburos. El catalizador se recircula al reactor y los hidrocarburos se neutralizan lavándolos con una sustancia cáustica antes de pasar a la torre fraccionadora. El

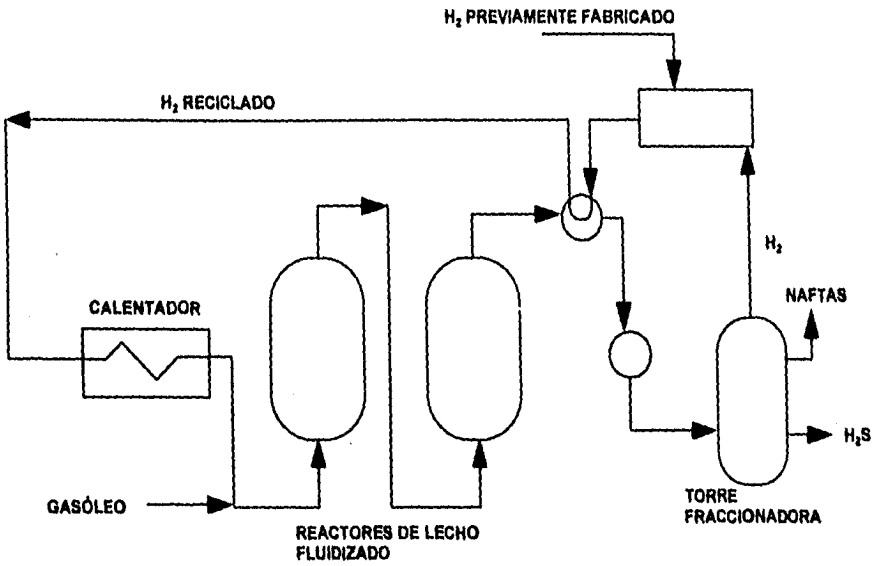


Fig. 5.6 Unidad de hidrocracking.

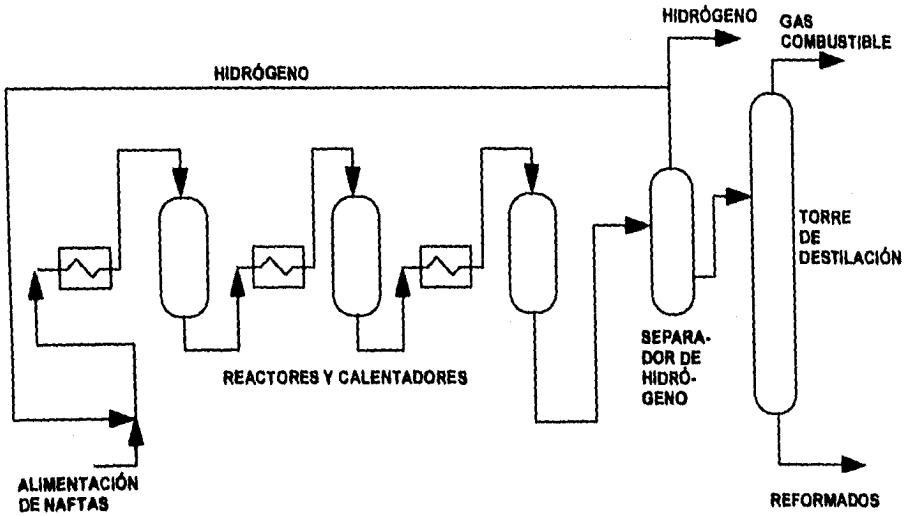


Fig. 5.7 Reformado catalítico de naftas.

isobutano que se obtiene de esta torre se recircula al reactor, mientras que los productos finales se mandan al área de mezclado. De este proceso se obtiene el 2-2-4-trimetilpentano, que es un isómero del octano, el cual posee un octanaje muy alto y se emplea como aditivo en las gasolinas.

Isomerización

Los isómeros son hidrocarburos que modifican el acomodo de sus átomos dentro de la molécula, al ramificar las cadenas de hidrocarburos se eleva su octanaje. El proceso consiste en formar isoalcanos a partir de alcanos. Las parafinas normales son calentadas, se someten a altas presiones y se colocan en presencia de un catalizador hidrogenador, el cual transforma el pentano y el hexano en sus isómeros correspondientes reacomodando la estructura de las moléculas; el principal producto de este proceso es el isobutano. Posteriormente el hidrógeno es retirado para volverse a utilizar.

Éste es un proceso limpio que no presenta emisiones considerables de contaminantes. El proceso se describe en la figura 5.9.

5.1.3 Tratamiento

La etapa de tratamiento consta de dos procesos: secado y endulzado. El endulzado se encarga de remover compuestos de azufre, como ácido sulfhídrico y mercaptanos, mientras que sustancias como agua, CO₂ y otras impurezas son eliminadas en el secado.

