



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**IMPORTANCIA Y APLICACIÓN DE FACTORES DE
EMISIÓN PARA LAS ACTIVIDADES
DESARROLLADAS EN UN RECINTO PORTUARIO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A :

RICARDO NAZARIO PÉREZ



MÉXICO D.F.

2014



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara**

VOCAL: **Profesor: Landy Irene Ramírez Burgos**

SECRETARIO: **Profesor: Rodolfo Sosa Echeverría**

1^{er}. SUPLENTE: **Profesor: Alfonso Durán Moreno**

2^o SUPLENTE: **Profesor: José Agustín García Reynoso**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA - SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN
AMBIENTAL - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Asesor del tema:

Rodolfo Sosa Echeverría

Supervisor técnico:

Humberto Bravo Álvarez

Sustentante:

Ricardo Nazario Pérez

Índice general

Índice general.	I
Índice de tablas.	III
Índice de figuras.	IV
Nomenclatura.	v
Resumen	1
1. Introducción	3
2. Antecedentes	5
2.1. Emisiones Atmosféricas	5
2.1.1. Emisiones atmosféricas	5
2.1.2. Fuentes de contaminación atmosférica	5
2.1.3. Tipos de contaminantes atmosféricos	6
2.1.4. Contaminantes criterio	8
2.1.5. Gases de efecto invernadero	9
2.1.6. Medición y estimación de emisiones	11
2.1.7. Inventarios de emisión	13
2.2. Factores de emisión	16
2.2.1. Desarrollo de factores de emisión.	16
2.2.2. FE basados en procesos y basados en censos.	18
2.2.3. Limitaciones de los factores de emisión.	18
2.2.4. Evaluación de la calidad de los factores de emisión.	19
2.2.5. Incertidumbre de los factores de emisión.	22
2.2.6. Aplicaciones.	23
2.3. Normativa	28
2.3.1. Normas de emisión en México	28
2.4. Recintos portuarios	30
2.4.1. Recinto portuario	30
2.4.2. El puerto	30
2.4.3. Actividades portuarias	33

2.4.4. Clasificación de fuentes de emisión de un recinto portuario	36
3. Metodología	38
3.1. Métodos de estimación de emisiones aplicando FE para las actividades portuarias	38
3.1.1. Fuentes móviles	38
3.1.2. Fuentes fijas	44
3.2. Aplicación de factores de emisión	46
4. Caso de estudio. Puerto de Veracruz	48
4.1. Proyecto Puertos Verdes	48
4.2. Descripción del área de estudio	48
4.3. Distribución de las áreas en el recinto portuario (lado tierra)	49
4.4. Descripción del caso de estudio	53
4.4.1. Incinerador CIMAR	53
4.4.2. Calderas VOPAK	57
4.4.3. Caldera EXCELLENCE	60
5. Resultados y discusión	63
5.1. Resultados de la estimación de emisiones para las fuentes fijas del caso de estudio	63
5.1.1. Resultados de la estimación de emisiones atmosféricas del incinerador	63
5.1.2. Resultados de la estimación de emisiones atmosféricas de las calderas de VOPAK	64
5.1.3. Resultados de la estimación de emisiones atmosféricas de la caldera de Excellence	65
5.2. Comparación de las emisiones globales de las calderas	67
5.3. Evaluación y comparación de las emisiones de la caldera de Excellence consumiendo Diesel (actual) y consumiendo gas natural (propuesta)	68
6. Conclusiones y recomendaciones	72
Bibliografía	73
Anexo	76

Índice de tablas

2.1. Clasificación de fuentes de contaminación atmosférica	6
2.2. Comparación de los distintos métodos de estimación de emisiones contaminantes SEMARNAT.	12
2.3. Fuentes generadoras de contaminantes atmosféricos.	24
2.4. Equipos y contaminantes normados.	24
2.5. Equipos y contaminantes no normados.	25
2.6. Emisiones reportadas en la COA	27
2.7. Normativa ambiental de México combustibles	28
2.8. Normativa ambiental de México fuentes fijas	28
2.10. Normativa ambiental de México fuentes móviles	29
2.12. Modelo de Organización del Sistema Portuario Nacional.	33
2.13. Clasificación de actividades portuarias.	34
2.14. Clasificación de fuentes móviles	36
2.15. Clasificación de fuentes fijas	37
4.1. Áreas a cargo de APIVER	51
4.2. Áreas a cargo de cesionarios	52
4.3. Cargas de incineración en el año 2012	55
4.4. Características de las calderas	60
4.5. Características de la caldera de EXCELLENCE	62
5.1. Cálculo de emisiones del incinerador.	63
5.2. Emisiones mensuales del incinerador del incinerador CIMAR.	64
5.3. Cálculo de emisiones de las calderas de VOPAK.	65
5.4. Cálculo de emisiones de la caldera de Excellence	66
5.5. Comparación de emisiones de la caldera de Excellence	69

Índice de figuras

2.1. Clasificación de partículas [U.S. EPA (2012)]	8
2.2. Descripción de un proceso de combustión que utiliza gas natural para la generación de energía eléctrica.	24
2.3. Esquema general de un puerto [Truyols (2010)]	30
2.4. Diagrama de proceso de la actividad portuaria carga y descarga de granel sólido.	35
3.1. Metodología general	47
4.1. Áreas del recinto portuario de Veracruz [APIVER (2012)]	50
4.2. Área caso de estudio [Google Earth (2012)]	53
4.3. Descripción del proceso de incineración CIMAR [INCIMEX(2013)]	56
4.4. Descripción del proceso de calentamiento VOPAK [VOPAK(2012)]	58
5.1. Emisiones estimadas	67
5.2. Emisiones estimadas de CO ₂ para las calderas del caso de estudio	68
5.3. Emisiones anuales para la caldera de Excellence utilizando Diesel (actual) y gas natural (propuesta).	70
5.4. Emisiones anuales de CO ₂ suponiendo misma cantidad de energía entregada al proceso.	70

Nomenclatura.

APIVER	Administración Portuaria integral del Puerto de Veracruz
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Bióxido de carbono
COA	Cédula de Operación Anual
COV	Compuesto Orgánico Volátil
FE	Factores de Emisión
GEI	Gases de efecto invernadero
INDAPORT	Sistema de Indicadores Ambientales para el Sistema Portuario Español
INEM	Inventario Nacional de Emisiones de México 1999
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards (Normas Nacionales de Calidad de Aire, EUA)
NO _x	Óxidos de nitrógeno
NOMs	Normas Oficiales Mexicanas
O ₃	Ozono
Pb	Plomo
PM ₁₀	Partícula de materia menor a 10 micrómetros
PM _{2.5}	Partícula de materia menor a 2.5 micrómetros
ppb	partes por billón por volumen
ppm	partes por millón por volumen
PST	Párticulas Suspendidas Totales
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recurso Naturales
SMAIP	Sistema de Manejo Integral Sustentable del Recinto Portuario de Veracruz
SO ₂	Bióxido de azufre
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UV	Universidad Veracruzana

Resumen

Resumen

La estimación de emisiones atmosféricas es muy importante para dar cumplimiento a los reglamentos aplicables, así como para conocer el impacto potencial en la calidad del aire que se pudiera estar ocasionando debido a la exposición de los contaminantes.

El conocer los procesos y operaciones es fundamental para estimar las emisiones ya que dependiendo del tipo de industria se tienen que hacer consideraciones de diseño y de proceso para recopilar los datos de actividad.

Entre los diferentes métodos de estimación de emisiones, la aplicación de factores de emisión es la que más actividades abarca debido a que consiste en la recopilación de cientos de resultados de mediciones de emisiones realizadas a procesos y operaciones, lo que les permite ser representativos de una variedad amplia de fuentes que usan un mismo combustible, proceso y/o actividad. La fuente de información más completa y actualizada de factores de emisión específicos para distintos contaminantes atmosféricos es la publicación *AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors* así como el documento *WEB Factor Information Retrieval System (WEBFIRE)* [USEPA(2013)] que es una base de datos en línea que reúne factores de emisión de contaminantes del aire, tanto criterio como tóxicos.

Actualmente en México no se han desarrollado inventarios de emisiones atmosféricas en recintos portuarios aplicando factores de emisión, por lo que no se cuenta con una metodología establecida para estimar las emisiones producidas por las actividades portuarias. Ante esta situación existe la necesidad de adaptar alguna metodología de estimación internacional a las condiciones de nuestro País.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA) ha publicado guías para el desarrollo de inventarios de fuentes móviles en recintos portuarios aplicando factores de emisión desarrollados por la misma agencia o de estudios internacionales.

En este trabajo se revisaron las publicaciones disponibles referentes a la aplicación de factores de emisión en inventarios internacionales de recintos portuarios, se hizo una descripción de las metodologías propuestas para ejemplificar el uso de factores de emisión y se estimaron las emisiones para fuentes fijas de las calderas y el incinerador identificados en el recinto portuario estudiado conforme a lo siguiente:

La clasificación de las fuentes de emisión en un recinto portuario se dividieron en móviles y fijas de acuerdo con la U.S. EPA.