Endulzado y secado

El proceso de endulzado consiste en la transformación de mercaptanos en disulfatos en presencia de un catalizador, acompañado por la remoción de los disulfatos. En el proceso se agrega azufre,

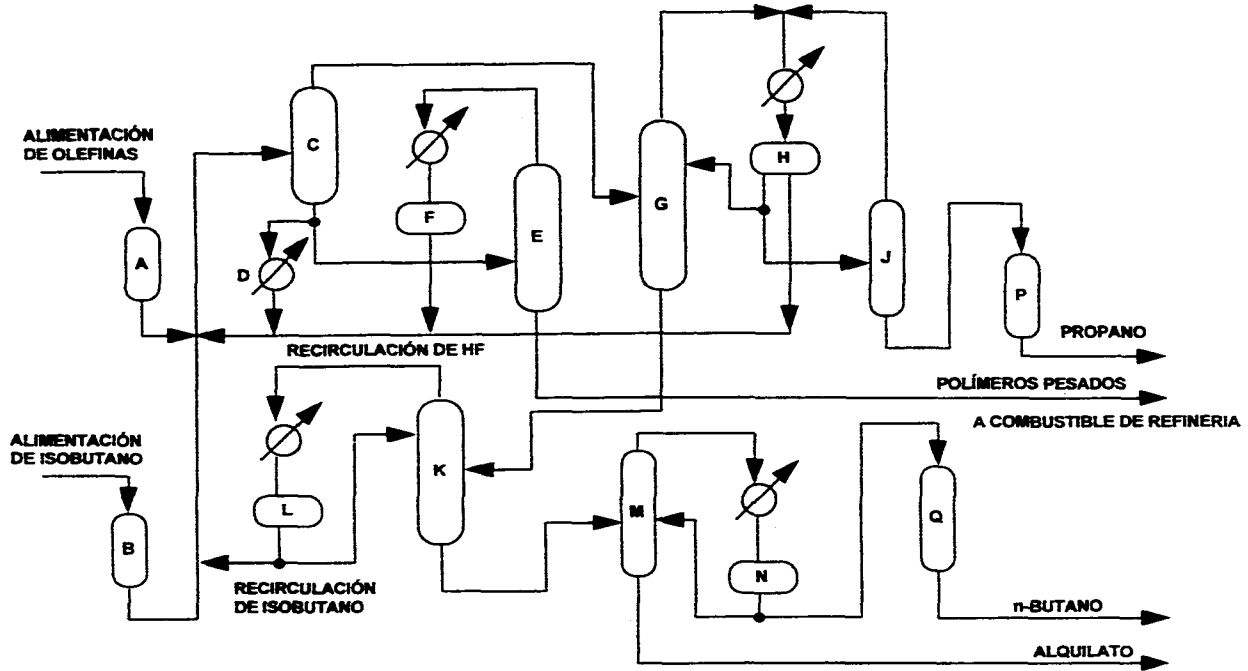


Fig. 5.8. Alquilación con HF. A: secador de alimentación de olefina; B: secador de alimentación de isobutano; C: decantador de ácido; D: enfriador de ácido; E: columna de aprovechamiento de ácido; F: depósito de ácido; G: despropanizador; H: depósito del despropanizador; J: desorbedor de ácido; K: desisobutanizador; L: depósito del desisobutanizador; M: desbutanizador; N: depósito del desbutanizador; P: tratamiento alcalino de butano.

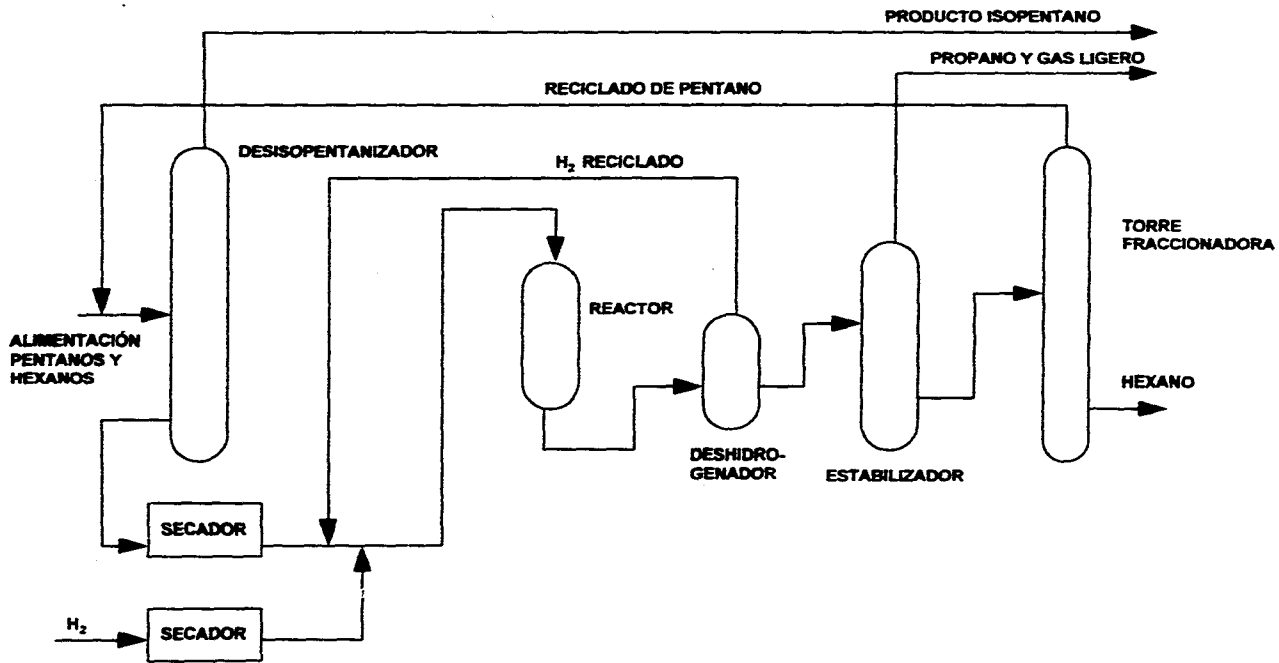


Fig. 5.9. Isomerización del pentano.