Con apoyo de la Administración Portuaria Integral de Veracruz (APIVER) se identificaron las fuentes de emisión del caso de estudio que fueron la actividad de un incinerador de residuos sólidos no peligrosos y tres calderas de tipo industrial de las cuales dos operan con gas natural y una con Diesel como combustible, así mismo se recabo información de los niveles de actividad para las fuentes de emisión identificadas.

El cálculo de emisiones procedentes de las fuentes fijas del caso de estudio se realizó con base en el consumo de combustible, las características del combustible y del equipo de combustión, la carga alimentada al incinerador y el uso de factores de emisión específicos para los equipos identificados.

Se utilizó la base de datos de factores de emisión actualizada (WEBFIRE U.S. EPA) disponible en el sitio web de la U.S. EPA para tomar los factores de emisión que fueron aplicados a las actividades portuarias identificadas como fuentes fijas.

Se ejemplificó la forma de aplicar los factores de emisión a los niveles de actividad facilitados por la APIVER.

Los resultados indican que las fuentes fijas del caso de estudio emiten los siguientes contaminantes en orden decreciente de cantidad:

- CO_2 , SO_2 , NO_x , PM y Pb cuando se trata de residuos incinerados,
- CO_2 , NO_x , CO, $\text{PM}_{\text{totales}}$, CH_4 , Pb, COV y SO_2 para el caso en el que el combustible que se consume es gas natural y
- CO_2 , NO_x , Pb, CO, SO_2 , PM, COT, CH_4 , COV, NMCO, SO_3 y CH_4 cuando se consume Diesel.

Este hecho está directamente ligado a la cantidad de consumo de combustible (Diesel o gas natural en el caso de las calderas) así como a las toneladas de carga destruida para el caso del incinerador.

También se propusieron dos ecuaciones alternativas basadas en el consumo de combustible para calcular las emisiones de buques y equipos de manipulación de carga, fundamentadas en las ecuaciones propuestas por las mejores prácticas de la U.S. EPA.

1 Introducción

Introducción

La estimación de emisiones atmosféricas tiene el propósito de conocer las cantidades y tipos de contaminantes descargados a la atmósfera por uno o varios tipos de fuentes. Dichas estimaciones se llevan a cabo utilizando diferentes técnicas de las cuales el uso de Factores de Emisión (FE) reportados en la literatura como por ejemplo los desarrollados por la Environmental Protection Agency (U.S. EPA) y otras agencias ambientales, ayudan a estimar de manera aceptable las emisiones por tipo de fuente en particular, además son importantes y de gran utilidad al momento de generar los inventarios de emisiones atmosféricas.

Las actividades que se desarrollan en un puerto en la actualidad giran en torno a la transferencia de carga entre los modos de transportes marítimos y terrestres; además, la carga y descarga de mercancías de los buques a las áreas de almacenaje y viceversa, incluyen manipulación, almacenaje, inspección y control de la mercancía por parte de las administraciones públicas, así como de otros servicios de gestión portuaria, estas actividades en su conjunto son conocidas como actividades portuarias y suponen en algunos casos importantes emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Dada la complejidad de las actividades portuarias aunado al hecho de que frecuentemente los FE son los únicos métodos disponibles para estimar las emisiones y que estos, a su vez, dependen de información específica de cada una de las actividades portuarias (tipo de equipos y maquinaria, edad y potencia de motores, tipo de combustible utilizado, entre otras); con la finalidad de obtener estimaciones de emisiones cercanas a la realidad, la problemática a resolver será ejemplificar la aplicación de FE a las emisiones producidas por las actividades portuarias del recinto portuario de Veracruz procurando seguir metodologías establecidas siempre y cuando tanto los datos de actividad como los de los FE lo permitan, en caso contrario se propondrá un método de estimación alternativo y se explicará su fundamento.

Meta

Ejemplificar la aplicación de FE a las actividades portuarias del recinto portuario de Veracruz basados en la información disponible sobre niveles de actividad en el periodo

del primero de enero de 2011 al treinta y uno de diciembre de 2011.

Objetivos

Revisar la información disponible con relación a la estimación de emisiones de recintos portuarios.

Investigar las distintas metodologías para la estimación de emisiones y los factores de emisión aplicables en recintos portuarios a nivel internacional.

Conocer la disponibilidad de la información proporcionada por la Administración Portuaria Integral del Puerto de Veracruz (APIVER).

Estimar las emisiones a la atmósfera para fuentes de contaminación específicas en el recinto portuario, como son las calderas y el incinerador.

Recomendar la información necesaria a recabar para futuras estimaciones aplicando FE en el recinto portuario.

2 Antecedentes

2.1. Emisiones Atmosféricas

2.1.1. Emisiones atmosféricas

La agencia de los Estados Unidos de Norteamérica Environmental Protection Agency (U.S. EPA) en el documento AP-42 utiliza el termino emisión para describir la contaminación descargada en la atmósfera (sean gases o partículas) por varias fuentes ya sea desde chimeneas de instalaciones industriales, comerciales o residenciales; de los escapes de vehículos con motor de combustión, locomotoras o aviones.

La emisión de contaminantes al aire es la descarga a la atmósfera de materia o energía que al incorporarse o adicionarse al ambiente son susceptibles de causar efectos que perjudican o molestan la vida, la salud y el bienestar humano y degradan la calidad del aire, del agua, del suelo y de los bienes de la nación o de particulares. [Bravo, Sosa (1997)]

Entonces, una emisión atmosférica debe entenderse como la descarga que incorpora sustancias que perturban la composición del aire limpio¹, que puede cuantificarse por tipo de contaminante y fuente que la origina y cuyos efectos sobre los seres vivos y el planeta en general han sido objeto de estudios y decretos tanto de científicos como de autoridades gubernamentales alrededor del mundo.

2.1.2. Fuentes de contaminación atmosférica

Una fuente de contaminación atmosférica es aquella de donde emanan los contaminantes y cuya clasificación esta relacionada con las actividades que los originan, partiendo de esto, una clasificación general consiste en dividir las fuentes en naturales y antropogénicas. Las fuentes antropogénicas pueden subdividirse en móviles o fijas y éstas, a su vez, pueden combinarse para formar lo que se conoce como fuentes indirectas o fuentes compuestas o fuentes indirectas-compuestas.

La U.S. EPA ha clasificado las fuentes naturales y antropogénicas en cuatro categorías:

¹El libro *Fundamentals of Air Pollution* [Boubel et al (1994)] señala que el aire limpio es un concepto, esto es que nunca sabremos la composición exacta del aire cuando los seres humanos y sus actividades no existían en la tierra, por lo que se sugiere que la composición, en partes por millón en volumen, de éste aire sin actividad humana sería de 780,000 de nitrógeno; 209,400 de oxígeno; 9,300 de argón, 315 de bióxido de carbón; 18 de neón, 5.2 de helio, 1.0 a 1.2 de metano; 1.0 de criptón; 0.5 de óxido nitroso; 0.5 hidrógeno; 0.08 de xenón y 0.02 vapores orgánicos.

de punto, móvil, de área y biogénicas. La tabla 2.1 muestra ésta clasificación con algunos ejemplos.

Tabla 2.1: **Clasificación de fuentes de contaminación atmosférica**

Fuentes de contaminación atmosférica	Descripción	Ejemplos
Fijas	Emiten contaminantes producto de actividades establecidas y cuyas cantidades de emisión son considerables de un análisis individual.	Chimeneas de plantas industriales, tanques de almacenamiento de hidrocarburos, incineradores, etc.
Móviles	Emiten contaminantes a lo largo de un recorrido resultado del desplazamiento proporcionado por una maquina de combustión interna (cuyo combustible generalmente es de origen fósil). Las hay de dos tipos: sobre carretera o fuera de carretera.	En carretera: Automóviles, autobuses, camiones de carga, motocicletas. Fuera de carretera: Trenes, aviones, buques, tractores, grúas, excavadoras, podadoras, etc.
De área o compuestas	Emiten contaminantes por muchas pequeñas actividades que de forma individual serían despreciables pero que en conjunto suman emisiones totales considerables.	Gasolineras, terminales de autobuses, recintos portuarios, aeropuertos, tiendas de autoservicio, tintorerías, plantas de proceso; las fuentes de área incluyen también quema a cielo abierto asociada a la agricultura, manejo forestal y las actividades de desmonte.
Biogénicas o naturales	Son aquellas cuyos contaminantes emitidos son el resultado de procesos naturales.	Erupciones volcánicas, incendios forestales, emisión de partículas de polen, erosión de suelo por el aire, etc.

Clasificación de fuentes de contaminación U.S. EPA

2.1.3. Tipos de contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos se clasifican de acuerdo a su **origen**, por su **estado físico** y por su **composición química**.