una pequeña cantidad de solución cáustica y aire a los hidrocarburos a endulzar. La mezcla se pasa a través de un lecho fijo de catalizador y en contraflujo pasa una solución cáustica. En los procesos de conversión y extracción, los destilados se lavan en una solución cáustica y posteriormente en el extractor se pone en contacto con una solución cáustica con catalizador. El destilado se pone en contacto con aire para convertir los mercaptanos en disulfatos. Tras la oxidación, el destilado se mantiene en reposo, se agregan inhibidores y posteriormente se manda a almacenamiento. Existe un proceso de regeneración que consiste en mezclar con aire la solución cáustica del fondo del extractor y después se separan los disulfatos y el exceso de aire.

El principal problema de emisiones son los hidrocarburos, al poner en contacto el flujo de aire con los destilados en la etapa de soplado. Estas emisiones dependen del tipo de equipo así como de las condiciones de operación y prácticas de mantenimiento.

El proceso empleado para el endulzado de hidrocarburos varía considerablemente dependiendo del subproceso en particular. Tanto el ácido sulfhídrico como los mercaptanos producen un olor desagradable y los últimos reducen considerablemente el octanaje de los combustibles. Existen tres métodos principales de endulzamiento: 1) oxidación de mercaptanos a disulfuros; 2) remoción de mercaptanos; 3) destrucción y remoción de productos que contengan azufre junto con los mercaptanos, ácido sulfhídrico y azufre. El último proceso se conoce como desulfuración.

La remoción de gases con contenido de azufre, al igual que los mercaptanos, se puede realizar por medio de lavadores húmedos, empleando el fenómeno de absorción o por medio de filtros porosos de arcilla que adsorben dichas sustancias. El secado de productos se realiza en los filtros de arcilla así como en filtros de sal que adsorben el agua.

Los principales desechos de este proceso son residuos cáusticos, los cuales representan problemas para la contaminación del agua. En lo que respecta a emisiones gaseosas, el principal problema lo causa la presencia de ácido sulfhídrico en los gases de escape, el cual puede ser incinerado, empleado como combustible o procesado para recuperar azufre. Este último proceso de recuperación de azufre es bastante limpio y no representa un problema grave en cuanto a

emisiones contaminantes, aunque los incineradores de gases producen contaminantes causados por la combustión.

5.1.4 Mezclado

El área de mezclado es la etapa final de la refinación del petróleo. Aquí llegan los productos obtenidos en el *cracking* catalítico, *hidrocracking*, reformado de naftas, alquilación y polimerización. El porcentaje de estos productos en las gasolinas finales dependerá de los niveles de calidad que se requieran.

La gran mayoría de los productos finales en la industria petrolera consisten en una combinación de varias sustancias y aditivos que se mezclan para dar como resultado los combustibles, lubricantes y demás productos finales que cumplan con las normas de calidad establecidas.

5.1.5 Equipos auxiliares

Dentro de los procesos antes mencionados se requieren equipos auxiliares que cumplan con determinadas operaciones unitarias dentro de cada proceso.

Generadores de vapor

Los generadores de vapor dentro de las refineries son de gran importancia, pues el vapor que generan se emplea para producir electricidad (en casos de emergencia) por medio de turbinas de vapor y generadores eléctricos, pero principalmente se emplea para calentar y separar los principales productos de la industria petroquímica. Cuando se emplea para calentar, el vapor usualmente calienta de manera indirecta al petróleo en intercambiadores de calor y posteriormente regresa a la caldera. En operaciones directas, el vapor se emplea como separador de algunas

sustancias o como fluido de proceso. El vapor también se usa para producir presiones vacuométricas por medio de los eyectores de vacío. Las emisiones relacionadas con los generadores de vapor son los gases de combustión, partículas e hidrocarburos no quemados.

Calentadores de proceso

Los calentadores de proceso son empleados de manera muy amplia en las refinerías para precalentar las sustancias de alimentación y así llegar a los niveles de reacción y destilación. Estos equipos están diseñados para elevar la temperatura del petróleo hasta 550°C. El gas que queman los calentadores puede ser gas L.P., gas natural, combustible residual o combinaciones, dependiendo de la economía, condiciones de operación y requerimientos de emisiones.

Las emisiones de estos equipos son todos los contaminantes considerados. La magnitud de estas emisiones dependen del tipo de combustible quemado, las impurezas que contenga el combustible y la capacidad del equipo. Los óxidos de azufre se pueden controlar por desulfuración del combustible o tratando los gases de escape. El monóxido de carbono y los hidrocarburos se pueden controlar aumentando la eficiencia de la combustión. Actualmente se están investigando cuatro técnicas de control para los óxidos de nitrógeno: modificación de la combustión, cambios de combustible, diseño de las cámaras de combustión y tratamiento de los gases de escape.