De acuerdo con su origen, los contaminantes atmosféricos están clasificados en *primarios* y *secundarios*:

Los contaminantes primarios son emitidos directamente por la fuente natural o antropogénica y se encuentran en la atmósfera, en su mayor parte, en la misma forma en la que fueron emitidos, por ejemplo óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), monóxido y bióxido de carbono (CO y CO₂), aerosoles y otros menos frecuentes como halógenos y sus derivados (Cl₂, HF, HCl,

haluros,...), arsénico y ciertos compuestos orgánicos y metales pesados como plomo (Pb), mercurio (Hg), cobre (Cu), zinc (Zn) y otros.

Los contaminantes secundarios son aquellos que se forman en la atmósfera como resultado de la reacción entre contaminantes primarios o la de un contaminante primario con algún componente natural de la atmósfera (agua, energía solar, etc); dichas reacciones podrían ser foto-químicas o no foto-químicas por ejemplo hidrólisis u oxidación. Estos contaminantes comprenden al ozono (O₃), aldehídos, cetonas, ácidos, peróxido de hidrógeno, nitrato de peroxiacetilo, radicales libres y otros de diverso origen como sulfatos y nitratos etc.

Por su estado físico los contaminantes pueden ser clasificados como *gases* y *partículas*, las cuales incluyen sólidos y líquidos:

Los contaminantes gaseosos presentes en la atmósfera se comportan como el mismo aire, esto es, una vez difundidos no tienden a depositarse. Los contaminantes gaseosos más comunes son el CO₂, CO, HC, NO_x, SO_x y O₃. Diferentes fuentes producen estos compuestos químicos pero la principal fuente antropogénica es la quema de combustible fósil debido al contenido en masa que pueden tener de nitrógeno (N), azufre (S), carbón (C) y metales pesados entre otros.

Las partículas (PM) son partes muy pequeñas de materia sólida o líquida que están suspendidas en la atmósfera en forma de *aerosol atmosférico*². La composición de los aerosoles y de las partículas depende del tipo de fuente, ya sea de origen natural³ o de origen antropogénico⁴ o de cualquiera de las fuentes mencionadas, tal es el caso de la materia orgánica que puede ser contaminante primario o secundario, este último derivado de la oxidación de los compuestos orgánicos volátiles (COV). La clasificación PM₁₀ es la magnitud de las partículas en la atmósfera con un diámetro menor o igual a 10 micrómetros. PM_{2.5} es una medida de partículas en el aire con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros. Los efectos negativos que puede tener sobre la salud o el bienestar son principalmente las afecciones respiratorias de humanos y animales así como los efectos visuales provocados por la contaminación de partículas de bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, polvo mineral, materia orgánica y carbono elemental también conocido como negro de carbón u hollín. La figura 2.1 muestra una distribución de tamaño de las partículas en la atmósfera.

²En ingeniería ambiental, se denomina aerosol a una mezcla heterogénea de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas, en este caso el aire. El término aerosol se refiere tanto a las partículas como al gas en el que las partículas están suspendidas. El tamaño de las partículas puede ser desde 0,002 µm a más de 100 µm. *Glosario. GreenFacts (Consultado el 06-05-2012)*

³Óxidos minerales y otros materiales que salen de la corteza terrestre; la sal del mar que incluyen cloruro de sodio, magnesio, sulfatos, calcio, potasio y compuestos orgánicos

⁴partículas que se derivan de la oxidación de gases primarios tales como azufre y óxidos de nitrógeno en ácido sulfúrico y ácido nítrico

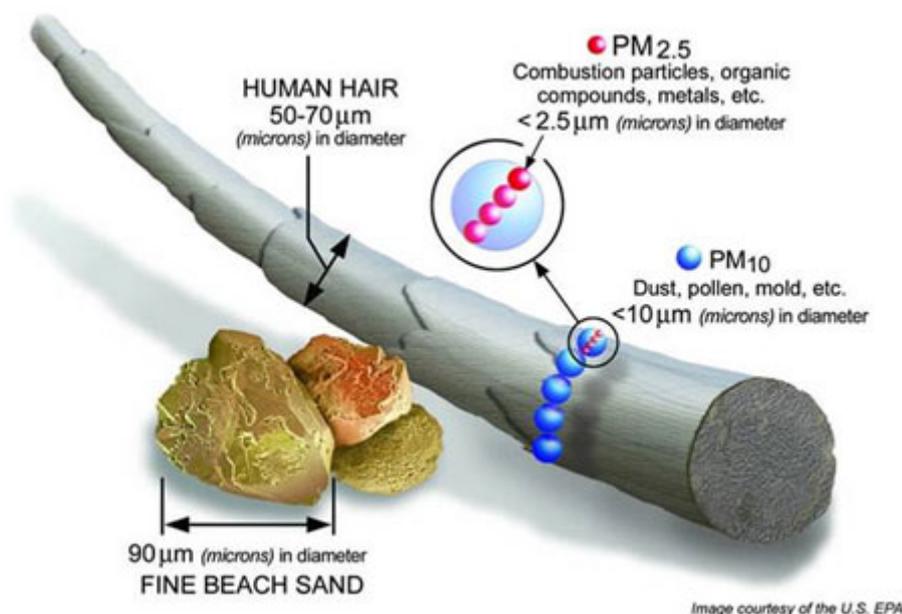


Figura 2.1: Clasificación de partículas [U.S. EPA (2012)]

Por su composición química, los contaminantes pueden ser clasificados en *orgánicos* e *inorgánicos*:

Los contaminantes orgánicos se pueden definir como aquellos que contienen carbono e hidrógeno, pudiendo contener, además, otros elementos⁵. Se pueden dividir en dos grupos, hidrocarburos y halocarburos. Dentro de los hidrocarburos, los más importantes son los COV presentes en la atmósfera en fase vapor; estos, excepto el metano, se encuentran relacionados con los procesos de producción de ozono en la troposfera. Los halocarburos son los principales responsables de la desaparición del ozono estratosférico, se clasifican en función del grupo halogenado que contenga: clorofluorocarbonos (CFCs), hidrofluorocarbonos (HFCs) y halones (que contiene bromo), proceden principalmente de la síntesis industrial.

Los contaminantes inorgánicos incluyen los compuestos simples de carbono como CO y CO₂, partículas metálicas de las cuales las más peligrosas son las Hg, berilio (Be), Pb, cadmio (Cd), níquel (Ni) y antimonio (Sb); partículas de óxidos de azufre (SO₂ y SO₃), de óxidos de nitrógeno (N₂O, NO y NO₂) y de compuestos halogenados que incluyen todos los derivados de flúor (F), cloro (Cl) y bromo (Br) de los cuales los más abundantes son: Cl₂, F⁻, HCl, freones y pesticidas y herbicidas halogenados.

2.1.4. Contaminantes criterio

El estudio riguroso de los contaminantes y los efectos que estos causan a la salud humana comenzó en América con los estudios hechos por la U.S. EPA y con las

⁵Cabe mencionar que la distinción con los compuestos inorgánicos que también contienen carbón e hidrógeno radica en la naturaleza del enlace químico por el cual están formados estos compuestos.

enmiendas⁶ a la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act 1970) en las que se “exige” a la U.S. EPA establecer Normas Nacionales de Calidad de Aire (NAAQS, por sus siglas en inglés) para determinados contaminantes conocidos por ser peligrosos para la salud humana. En consecuencia y con el fin de proteger la salud humana y el bienestar, la U.S. EPA identificó y estableció normas de calidad de aire para seis contaminantes: ozono, monóxido de carbono, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre (SO₂), óxido de nitrógeno (NO) y plomo .

El término "contaminantes criterio" deriva del hecho de que la U.S. EPA describió las características y efectos nocivos de estos contaminantes de tal forma que es sobre la base de estos criterios que se revisan y se fijan las normas de emisión de contaminantes criterio.

En México los contaminantes criterio que son susceptibles de normativa oficial son:

- Bióxido de azufre (SO₂)
- Bióxido de nitrógeno (NO₂)
- Partículas (PM, PM₁₀ y PM_{2.5})
- Ozono (O₃)
- Monóxido de carbono (CO) y
- Plomo (Pb)

Las unidades en que se cuantifican los contaminantes en las normas oficiales son partes por millón por volumen (ppm), partes por billón por volumen (ppb) y microgramos por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para partículas.

Las normas oficiales de calidad de aire son recomendaciones que establecen las concentraciones máximas de exposición a contaminantes atmosféricos que se permiten durante un lapso de tiempo definido, a fin de reducir los riesgos y proteger de los efectos nocivos en la salud humana y en el ambiente. [INE(2012)]

2.1.5. Gases de efecto invernadero

Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) son gases que están presentes en la atmósfera terrestre y que actúan de tal forma que impiden que el calor se escape al espacio. Los GEI claves son: bióxido de carbono (CO₂); metano (CH₄); óxido nitroso (N₂O); hidrofluorocarbonos (HFC); perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

La existencia en la atmósfera de algunos de los GEI es inherente a la naturaleza del planeta, sin embargo las actividades humanas han aumentado la concentración de estos gases de manera significativa lo que ha provocado que la temperatura de la superficie terrestre esté subiendo por encima de niveles anteriores de los que se tenga registro.