Compresores de combustión interna

Muchas refinerías antiguas emplean compresores de alta presión con motores de combustión interna, ya sean reciprocantes o con turbinas de gas. Algunos procesos que emplean altas presiones en las refinerías son: hidrosulfuración, isomerización, reformado e *hidrocracking*. Las máquinas de combustión interna son menos eficientes y más difíciles de mantener que las máquinas de vapor o los motores eléctricos. Por esta razón y por el incremento en el costo del gas natural, se han instalado muy pocas unidades de este tipo en los últimos años.

Estos equipos emiten principalmente productos de combustión en los gases de escape. En algunos casos se pueden presentar óxidos de azufre dependiendo del contenido de azufre en el gas natural. Todas estas emisiones son significativamente mayores en equipos recíprocos que en los de turbina.

Las técnicas de control de emisiones que se aplican principalmente en estos equipos son la carburación, similar a la de los automóviles. En algunos casos se han instalado convertidores catalíticos para reducir las emisiones de monóxido de carbono.

Sistema de control de descargas

El sistema de control de descargas tiene como finalidad ofrecer un almacenamiento seguro de los hidrocarburos (gases y líquidos) que se emitan por medio de dispositivos de liberación de presión.

La mayoría de los equipos dentro de una refinería están conectados a una unidad colectora de descargas conocido como sistema de control de descargas (*blowdown system*). Por medio de una serie de tambores de *flasheo* y condensadores arreglados para que la presión vaya disminuyendo, las descargas son separadas en vapor y líquido. Los líquidos son regresados a la refinería, mientras que los gases son incinerados o en ocasiones regresan a la refinería.

Las emisiones no controladas son principalmente hidrocarburos. La magnitud de las emisiones de un sistema de control de descargas depende de la cantidad de equipos que estén conectados al sistema, de la frecuencia de descargas de los equipos y de los controles.

Las emisiones de este sistema se pueden controlar por medio de la incineración de los incondensables. Para obtener una combustión completa o sin humo, se inyecta vapor en la zona de combustión del incinerador para producir turbulencia y aumentar la cantidad de aire. La inyección de vapor también reduce la generación de óxidos de nitrógeno al disminuir la

temperatura de la flama.

5.2 Principales fuentes de emisión y contaminantes

Los principales contaminantes que se emiten a la atmósfera en la industria petrolera se resumen en la tabla 5.1 (Jones, 1973). Como se puede observar, uno de los equipos más contaminantes dentro de las refinerías son los regeneradores catalíticos. En estos equipos se deben emplear precipitadores electrostáticos o ciclones de alta eficiencia para reducir la emisión de partículas, así como cámaras de absorción y adsorción para eliminar las sustancias ácidas o alcalinas que se puedan encontrar en los gases de escape.

Los tanques de almacenamiento son otra fuente de emisiones atmosféricas, pues si no se encuentran bien sellados pueden causar emisiones considerables de hidrocarburos. Para controlar este tipo de emisiones se emplean techos flotantes que reducen la evaporación de estas sustancias; también se recurre a los tanques presurizados para mantener los hidrocarburos en estado líquido. Se debe mantener en buen estado bombas, tuberías y accesorios para reducir las fugas. En operaciones de carga y descarga, el personal debe tomar las medidas pertinentes para evitar derrames. Existen equipos que cuentan con procesos de combustión como intercambiadores de calor o calentadores de proceso, calderas, incineradores de gases residuales y compresores de combustión interna, los cuales emiten gases de combustión: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y de azufre, hidrocarburos no quemados y partículas. Como se sabe, la cantidad emitida de cada contaminante depende del tipo de combustible y de la calidad del mismo, así como la capacidad del equipo y las condiciones de operación de éste.

Para controlar las emisiones de gases de combustión se deben tomar las siguientes medidas: mejorar la calidad de los combustibles (reducir el contenido de azufre y plomo); si es posible, cambiar el tipo de combustible empleado por uno más limpio, por ejemplo de combustóleo a gas natural, y mantener en condiciones óptimas el proceso de combustión.

Tabla 5.1 Principales contaminantes y sus fuentes de emisión

Contaminante	Fuentes de emisión
Óxidos de azufre	Calderas, Intercambiadores de calor, regeneradores catalíticos, quemadores de H ₂ S
Hidrocarburos	Operaciones de carga, muestreos, tanques de almacenamiento, separadores de aguas residuales, regeneradores catalíticos, bombas, válvulas, torres de enfriamiento, Intercambiadores de calor, calderas
Óxidos de nitrógeno	Intercambiadores de calor, calderas, compresores, regeneradores catalíticos, quemadores de gases residuales
Partículas	Regeneradores catalíticos, calderas, Intercambiadores de calor, Incineradores
Aldehídos	Regeneradores catalíticos
Amoníaco	Regeneradores catalíticos
Monóxido de carbono	Regeneradores catalíticos, compresores, Incineradores

Se consideran fuentes directas de emisión los siguientes procesos:

- destilación vacuométrica
- *cracking* catalítico
- *cracking* térmico
- generadores de vapor
- calentadores de proceso
- compresores de combustión interna
- sistemas de control de descargas (*blowdown system*)
- endulzado

Además de los procesos anteriores es importante combatir las emisiones por fugas. Éstas, generalmente se definen como la emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOC's); no están asociadas con algún proceso en particular, sino que se distribuyen en toda la planta. Las fuentes de emisiones fugitivas incluyen válvulas de todos tipos, bridas, sellos de bombas y compresores, drenes de proceso, torres de enfriamiento, tanques de almacenamiento, operaciones de

transferencia y separadores de aceite y agua. Las emisiones fugitivas se generan por la evaporación de hidrocarburos que gotean o se derraman de los equipos. El control de este tipo de emisiones se basa principalmente en la reducción de goteos y derrames por medio de cambios de equipos y un buen sistema de mantenimiento.