⁶Propuesta que se hace a un conjunto de representantes políticos para modificar una ley u otro texto legal y que ha de ser aprobada mediante votación.

El 17 de abril de 2009, Lisa Jackson administradora de la U.S. EPA firmó el pronunciamiento “**Endangerment Finding**”, el cual determinó que las concentraciones actuales y proyectadas de los seis GEI claves en la atmósfera tienen un efecto negativo en el planeta y amenazan la salud pública y el bienestar de las generaciones actuales y futuras. [USEPA(2010a)]

De acuerdo a la U.S. EPA, las emisiones de gases de efecto invernadero generados directa e indirectamente por una entidad federal se pueden clasificar en "ámbitos", basada en la fuente de las emisiones:

Emisiones de ámbito 1: son las emisiones directas de GEI procedentes de fuentes que son propiedad o están controladas por la entidad. Incluyen las emisiones procedentes de los combustibles fósiles quemados en el lugar, las emisiones de los vehículos de propiedad de entidad o entidades en régimen de arrendamiento y otras fuentes directas.

Emisiones de ámbito 2: son emisiones indirectas resultantes de la generación de electricidad, combustión y refrigeración, o el vapor generado para la entidad.

Emisiones de ámbito 3: incluyen las emisiones indirectas procedentes de fuentes que no son propiedad o no están controladas directamente por la entidad, pero que de alguna forma se relacionan con las actividades de la entidad. Otras fuentes que se encuentran actualmente como opcionales y que la U.S. EPA está considerando en la contabilidad de su inventario, incluye cadenas de suministro de los proveedores, servicios de entrega, actividades sub contratadas y actividades en el sitio de remediación. [USEPA(2010a)]

2.1.6. Medición y estimación de emisiones

La experiencia internacional resalta la importancia de elaborar inventarios o registros de emisiones, donde además de incluir el tipo y cantidad de sustancia emitida, se señale la fuente generadora y su ubicación reiterando que deben de realizarse a nivel de sustancia, ya que solo de esta forma es posible realizar su seguimiento a lo largo de su ciclo de vida y evaluar con claridad sus efectos en el ambiente.

Las unidades en que se expresan normalmente las emisiones relacionan la masa del contaminante por el tiempo que son descargadas al aire. Así la ecuación 2.1 describe esa relación para cuantificar las emisiones al aire.

$$Emisiones = \frac{\text{masa del contaminante}}{\text{tiempo de emisión}} \quad (2.1)$$

Se han desarrollado diferentes métodos para cuantificar emisiones contaminantes, que en términos generales se diferencian en directos e indirectos o de estimación.

La medición directa de sustancias en la fuente de emisión resulta el método más confiable para determinar las cantidades de emisión. Por lo tanto, cuando es posible obtener los datos de esta manera, siempre es preferible medir en vez de estimar. Sin embargo, la medición directa de emisiones implica procedimientos de muestreo, personal especializado y requerimientos de equipos e instrumentos analíticos, lo que resulta en costos adicionales a quien efectúa la medición directa o a quien la solicita. [SEMARNAT(2001)]

Las emisiones a la atmósfera se estiman mediante su cálculo ya sea por cálculo estequiométrico, cálculos de ingeniería, aplicación de factores de emisión, balances de materia, datos históricos de muestreo en fuente o modelos matemáticos. La tabla 2.2 muestra las diferencias significativas entre cada uno de los métodos de estimación. Cabe mencionar que la medición directa o la estimación de sustancias contaminantes en la fuente se realiza con diferentes propósitos y que de estos depende en gran medida el método que se elija para cuantificar las emisiones atmosféricas.

Tabla 2.2: Comparación de los distintos métodos de estimación de emisiones contaminantes SEMARNAT.

MÉTODO	CONTAMINANTE	ESCALA ESPACIAL	TIEMPO REQUERIDO	FACTOR ECONÓMICO
Medición directa	Se tiende a cubrir contaminantes específicos	Se aplica a una etapa del proceso o a un punto de emisión en particular	El necesario para mediciones y análisis	Alto costo en función del número de mediciones
Factores de emisión	Depende de los datos existentes	Se aplica a todas las escalas	Depende de la existencia del factor y la accesibilidad de la información de los niveles de actividad	Bajo costo
Datos históricos	Procesos conocidos	Para procesos o puntos específicos	Depende del proceso y la accesibilidad de la información de los niveles de actividad	Alto costo por acceso a la información
Balance de materiales	Requiere conocimiento del proceso y de las reacciones	No tiene alta resolución espacial	Depende de la experiencia y complejidad del proceso	El costo se mide en función del tiempo de análisis
Cálculos de ingeniería	Siempre aplica	Siempre aplica	Depende de la experiencia y datos disponibles	El costo se mide en función del tiempo de análisis
Modelos matemáticos	Requiere conocimiento del proceso y reacciones	Para puntos específicos	Depende de la experiencia y datos disponibles	El software por lo general es costoso y es necesario que los aplique una persona con experiencia en su manejo.

[SEMARNAT(2001)]

2.1.7. Inventarios de emisión

Un inventario de emisiones es una herramienta de gestión ambiental, la cual lista las estimaciones de las cantidades de contaminantes emitidas de todas las fuentes durante un periodo de tiempo en una determinada área de estudio. [INE(2009a)]

A continuación se lista el procedimiento general para desarrollar un inventario de emisiones :

1. Identificar el alcance y definir las características específicas del inventario.
2. Establecer los límites del área a considerar para conocer las fuentes causantes de las emisiones contaminantes así como el periodo de tiempo de la estimación.
3. Determinar las fuentes de información para el inventario y seleccionar las técnicas y métodos de estimación de emisiones.
4. Identificar las fuentes de contaminación existentes en el área y clasificarlas.
5. Determinar el tipo de contaminantes que son emitidos.
6. Revisar en la literatura los factores de emisión del contaminante emitido asociado al tipo de fuente localizada en el área.
7. Determinar el número y tamaño de cada fuente así como los datos de actividad; en el caso de industrias es la capacidad de producción, para los combustibles es común manejar su consumo, etc.
8. Realizar la estimación de las emisiones a la atmósfera multiplicando los valores encontrados en 6 y 7.
9. Llevar a cabo actividades de aseguramiento de la calidad
10. Evaluar la congruencia e incertidumbre de los resultados
11. Resguardar la información
12. Documentar los resultados

El alcance de un inventario de emisiones determina las características y los contaminantes a estimar, por ejemplo:

- **Escala geográfica:** Nacional, regional, estatal, municipal, por instalación industrial, etc.
- **Escala temporal:** Anual, mensual, trianual, etc.
- **Tipo de contaminantes:** Criterio, tóxicos, gases de efecto invernadero, etc.

- **Tipos de fuentes de emisión:** Fuentes de área, Fuentes móviles, Fuentes móviles que no circulan por carretera, Fuentes naturales, Fuentes fijas.

Dependiendo del propósito del inventario, se definirán sus características y grado de detalle. Sin embargo, la metodología general para elaborar inventarios de emisiones es independiente del tipo de contaminantes, la escala temporal y espacial y las fuentes consideradas.

Algunas de las aplicaciones de los inventarios de emisiones incluyen:

- Estimar los efectos de las emisiones atmosféricas en la calidad del aire a través de estudios de modelación
- Estimar los cambios en las emisiones de las fuentes bajo distintos esquemas de regulación ambiental
- Detectar variaciones en los niveles de emisión a través del tiempo
- Identificar la contribución a las emisiones totales de las diferentes fuentes de emisión
- Desarrollar inventarios de emisiones integrados por sector económico o zona geográfica para identificar oportunidades y requerimientos para el intercambio de emisiones a través de bonos de emisión.

La U.S. EPA reúne una serie de grupos técnicos, conocidos como **Technology Transfer Network** (TTN), los cuales contienen información sobre distintas áreas en relación con la contaminación atmosférica; a nivel científico, tecnológico, de regulación, medida y prevención. Uno de ellos es el **Clearing House for Inventories and Emission Factors** (CHIEF), el cual contiene la última información disponible sobre inventarios de emisiones y factores de emisión. Este grupo, entre otras cosas, da acceso a distintas herramientas e información para poder realizar estimaciones de contaminantes atmosféricos y desarrollar inventarios atmosféricos. [Guevara(2010)]

Entre los documentos y herramientas destacan los siguientes:

1. El *Emission Inventory Improvement Program* (EIIP), establecido en el año 1993 con el objetivo de promover el desarrollo y el uso de procedimientos estándares para recopilar, calcular, reportar y compartir datos referentes a emisiones atmosféricas.
2. El AP-42, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, publicado desde 1972 como la compilación de toda la información de U.S. EPA relativa a factores de emisión. Contiene factores de emisión e información de más de 200 categorías de fuentes de contaminación.
3. El sistema de información *Factor Information Retrieval* (FIRE), que contiene todos los factores de emisión estimativos recomendados por U.S. EPA y que permite un fácil acceso a los factores de emisión obtenidos en el AP-42.

4. La base de datos SPECIATE, donde se recogen los perfiles de caracterización de los Compuestos Orgánicos Totales (COT) y PST para distintas fuentes. Esta información permite, entre otras cosas, estimar emisiones atmosféricas tóxicas y peligrosas derivadas del total de las emisiones primarias de COT y PST.

En México, en el periodo 1995-2000 el Instituto Nacional de Ecología, con el apoyo técnico y financiero de la U.S. EPA y la Asociación de Gobernadores del Oeste (WGA, por sus siglas en inglés), desarrolló y aplicó por primera ocasión en México una metodología adecuada a las condiciones particulares del país para desarrollar los inventarios de emisiones; como parte de este proyecto se elaboraron los primeros manuales técnicos para su aplicación, lo cual ha permitido unificar los criterios y métodos de estimación de las emisiones, para que los inventarios sean comparables en el tiempo y entre lugares diferentes. [INE(2009a)]

El INE ha desarrollado guías y manuales para el fortalecimiento de capacidades en la elaboración de inventarios de emisión en México que detallan las etapas de la elaboración de inventarios de emisiones.

En México, existen inventarios de emisiones a nivel local para varias zonas metropolitanas y estados, que han servido como fundamento para desarrollar los distintos Programas para Mejorar la Calidad del Aire existentes en México. Asimismo, en la Zona Metropolitana de la ciudad de México, el inventario de emisiones es un instrumento que se actualiza periódicamente y que puede ser consultado en línea por el público en general.

La elaboración de un inventario de emisiones desagregado, preciso y actualizado es una tarea compleja que demanda la integración sistemática de la información en un marco de concurrencia institucional entre el gobierno local y federal. Por lo general, se parte de un inventario base, que con el tiempo se va mejorando y actualizando con información de mejor calidad y más específica.

2.2. Factores de emisión

De acuerdo a la SEMARNAT (tabla 2.2), el método de factores de emisión (FE) es el más común y fácil de usar para cuantificar las emisiones de contaminantes atmosféricos generados en la fuente, por su fácil acceso, simplicidad de uso y bajo costo, ya que es aplicable a cualquier tipo de emisión y a todas las escalas para la estimación de emisiones. [SEMARNAT(2001)]

No obstante, el uso correcto de FE no es una tarea sencilla ya que requiere, en primera instancia, de la existencia de FE que apliquen a la fuente de emisión en estudio y el conocimiento de información específica como tiempo de operación, equipo de proceso y/o control, condiciones de operación, características de materia prima y/o combustibles y, en segundo lugar, de que el usuario de los FE tenga conocimiento de como fueron creados estos, la incertidumbre asociada y sus limitaciones para ser aplicados. [Cureño et al (2012)]

La ecuación general para estimar las emisiones con factores de emisión es la siguiente:

$$E = FE \times NA \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (2.2)$$

Donde:

E = emisión del contaminante;

FE = factor de emisión;

NA = nivel de actividad;

ER = eficiencia de reducción de emisiones de un equipo de control, expresada en porcentaje (si no existe equipo de control, ER=0)

El FE es un valor promedio que relaciona la cantidad de masa de contaminante emitido a la atmósfera con la actividad asociada a la emisión de ese contaminante. Estos factores se expresan generalmente como la masa de contaminante dividido por una unidad de masa, volumen, distancia o duración de la actividad que emite dicho contaminante (por ejemplo, kilogramos de partículas emitidas por tonelada de carbón quemado). [USEPA (2013)]

Los FE son el resultado de promediar todos los datos disponibles de calidad aceptable de todas las instalaciones o equipos existentes para determinado tipo de contaminante y fuente de emisión, por lo que cabe mencionar que los FE son valores representativos de toda la población ya sea para un tipo de fuente, para una instalación o para un equipo en específico.

El objetivo de utilizar factores de emisión es la de facilitar la estimación de las emisiones procedentes de diversas fuentes de contaminación del aire.

2.2.1. Desarrollo de factores de emisión.

En 1972 la U.S. EPA publicó el primer documento que contiene FE recomendados y la documentación de apoyo (*Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources (AP 42)*).

El procedimiento para el desarrollo y la evaluación de los FE para fuentes fijas se describe a continuación [USEPA(2010c)]:

1. **Recolección de datos.** Se realiza una recopilación de datos históricos de la fuente de emisión o muestreos hechos en fuente en instalaciones industriales de la misma categoría, por ejemplo las industrias de generación eléctrica que utilizan combustóleo; luego se elaboran informes de emisión y actividad para formar un conjunto de *datos candidatos* a los que posteriormente se les evalúa su calidad.
2. **Evaluación de calidad de los datos de prueba.** Para efectuar la evaluación de la calidad de los datos de emisión obtenidos se siguen los siguientes criterios: *Funcionamiento del proceso, Método de ensayo y procedimiento de muestreo, Procesamiento de la información y Análisis y cálculos.* A estas variables se les asigna una puntuación numérica (calificación de prueba individual (ITR por su siglas en inglés)).
3. **Procedimientos de límite de detección.** Una vez que los datos del muestreo fueron recolectados y aprobados, se determina si alguno de los nuevos datos están por debajo del límite mínimo de detección (MDL⁷). Sin embargo, hay casos en los que algunos o todos los datos de las emisiones recolectadas están por debajo del MDL, en esta situación se han desarrollado procedimientos específicos para incluirlos en el desarrollo de FE.
4. **Identificación de los datos atípicos.** Después de que se han hecho los procedimientos de límite de detección, los datos candidatos se sujetan a pruebas de valores atípicos estadísticos para determinar cuales valores de datos se deben eliminar o no. Un valor atípico se refiere a uno o más puntos de datos que no se ajustan al patrón estadístico establecido para otros datos considerados para el mismo proceso que pueden ser causados por una condición inusual no representativa en las emisiones del proceso. Para el desarrollo de FE se utiliza la prueba de Dixon Q o la prueba de Grubbs.
5. **Calcular el valor del FE y asignar una calificación de calidad.** El valor final del FE se basa en el promedio del total de datos de fuentes individuales en la categoría de fuente para la cual se está desarrollando el FE, y la calificación de la calidad obtenidos de los datos de prueba individuales (ITR).

De acuerdo con Cureño [Cureño (2010)] para desarrollar los FE de una Central Termoeléctrica en México se tomaron en cuenta las variaciones en las condiciones de operación como son: la carga, el consumo y la calidad del combustóleo; el tipo de

⁷El MDL se define por la USEPA como “la concentración mínima de una sustancia que puede ser medida con un método analítico fiable que puede distinguir de cero a partir de la señal del instrumento producido por una muestra en blanco y es reportada con 99 por ciento de confianza”

configuración del quemador; la verificación de equipos, operaciones y procesos en la planta; la supervisión de muestreos en fuente y la calibración de los instrumentos de medición de emisiones.

2.2.2. FE basados en procesos y basados en censos.

Los FE se pueden clasificar en dos tipos: los basados en procesos y los basados en censos [WGA(1996)].

Los FE basados en procesos se usan para desarrollar estimaciones de emisiones de fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados de una encuesta o de un balance de materiales; los resultados de muestreos de “fuentes representativas” se usan para desarrollar FE basados en procesos, para dispositivos o procesos similares. Estos factores se expresan en la forma general de masa de contaminante emitido por unidad de proceso. Entre las unidades de actividad de proceso más comunes se encuentran el consumo de energía, el rendimiento de materiales, las unidades de producción, el número de dispositivos o las características de éstos.

Los FE basados en censos se usan a menudo para hacer estimaciones de emisiones de fuentes de área ya que es un método eficiente para tipos de fuentes emisoras dispersas y numerosas que no se pueden caracterizar rápidamente conociendo las tasas de proceso, de consumo de combustible y/o de alimentación de materiales. La desventaja de usar FE existentes basados en censos es que la mayor parte de ellos fueron desarrollados en EU o en Europa y es posible que no representen las condiciones socioeconómicas y las prácticas de control en México. Es importante recordar que los factores de emisión basados en censos son más exactos cuando se aplican a toda la región para la que el factor de emisión fue desarrollado que cuando se aplica a regiones más pequeñas.

2.2.3. Limitaciones de los factores de emisión.

Al momento de desarrollar un factor de emisión se especifica bajo que circunstancias es aplicable y la calidad que presenta, así como sus limitaciones, esto con la finalidad de hacer una correcta estimación por FE u optar por algún otro método de estimación.