En lo que se refiere a válvulas, bridas, sellos y drenes, se ha encontrado una correlación muy alta entre los flujos de masa de las emisiones y el tipo de flujo que se tiene en esos equipos. Las tres clasificaciones de flujos con que cuenta una refinería son: flujos de gas/vapor, flujos en dos fases de líquidos ligeros y flujos de keroseno así como de líquidos más pesados. Las emisiones por fugas de corrientes de gas/vapor son mucho mayores que las de líquidos pesados, especialmente en válvulas y sellos de bombas. El tamaño de los equipos como válvulas, bridas, etc., no es un factor predominante en la magnitud de las emisiones fugitivas.

Las válvulas son los aditamentos que emiten la mayor cantidad de VOC's; esto se debe a su gran número dentro de las plantas y a su alto factor de emisión. La cantidad total de emisiones fugitivas de VOC's en una refinería típica con capacidad de 330 000 barriles diarios es de 20,4 TM por día (EPA, 1985).

En todas las refinerías se cuenta con áreas de tanques de almacenamiento tanto de petróleo crudo como de productos intermedios y finales, con los que se asegura una operación uniforme y continua de la planta. Las dimensiones de los tanques de almacenamiento varían de menos de 1 000 barriles a más de 500 000 barriles.

El control de emisiones en los tanques de almacenamiento tiene tres objetivos principales: 1) eliminar o reducir los contaminantes a la atmósfera; 2) eliminar o reducir los riesgos de incendio, y 3) ahorro económico por medio de la recuperación de productos valiosos.

Las principales técnicas en el control de emisiones en tanques de almacenamiento son el uso de sellos en los techos flotantes, cobertores plásticos, microesferas plásticas, y sistemas varios de recuperación de gases.

Los sellos empleados en los techos flotantes de tanques de almacenamiento tienen la finalidad de cerrar el espacio entre el diámetro interior del tanque y el diámetro exterior del techo (por lo general el diámetro del techo es unos 15 cm menor que el diámetro del tanque). Los sellos son de materiales flexibles que se adaptan a las pequeñas irregularidades del tanque. Además de evitar la salida de vapores y la entrada de agua a los tanques, los sellos actúan como una guía para mantener centrado el techo.

Los cobertores plásticos operan bajo el mismo principio que los techos flotantes; se colocan en el interior de los tanques con techo fijo. Están hechos de materiales plásticos especiales y cuentan con un sistema antiestático que elimina la posibilidad de que se produzcan chispas en el interior del tanque.

Las microesferas plásticas son pequeñas partículas esféricas huecas, hechas de resina fenólica, que poseen las propiedades físicas para formar una capa de espuma en la superficie de los líquidos. Se emplean en tanques de techo fijo en los que se almacena petróleo crudo o combustóleo. Para prolongar la vida de las esferas se debe controlar la presión, la temperatura y los niveles máximos y mínimos del tanque. También es necesario reducir la turbulencia del líquido dentro del tanque para evitar que las esferas se mezclen con el flujo de salida.

Los sistemas de recuperación de vapores consisten en una serie de ductos que conectan los espacios de vapor de los tanques para recolectar los vapores. Los vapores obtenidos se comprimen y se mandan a una unidad de absorción donde se recuperan los hidrocarburos condensables. Los hidrocarburos no condensables se mandan a un incinerador de gases.

5.3 Base de datos

Con esta información sobre los procesos en la industria petrolera, sus principales contaminantes y equipos de control, se ha construido una base de datos cuya descripción se muestra a continuación.

5.3.1 Estructura

Para la creación de esta base de datos se diseñaron diversas tablas. La tabla principal se llama FACTOR.DB, en la que se cuenta con la información necesaria para clasificar los factores de emisión. Los datos que se incluyen son muy repetitivos, y en algunos casos muy extensos, así que con la finalidad de introducir los datos de manera más rápida, se emplearon claves. Estas claves relacionan la tabla FACTOR.DB con otras tablas más pequeñas.

La tabla FACTOR.DB cuenta con siete campos, los cuales se muestran en la tabla 5.2. Los campos con asterisco (*) son los campos llave.