Con el objetivo de hacer un uso correcto de los FE se deben atender las siguientes observaciones:

1. Los FE no son utilizados para establecer los límites máximos permisibles de emisión en el caso de regulación y cumplimiento, ya que como se mencionó el factor de emisión es sólo el promedio de un intervalo de emisiones.

2. Los FE no deben ser considerados para calcular emisiones si se pueden llevar a cabo monitoreos en fuente o contar con un sistema de monitoreo continuo de emisiones que proporcione información confiable y representativa.
3. Los balances de materia para algunas fuentes pueden proporcionar una mejor estimación de las emisiones que los FE, inclusive que hasta los monitoreos en fuente. Los balances de materia son apropiados en situaciones en las que se pierde un alto porcentaje de materia a la atmósfera (por ejemplo, el azufre en el combustible, o pérdida de solvente en un proceso de revestimiento no controlado). En cambio los balances de materia son inapropiados cuando el material es consumido o químicamente combinado en el proceso o cuando las pérdidas a la atmósfera son una pequeña parte del rendimiento total del proceso. Como el término lo dice, para llevar a cabo correctamente el balance de materia se necesita conocer muy bien la cantidad de material que entra y sale del proceso.
4. Se recurrirá al uso de FE si no se pueden obtener los datos representativos de las emisiones en la fuente o también si no se cuenta con la posibilidad de obtener la información a través de la documentación y garantías de los equipos que proporcionan los proveedores, en las que se especifiquen la reducción en las emisiones o datos de pruebas reales en equipos similares.

Cabe mencionar que los FE son útiles para llevar a cabo alguna toma de decisiones cuando no se cuenta con la información disponible de las emisiones de contaminantes, por ejemplo en las evaluaciones de impacto ambiental, las cuales previamente a que una instalación industrial se establezca, se estima cual sería el impacto potencial en la calidad del aire por una o varias fuentes de contaminación. En este caso, en donde las fuentes de contaminación ni siquiera existen, obviamente no es posible realizar muestreos en fuente alguno, por lo que el uso de factores de emisión es una herramienta excelente.

Cuando se utilizan factores de emisión es necesario considerar las limitaciones e imprecisiones que arroja en su utilización. Por lo tanto es necesario evaluar si es mejor hacer un muestreo en fuente, pese a los gastos que se incurren para llevarlo a cabo, con la ventaja de que las estimaciones de las emisiones obtenidas son de mayor precisión que si se utilizara un método de bajo costo como es el uso de factores de emisión.

2.2.4. Evaluación de la calidad de los factores de emisión.

Para poder evaluar los FE es necesario conocer cómo fueron obtenidos los datos con los que se va a trabajar para desarrollar el factor de emisión. Estos datos pueden ser obtenidos a través de muestreos en fuente, reportes y por información histórica de emisiones en la fuente.

La manera en como la U.S. EPA evalúa los factores de emisión presentados en el AP-42 [USEPA (2013)], es un tanto subjetiva; sin embargo, es necesario realizar esta evaluación

del factor de emisión, para tener las bases para excluir datos que no posean calidad cuando se tengan datos suficientes de calidad óptima.

Un aspecto importante para evaluar la calidad de los datos es conocer la técnica con que se realiza el muestreo. Una vez hecho el muestreo es necesario que toda la información esté documentada para su posterior validación y que los reportes de los muestreos contengan la hoja de datos crudos para así analizarlos y llevar a cabo los cálculos respectivos.

Esta evaluación va a depender de la persona que los evalúa, el conocimiento que tenga sobre los datos y la validez que le quiera dar. Además es muy importante la formación profesional de las personas que desarrollen y apliquen factores de emisión.

Por lo general el autor del factor de emisión se debe basar en los siguientes puntos para poder calificarlo correctamente, lo cual va a depender de la cantidad y calidad de los datos disponibles:

- Que se tenga bien identificado y descrito el proceso del cual se obtuvo la información.
- Que los datos estén reportados en unidades congruentes o en su defecto que puedan ser convertidas a unidades congruentes.
- Que los métodos de prueba para cada factor de emisión se hayan hecho con el mismo procedimiento.
- Conocer si los datos de emisiones fueron obtenidos funcionando algún equipo de control o no. En caso de que se tenga algún equipo de control, es necesario que se reporten las especificaciones de éste.

Una vez que se hayan identificado estos puntos y descartado la información que no cumpla con los requisitos, entonces se prosigue a dar un valor a los datos recolectados para generar los FE, que va de la "A" a la "D"

- A** Pruebas en el mismo punto de emisión con una metodología autorizada y cuentan con suficiente información detallada para su adecuada validación.
- B** Pruebas con una metodología aceptada pero no se cuenta con resultados suficientemente detallados para una validación adecuada.
- C** Pruebas con una metodología nueva o no autorizada según la normativa vigente y/o no se cuenta con suficiente información para su validación.
- D** Pruebas con una metodología no aceptada pero que puede ser usada para establecer el orden de magnitud de la emisión.

Una vez especificada la calidad de los datos obtenidos se prosigue a desarrollar el factor de emisión para posteriormente calificarlo y validarlo. Debido a que la calificación que se le da a un factor de emisión es subjetiva, es necesario que el criterio para poder calificar

la información disponible para desarrollar los FE esté bien documentada. Por lo tanto la información que se debe de especificar en estos criterios es:

- Número de instalaciones muestreadas;
- Número total de instalaciones en el País.
- Intervalo de emisiones en el País (máximo y mínimo);
- Intervalo de emisiones para cada instalación muestreada (máximo, mínimo, y número de muestreos);
- Una descripción de cómo la muestra fue seleccionada y si esto puede causar un sesgo en los datos.

Los FE de cada uno de los diferentes contaminantes emitidos para cada uno de los puntos de emisión asociados a un proceso industrial tienen que ser agrupados en una tabla con su respectivo grado de confiabilidad. El uso de intervalos de confianza puede ser más conveniente como una medida cuantitativa de la confiabilidad de un factor de emisión que utilizar letras para calificarlo. Sin embargo debido a la forma en la que el factor de emisión es generado, no se pueden utilizar los intervalos de confianza a menos que se cumplan las siguientes condiciones:

- Cuando la muestra de la fuente con la cual se obtuvo el factor de emisión sea representativa de la población total de este tipo de fuentes.
- Cuando los datos que se obtuvieron en una de las fuentes sean representativos dentro de la fuente seleccionada.
- Cuando el método de medición se aplique correctamente en cada prueba.

Los intervalos de confianza son poco prácticos para un factor de emisión debido a la difícil tarea de asignar un límite de confianza significativo a las variables antes mencionadas, así como en la determinación de las características del combustible. Por lo tanto, algunas calificaciones subjetivas son necesarias; por lo que los factores de emisión se clasifican de la “A” a la “E” y esta evaluación es aplicada para cada factor de emisión [USEPA (2013)]. Esta clasificación toma en cuenta la cantidad y la calidad de los datos con los cuales los factores de emisión son calculados.

A = Excelente. El factor de emisión es desarrollado principalmente de pruebas A y B tomadas de varias instalaciones de manera aleatoria.

B = Arriba del promedio. El factor de emisión es desarrollado principalmente de pruebas A o B tomadas de una moderada cantidad de instalaciones. Aunque no es evidente un sesgo, no está claro si las instalaciones muestreadas presentan muestras aleatorias de la industria.

C = Promedio. El factor de emisión es desarrollado principalmente de pruebas A, B y C de un número razonable de instalaciones. Aunque no es evidente un sesgo, no está claro si las instalaciones muestreadas presentan muestras aleatorias de la industria.

D = Debajo del promedio. El factor de emisión es desarrollado principalmente de pruebas A, B y C tomadas de un número pequeño de instalaciones y puede haber razón para suponer que estas instalaciones no presentan muestras aleatorias de la industria.

E = Pobre. El factor de emisión es desarrollado de pruebas C y D de un número muy pequeño de instalaciones y puede haber razón para sospechar que las instalaciones muestreadas no presentan muestras aleatorias de la industria.

Aunque esta clasificación no representa un intervalo de confianza, son utilizados para tener una idea general de la calidad de los factores de emisión.

2.2.5. Incertidumbre de los factores de emisión.

En general son dos los factores que influyen en la incertidumbre de un FE, la cantidad y la calidad de los datos obtenidos de pruebas realizadas a los distintos tipos de fuentes de emisión.

La U.S. EPA ha reconocido una serie de factores que contribuyen a la incertidumbre final de un valor asignado a un FE :

- Los FE son medias aritméticas de los datos disponibles de las pruebas hechas a una fuente,
- se basan en un número limitado de pruebas de emisiones,
- representan sólo unas pocas horas de tiempo de proceso por prueba de funcionamiento,
- representan intervalos limitados de las condiciones de operación del proceso, y
- representan una muestra limitada de las unidades operativas dentro de cualquier categoría de fuente.

Salvo algunos casos (por ejemplo el listado de FE de del reporte ENTEC) actualmente no se encuentra disponible una cuantificación estadística de la incertidumbre de los FE del AP-42, el hecho de que se utilicen letras para calificar un FE implica que no se le provea de una cantidad de incertidumbre lo que repercute en la interpretación de las estimaciones por FE de los inventarios de emisiones. [Hunt et al (2012)]

En 2006 la U.S. EPA comenzó hacer estudios para establecer un sistema de calificación que provea intervalos cuantitativos de incertidumbre. Un estudio al respecto se basa en la cuantificación de la incertidumbre para las emisiones de NO_x por las chimeneas de

unidades de generación eléctrica cuyos resultados asignan un intervalo de incertidumbre porcentual para la calificación de los FE dentro de los intervalos de confianza que van de la letra A a la E mencionados anteriormente.

2.2.6. Aplicaciones.

Los FE ayudan a estimar de manera aceptable las emisiones emitidas por un tipo de fuente en particular, además son de gran utilidad al momento de generar los inventarios para estimar algunas de las emisiones que se reportan en ellos.

En México se han utilizado los FE para elaborar documentos tales como El Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999, los inventarios de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México así como también otros inventarios, la mayor parte de las emisiones reportadas fueron obtenidas utilizando los FE de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA).

Cuando se siguen los procedimientos adecuados para calcular las emisiones con FE y teniendo en cuenta como éstos fueron desarrollados, los inventarios resultantes llegan a estar aproximados a la realidad.

A manera de ejemplo se presenta el uso de factores de emisión para un proceso de combustión que utiliza gas natural como combustible:

Ejemplo: Estimación de las emisiones de contaminantes criterio que una termoeléctrica de ciclo combinado genera en dos turbinas a gas, las cuales poseen un recuperador de calor en el escape que sirve para generar vapor de alta presión, que posteriormente pasa a una turbina de vapor. Se utilizaron FE del AP-42 de la U.S. EPA. (ejemplo tomado de *Guía para la correcta selección y empleo de métodos de estimación de emisiones contaminantes* [SEMARNAT(2001)])

Solución: En México de acuerdo al formato COA (Cédula de Operación Anual) la metodología utilizada para la estimación de emisiones atmosféricas presenta la siguiente secuencia de pasos:

1. Descripción del proceso: elaborar un diagrama de flujo de proceso e identificar sobre él las fuentes de emisión de cada contaminante (equipo, maquinaria o actividad que los emite y diferenciar que equipo o actividad se encuentra normado y para que contaminante). En el diagrama deben señalarse las entradas y salidas de materia, considerando como entradas los insumos directos e indirectos y requerimientos de combustible y como salidas las emisiones al aire. En la figura 2.2 se muestra la descripción de este proceso.

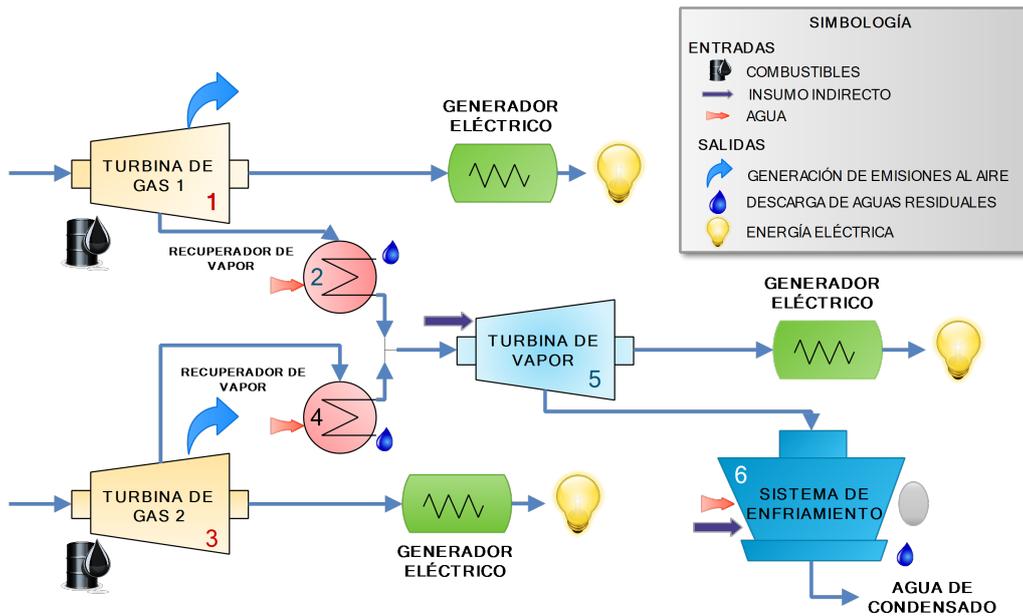


Figura 2.2: Descripción de un proceso de combustión que utiliza gas natural para la generación de energía eléctrica.

2. Identificar todos los equipos, maquinaria y actividades que constituyen una fuente de emisión de contaminantes atmosféricos citadas en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Fuentes generadoras de contaminantes atmosféricos.

Punto de generación	Nombre del equipo o actividad	Contaminante generado
1	Turbina de gas 1	Partículas y gases de combustión
3	Turbina de gas 2	Partículas y gases de combustión

3. Elaborar una segunda tabla (tabla 2.4) que presente los contaminantes y equipos normados y las características de su normativa.

Tabla 2.4: Equipos y contaminantes normados.

Punto de generación	Nombre del equipo o actividad	Capacidad del equipo	combustible usado	Norma	Contaminantes generados
1	Turbina de gas 1	225 MW/h	gas natural	NOM-085-ECOL-1994	NO _x
3	Turbina de gas 2	350 MW/h	gas natural	NOM-085-ECOL-1994	NO _x

4. Estimación de emisiones atmosféricas: cuando se utiliza un método indirecto, en este caso factores de emisión, las emisiones estimadas para cada contaminante se presentan en tablas que, con el objeto de ejemplificar el formato solicitado por la COA para su reporte, se inicia con la estimación de las emisiones de SO₂ y se finaliza con la emisión de COV (tabla 2.5).

Tabla 2.5: Equipos y contaminantes no normados.

Punto de generación	Nombre del equipo o actividad	Contaminante generado	Método de estimación
1	Turbina de gas 1	SO ₂ , CO, CO ₂ , HC y partículas	Factores de emisión
3	Turbina de gas 2	SO ₂ , CO, CO ₂ , HC y partículas	Factores de emisión

Para cada maquinaria, actividad o equipo generador se señala el método indirecto que se utilizó, así como la fórmula general de cálculo. Según el método seleccionado es necesario recabar la información pertinente para su aplicación, pudiendo ser: consumo de combustible, producción anual, cantidad de materia prima, concentración histórica de una determinada sustancia, registro del flujo de aire o humedad en una chimenea, etcétera.

5. El algoritmo que se sigue para el cálculo de las emisiones es el siguiente:

$$E = FE \times NA \quad (2.3)$$

Donde:

ER = 0, porque no se menciona que este actuando algún equipo de control.

NA= en este caso el nivel de actividad es expresado como consumo anual de gas natural en m³ considerando que la turbina 1 consume 198'358,981 m³/año de gas natural y la turbina 2 consume 236'246,145 m³/año.

Luego, el factor de emisión depende de los contaminantes que se quieran estimar la siguiente tabla muestra los factores de emisión disponibles del AP-42 para el gas natural.

Combustible	Contaminante	Factor de emisión (Kg/m ³) (AP-42, Sec 3.1)
Gas natural	PM ₁₀	1.08x10 ⁻⁴
	SO ₂	5.549x10 ⁻⁵
	CO ₂	1.8
	CO	1.34x10 ⁻³
	HC	1.8x10 ⁻⁴

Una vez identificados los factores de emisión y sabiendo cuál es el nivel de actividad se procede a estimar las emisiones con la ecuación 2.3.

Cálculo de las emisiones de SO₂ para las turbinas de gas.

Usando factores de emisión:

$$E_{SO_2-x} = (FE_{SO_2})(NA_x) \quad (2.4)$$

donde:

E_{SO_2} es la emisión anual de bióxido de azufre en Kg

FE_{SO_2} es el factor de emisión aplicable = 5.549×10^{-5} kg/m³ de gas natural (AP-42, 3.1)

NA_x es el nivel de actividad expresado como consumo anual de gas natural en m³

x es el número de turbina; considerando que:

$NA_1 = 198'358,981$ m³/año

$NA_2 = 236'246,145$ m³/año

Entonces aplicando la ecuación 2.4 se estiman las emisiones de SO₂

$$E_{SO_2-x} = (5.549 \times 10^{-5} \frac{kg}{m^3})(198'358.981 \frac{m^3}{año}) = 11,006.94 \frac{kg}{año} \quad (2.5)$$

$$E_{SO_2-x} = (5.549 \times 10^{-5} \frac{kg}{m^3})(236'246.145 \frac{m^3}{año}) = 13,109.3 \frac{kg \text{ de } SO_2}{año} \quad (2.6)$$

Cabe destacar que de acuerdo con la ecuación 2.1 las unidades de las emisiones son reportadas en Kg de contaminante por el tiempo que son descargadas al aire.