Tabla 5.2 Campos de FACTOR.DB

*CLAVE CAPA	*CLAVE COMB	*CLAVE EQIND	*CLAVE ZONA	CONTAMI- NANTE	FACTOR DE EMISION	CLAVE REF
----------------	----------------	-----------------	----------------	-------------------	----------------------	-----------

El campo "CLAVE CAPA" contiene una clave que al relacionarla con la tabla CLACAPA.DB nos da la capacidad correspondiente del equipo. "CLAVE COMB" se relaciona con la tabla CLACOMB.DB para determinar el tipo de combustible empleado. "CLAVE EQIND" posee las claves que nos darán el equipo industrial seleccionado por medio de la tabla CLAEQIND.DB. El último campo llave es "CLAVE ZONA", en donde están las claves relacionadas con la tabla CLAZONA.DB para mostrar una zona geográfica seleccionada y la descripción de la misma. En el campo "CONFAMINANTE" se encuentran los contaminantes que regula la norma empleada, éstos son: óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂) y partículas suspendidas totales (PST). El campo "FACTOR DE EMISIÓN" contiene el valor numérico de la norma de emisión en particular. El último campo de esta tabla es "CLAVE REF", en donde está la clave que nos relaciona la referencia de la norma empleada en la tabla CLAREF.DB. En este caso sólo usamos una sola norma, pero cuando existan más normas de emisión que se puedan aplicar en esta base de datos, esta tabla será muy útil.

Las tablas antes mencionadas se muestran a continuación (tablas 5.3 a 5.6):

Tabla 5.3 CLACAPA.DB

*CLAVE CAPA	CAPACIDAD
1	HASTA 5,250 MJ/h
2	DE 5,250 A 43,000 MJ/h
3	DE 43,000 A 110,000 MJ/h
4	MAYOR DE 110,000 MJ/h

Tabla 5.4 CLACOMB.DB

*CLAVE COMB	COMBUSTIBLE
C	COMBUSTÓLEO O GASÓLEO
O	LÍQUIDOS EXCEPTO COMBUSTÓLEO O GASÓLEO
G	GASES
L	LÍQUIDOS

Tabla 5.5 CLAEQIND.DB

*CLAVE EQIND	EQUIPO INDUSTRIAL
1	CALDERAS
2	CALENTADORES
3	COMPRESORES
4	TURBINAS

Tabla 5.6 CLAZONA.DB

*CLAVE ZONA	ZONA	DESCRIPCIÓN
ZMCM	ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO	LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COMPRENDE...
ZC	ZONAS CRÍTICAS	LAS ZONAS CRÍTICAS COMPRENDEN...
RP	RESTO DEL PAÍS	EL RESTO DEL PAÍS INCLUYE...

En los factores de emisión, las unidades se encuentran definidas por el contaminante. Por ejemplo, las unidades para las emisiones de NO_x y SO₂ son ppm (partes por millón) y para las PST son mg/m³, por esta razón se creó una tabla llamada CLAUNI.DB, que relaciona el contaminante con las unidades de su factor de emisión (ver tabla 5.7).

Tabla 5.7 CLAUNI.DB

CONTAMINANTE	UNIDADES
PST	mg/m ³
SO ₂	ppm
NO _x	ppm

Con estas tablas se realizó una consulta por medio de ejemplos. Una consulta por medio de ejemplos es una herramienta que ofrecen los paquetes de bases de datos como Paradox, por medio de la cual se pueden relacionar las tablas que tengan campos en común y de esa manera obtener la información deseada. El resultado de esta consulta es otra tabla llamada DATOS.DB en donde se conjuntan las cinco tablas anteriores, como lo muestra la tabla 5.8:

Tabla 5.8 DATOS.DB

*EQUIPO INDUSTRIAL	*CAPACIDAD	*COMBUSTIBLE	*ZONA
--------------------	------------	--------------	-------

CONTAMINANTE	FACTOR DE EMISIÓN	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
--------------	-------------------	----------	-------------	------------

La tabla DATOS.DB es la que suministra la información para las consultas que se realizan en una aplicación.

Existe otra tabla llamada CONTAMIN.DB que contiene la información referente a los efectos que causan los contaminantes y los equipo de control empleados en la industria (ver tabla 5.9).

Tabla 5.9 CONTAMIN.DB

CONTAMINANTE	NOMBRE	EFEECTO	EQUIPOS DE CONTROL
--------------	--------	---------	--------------------

5.3.2 Pantallas de la base de datos

En la base de datos que se realizó en esta tesis, se cuenta con cuatro formas de salida diferentes, a las que llamaremos pantallas. En la primera pantalla, se encuentra un cuadro de bienvenida a la base de datos y se le da al usuario tres opciones: 1) realizar una consulta, 2) ir a la sección de efectos de los contaminantes y equipos de control o 3) salir de la aplicación.

En la segunda pantalla se le pide al usuario que seleccione las opciones de las variables que se requieren para definir el factor de emisión. Como se recordará, estas variables son: tipo de equipo, capacidad del equipo, combustible empleado y la zona en la que se encuentra la fuente de emisión. Como la consulta requiere de estas cuatro variables, existe un

procedimiento dentro de la aplicación que verifica la selección de alguna opción para cada variable, y en caso de que falte alguna, le indica al usuario que defina la o las variables que no definió.

Las opciones que se presentan para la clase de equipo son: calderas, calentadores, compresores y turbinas (todos de combustión interna). La capacidad del equipo varía desde menos de 5 240 MJ/h hasta más de 110 000 MJ/h (1 HP = 2,68 MJ/h). El combustible puede ser: a) combustóleo o gasóleo, b) líquidos excepto combustóleo o gasóleo, c) líquidos, d) sólidos y e) gaseosos. Por último, las regiones pueden ser: la zona metropolitana de la ciudad de México, zonas críticas o el resto del país.

Después de realizar la selección de opciones, el usuario puede efectuar la consulta oprimiendo el botón "RESULTADOS" o puede también regresar a la primera pantalla.

En caso de que se oprima el botón "RESULTADOS" y que todas las opciones se hayan seleccionado, aparecerá la tercera pantalla que muestra las opciones seleccionadas de las variables de consulta; los resultados de la consulta que consisten en los factores de emisión, con sus unidades, para cada contaminante incluido en la norma NOM-ECOL-085-1994; se observa una ventana donde se puede leer los nombres de los municipios de las entidades federativas de la zona seleccionada, y la referencia de la norma empleada. Toda esta información se obtiene de la tabla DATOS.DB.

En esta pantalla se presenta la única opción de realizar otra consulta por medio del botón que indica "REALIZAR OTRA CONSULTA", el cual nos lleva a la pantalla anterior. Para efectuar otra consulta, se debe repetir el mismo procedimiento. Si ya no se desea realizar otra consulta, con el botón que dice "MENÚ PRINCIPAL" se regresa a la primera pantalla.

Para llegar a la cuarta pantalla, se debe oprimir el botón que dice "EFECTOS Y EQUIPOS DE CONTROL", que se encuentra en el menú principal. En esta pantalla, que obtiene la información contenida en la tabla CONTAMIN.DB, se mostrarán los principales

contaminantes y sus efectos a la salud, así como los equipos de control que se emplean para reducir las emisiones al ambiente. Para cambiar de contaminante se deben oprimir las flechas que se encuentran en la parte superior central de la pantalla. Con el botón de "MENÚ PRINCIPAL" se regresa a la primera pantalla.

En las siguientes páginas se muestran impresiones de las cuatro pantallas que contiene la base de datos.

Como se observa en los análisis de los equipos de las refinerías, la norma NOM-085-ECOL-1994 nos presenta grandes limitantes, ya que sólo nos remite a equipos de combustión interna y existen muchos equipos que emiten contaminantes pero no a consecuencia de la quema de combustibles fósiles, por lo que no se incluyen dentro de la norma.

BENVENIDO AL SISTEMA DE
INFORMACION SOBRE FACTORES DE
EMISION DE CONTAMINANTES A LA
ATMOSFERA

EFFECTUAR UNA
CONSULTA

EFFECTOS DE LOS
CONTAMINANTES

SALIR

VARIABLES DE CONSULTA

EQUIPO INDUSTRIAL :

CALENTADORES

COMBUSTIBLE :

SOLIDOS

CAPACIDAD :

Mayor de 110,000 MJ/h

ZONA :

ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO

CONTAMINANTE	FACTOR DE EMISION	UNIDADES
NOx	160	PPM
PST	70	mg/m ³
SO2	1100	PPM

DESCRIPCION DE LA ZONA:

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México comprende el área integrada por las 16 Delegaciones Políticas del Distrito Federal y los municipios de Toluca y Cuernavaca.

REFERENCIA :

NOM-085-ECOL-1994

OTRA
CONSULTA

SELECCIONE EQUIPO, CAPACIDAD, COMBUSTIBLE Y LA ZONA
CORRESPONDIENTES A LOS FACTORES DE EMISION

SELECCIONE EQUIPO

- ◆ CALDERAS
- ▶ COMPRESORES
- ▶ TURBINAS
- ▶ CALENTADORES

SELECCIONE LA CAPACIDAD
DEL EQUIPO

- ▶ HASTA 5,250 MJ/h
- ◆ DE 5,250 A 43,000 MJ/h
- ▶ DE 43,000 A 110,000 MJ/h
- ▶ MAYORES DE 110,000 MJ/h

SELECCIONE EL TIPO DE COMBUSTIBLE

LIQUIDOS



SELECCIONE LA ZONA DE INTERES

- ▶ ZONAS CRITICAS
- ◆ ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO
- ▶ RESTO DEL PAIS

RESULTADOS

MENU
PRINCIPAL



CO

Monóxido de carbono

Los sistemas recomendados para el control del CO . . .

El monóxido de carbono es un gas venenoso que afecta principalmente al hombre y a los animales porque este gas al ser respirado se instala en la hemoglobina de la sangre. La hemoglobina es la encargada de transportar el oxígeno a todos los tejidos del cuerpo, pero la

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el desarrollo continuo de la capacidad de memoria y velocidad para el procesamiento de datos en las computadoras, los sistemas de información computarizados son una herramienta muy poderosa en el manejo de información. Sin embargo, se debe tener cuidado en su aplicación, ya que estos sistemas pueden llegar a ser tan extensos que sea necesario definir con exactitud la información requerida, pues de lo contrario es posible perderse en un mundo de información que puede resultar irrelevante. De igual manera, para el diseño de una base de datos es necesario establecer *a priori* el uso que se le dará, con la finalidad de crear un programa computacional que cumpla con los requerimientos del usuario.

Los sistemas de información nos permiten realizar consultas de manera fácil y ordenada con la finalidad de obtener los datos requeridos en poco tiempo. Estar bien informado es de vital importancia para la planeación y para la toma de decisiones.

En este trabajo se diseñó la estructura de una base de datos que permitiera manejar la información existente relacionando las fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera, los equipo de control que pueden emplearse en este proceso, los efectos de los contaminantes emitidos y las normas relacionadas con la emisión.

Para la creación de un inventario completo de emisiones de contaminantes a la atmósfera, es necesario realizar un análisis de los procesos y equipos involucrados en los diferentes ramos industriales, con la finalidad de establecer las fuentes de emisión de contaminantes y emplear los factores de emisión adecuados para estos equipos. Posteriormente, para el cumplimiento de las normas de emisión será necesario seleccionar una o varias de las siguientes alternativas: optimizar los procesos, emplear equipos de control de contaminantes o sustituir completamente estos procesos.

Durante el desarrollo de esta base de datos para el manejo de emisiones de contaminantes a la atmósfera, fue posible detectar algunas deficiencias en la información existente y concluir lo

siguiente:

* Es necesario establecer una convención para unificar las unidades en que se reportan las normas de emisión. Algunas normas se expresan dependiendo de la capacidad de los equipos de combustión interna (la potencia del equipo), mientras que otras toman como referencia el tipo de combustible y la cantidad de éste empleada.

* En la industria petrolera (empleada como ejemplo para este trabajo), como en muchas otras industrias, se emite una gran cantidad de contaminantes atmosféricos que no son necesariamente producto de la quema de combustibles fósiles, para los cuales aún no se han establecido normas mexicanas de emisión, siendo necesaria esta emisión y establecer las normas correspondientes.

En lo que respecta a las normas y factores de emisión, es necesario identificar cuáles son las que se aplican para cada proceso. Si no se ha publicado alguna norma para un contaminante en particular, habrá que averiguar si existe alguna propuesta de ley en trámite para tener un marco de referencia, y en caso de no haberla, se podrá tomar como referencia la norma correspondiente para otros países. Es necesario crear un programa que relacione todas las normas de las diferentes industrias y nos permita realizar las consultas pertinentes. Para la elaboración de una base de datos global sobre factores de emisión de contaminantes atmosféricos, se debe realizar un estudio por separado de cada una de las industrias que integran el sector industrial nacional, con la finalidad de identificar los procesos que emiten contaminantes y establecer el factor de emisión adecuado.

Finalmente, se propone continuar con este trabajo ampliando la base de datos para otras especies contaminantes emitidas por la industria petrolera (de procesos de no combustión) y posteriormente incluir procesos y contaminantes de otras industrias.

La realización de este trabajo cumplió ampliamente con el objetivo planteado, produciendo una herramienta computacional que permite el manejo fácil y rápido de la información sobre contaminantes atmosféricos y sus fuentes de emisión.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banco Mundial. 1992. Informe sobre el desarrollo mundial. Desarrollo y medio ambiente. Washington, D.C.

Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México. 1994. La contaminación ambiental en el Valle de México. Acciones para su control 1988-1994.

Crawford, M. 1976. Air Pollution Control Theory. McGraw Hill. Nueva York.

Diario Oficial. 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994. Viernes 2 de diciembre de 1994.

EPA. 1985. Air Pollution Emission Factors. Vol. I.

Flagan, R. C. y Seinfeld, J. H. 1988. Fundamentals of Air Pollution Engineering. Prentice Hall.

Glason, W.A. y Tuesday, C.S. 1970. *Journal of the Air Pollution Control Association.* **20,** 239.

Hertzendrof, M. S. 1973. Air Pollution Control, guide book to U.S. regulations. Technomic.

INE, Sedesol. 1994a. Bases para una política nacional de residuos peligrosos. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Desarrollo Social.

INE, Sedesol. 1994b. Normas Oficiales Mexicanas en materia de protección ambiental. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Desarrollo Social.

Jones, H. R. 1973. Pollution Control in the Petroleum Industry. Noyes Data Corporation.

Lefebvre, A. H. 1983. Gas Turbine Combustion. McGraw Hill, Nueva York.

Parker, A. 1983. Contaminación del aire por la industria. Editorial Reverté, Barcelona.

Ruiz de Velasco, C. 1995. "Modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera: una nueva aplicación apoyada en la tecnología del Sicori". Material inédito. Pemex.

Sell, N. J. 1992. Industrial Pollution Control: Issues and Techniques. Van Nostrand Reinhold, Nueva York.

Stern, A. C., Bush, P.D. y Kaplan, K.J. 1955. Cyclone Dust Collectors. American Petroleum Institute, Nueva York.

Stern, A. C. 1968. Air Pollution. Vol. III. Segunda edición. Academic Press, Nueva York.

-1977. Air Pollution. Vol. II. Tercera edición.

-1986. Air Pollution. Vol. VII. Tercera edición.

Theodore, L. y Buonicore, A.J. 1988. Air Pollution Control Equipment. Vol. II: Gases. CRC Press.

Von Post-Lingen, M-L. 1964. "The Significance of Exposure to Small Concentrations of Carbon Monoxide". Proc. Roy. Soc. Med. 57: 1021-1029.

Wark, K. y Warner, C. F. 1992. Contaminación del aire. Origen y control. Limusa, México.

White, F. M. 1988. Mecánica de fluidos. McGraw Hill, México.

Williamson, S. J. 1973. Fundamentals of Air Pollution. Addison-Wesley Publishing Company.