Para el resto de los contaminantes el cálculo es similar.

6. Finalmente se hace el llenado de la tabla de la COA con las emisiones calculadas tal y como se presenta a continuación en la tabla 2.6:

Tabla 2.6: Emisiones reportadas en la COA

Punto de generación	Contaminante	Emisión anual		
		Cantidad	Unidad	Método de estimación
1	SO₂	11,006.94	Kg	FE (AP-42, 3.1)
3	SO₂	13,109.3	Kg	FE (AP-42, 3.1)
1	PM	21,422.77	Kg	FE (AP-42, 3.1)
3	PM	25,514.58	Kg	FE (AP-42, 3.1)
1	HC	35,704.6	Kg	FE (AP-42, 3.1)
3	HC	42,524.3	Kg	FE (AP-42, 3.1)
1	CO	265,451.92	Kg	FE (AP-42, 3.1)
3	CO	316,154.04	Kg	FE (AP-42, 3.1)
1	CO₂	356,094	Ton	FE (AP-42, 3.1)
3	CO₂	424,109	Ton	FE (AP-42, 3.1)

2.3. Normativa

2.3.1. Normas de emisión en México

Las Normas Oficiales Mexicanas de emisión (NOMs) son las normas que establecen los límites máximos permisibles de descarga o emisión de contaminantes a la atmósfera. Están referidos al tipo de fuente fija o móvil, tipo de industria o proceso y al tipo de combustible que utilizan vehículo y pueden estar relacionadas con la producción, unidad de alimentación, volumen de combustible consumido entre otros.

Dichas normas están dirigidas a restringir a ciertos niveles las emisiones de SO_x, NO_x, PM, COVs y CO y son emitidas en México por la SEMARNAT que también establece la normatividad que regula la calidad de los combustibles y establece los requerimientos técnicos de los métodos empleados para medir los contaminantes más comunes en el aire. [INE(2009b)]

Las tablas 2.7 a 2.10 muestran una breve descripción de las normas de emisión para fuentes fijas y móviles y las características físicas de los combustibles distribuidos en México.

Tabla 2.7: **Normativa ambiental de México combustibles**

Nombre de la norma	Descripción
NOM-051-ECOL-1993	Que establece el nivel máximo permisible en peso de azufre, en el combustible líquido gasóleo industrial que se consuma por las fuentes fijas en la zona metropolitana de la Ciudad de México
NOM-086-ECOL-1994	Que establece las especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles.

[INE(2009b)]

Tabla 2.8: **Normativa ambiental de México fuentes fijas**

Nombre de la norma	Descripción
NOM-043-ECOL-1993	Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas
NOM-085-ECOL-1994	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 combustión indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de combustión directo por combustión

[INE(2009b)]

Tabla 2.10: **Normativa ambiental de México fuentes móviles**

Nombre de la norma	Descripción
NOM-041-ECOL-1999	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible
NOM-042-ECOL-1999	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas provenientes del escape de vehículos automotores nuevos en planta, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y Diesel de los mismos, con peso bruto vehicular que no exceda los 3,856 kilogramos
NOM-044-ECOL-1993	Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan Diesel como combustible y que se utilizaran para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos
NOM-045-ECOL-1996	Que establece los niveles máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan Diesel o mezclas que incluyan Diesel como combustible
NOM-048-ECOL-1993	Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y humo, provenientes del escape de las motocicletas en circulación que utilizan gasolina o mezcla de gasolina-aceite como combustible
NOM-049-ECOL-1993	Que establece las características del equipo y el procedimiento de medición, para la verificación de los niveles de emisión de gases contaminantes, provenientes de las motocicletas en circulación que usan gasolina o mezcla de gasolina-aceite como combustible
NOM-050-ECOL-1993	Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos como combustible.
NOM-076-ECOL-1995	Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y otros combustibles alternos y que se utilizaran para la propulsión de vehículos automotores, con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos nuevos en planta

[INE(2009b)]

2.4. Recintos portuarios

2.4.1. Recinto portuario

De acuerdo con la Ley de Puertos en su *Artículo 2º*, un recinto portuario se define como “la zona federal delimitada y determinada por la Secretaría y por la de Desarrollo Social en los puertos, terminales y marinas, que comprende las áreas de agua y terrenos de dominio público destinados al establecimiento de instalaciones y a la prestación de servicios portuarios”.



Figura 2.3: **Esquema general de un puerto** [Truyols (2010)]

1. Zona Marítima: Es una zona de aguas destinada al acceso o entrada a los buques así como a sus maniobras propias de espera y de estiba-desestiba. Incluye áreas de fondeo y dársenas.
2. Zona Marítima y Terrestre Portuaria: Formada por la zona de atraque, la de carga y descarga y la primera línea de almacenes o depósitos.
3. Zona terrestre Portuaria: Está formada por las zonas de almacenamiento inmediato para distribución terrestre y las vialidades de tráfico exteriores al puerto.
4. Zona de Operación Terrestre Portuaria: Formada por la zona marítima y terrestre portuaria y una zona de evaluación o distribución de productos, con los enlaces viales.
5. Zona Industrial: Está formada por los distintos polígonos industriales; industrias portuarias que se nutren de las materias o mercancías básicas recibidas en el puerto

2.4.2. El puerto

En la actualidad un puerto es un conjunto de obras, instalaciones y organizaciones que permite realizar operaciones de intercambio entre los tráficos terrestre, marítimo y aéreo, posibilitando numerosas actividades auxiliares tales como la carga y descarga de mercancías y personas y el inicio de transporte a sus futuros destinos. [Truyols (2010)]

La figura 2.3 muestra a grandes rasgos las características físicas de un puerto.

Las mercancías que se manejan en el recinto portuario son variadas y principalmente dependen del tipo de puerto en el que son intercambiadas, estas están clasificadas de la siguiente manera:

Carga a granel: es un conjunto en cantidades grandes de mercancías que se transportan sin empacar o envasar. Esta carga es depositada con palas, cangilones o grúas especializadas (almejas) como sólido o vertida como líquido a través de recipientes o tuberías de distribución en depósitos para mercancías a granel, vagones de ferrocarril o cajas de camiones.

Graneles sólidos: Son mercancías tales como granos agrícolas (trigo, maíz, arroz, cebada, avena, centeno, sorgo, soja, legumbres y otros.); minerales (minerales ferrosos y no-ferrosos, aleaciones ferrosas, arrabio, chatarra); madera, cemento, productos químicos (fertilizantes, plástico en gránulos, resina o polvo, fibras sintéticas, etc.); alimentos secos (para animales o humanos: alfalfa, cítricos, alimento para ganado, harina, azúcar y semillas.); y graneles de minas: (arena y grava, cobre, hierro, sal, etc.).

Graneles líquidos: son mercancías en estado líquido tales como crudo y derivados, gases licuados, productos químicos, productos alimenticios (leche, aceite vegetal, etc), agua potable, etc. La descarga de estos productos es por tuberías y sistemas de bombeo del buque a los almacenes o viceversa.

Mercancía general: es cualquier mercancía que se envasa y se transporta en contenedores, dichos contenedores están normalizados, esto es que la longitud (8 pies) y la altura (8 pies) son iguales para la mayoría de los tamaños de contenedores que varían en anchura de 20, 30, 40 y 45 pies. La unidad de medida de estos contenedores es el TEU (*Twenty Feet Equivalent Unit*)⁸. La capacidad normal de los buques porta-contenedores es de una capacidad de 3,000 a 4,000 TEUS, habiendo buques que tienen capacidad para 8,000 TEUS. [Truyols (2010)]

La delimitación, distribución y organización de las áreas en el puerto son proporcionales al desarrollo técnico del mismo, destacando que estas deben atender características de facilidad y rapidez de maniobra para la carga y descarga de mercancías, motivo por el cual debe contar con suficiente número y tipo de grúas, muelles de atraque, zonas de desembarque o almacenaje y, sobre todo, una óptima logística del puerto hacia su destino final. De manera que los objetivos de un puerto deben ser:

1. Minimizar el tiempo de estancia del barco en el puerto. (A mayor tránsito de buques, mayor volumen de mercancías).

⁸ *Twenty Feet Equivalent Unit:* es una medida normalizada de un contenedor de 20 pies de anchura que es igual 1 TEU, un contenedor de 40 pies es igual 2 TEU y un contenedor de 50 pies es igual 2.5 TEU.

2. Minimizar el tiempo de permanencia de mercancías y contenedores. (A mayor tránsito de mercancías, mayores cobros).
3. Minimizar los costos de manipulación y el tiempo de traslado del barco a las zonas de almacenaje de mercancías.
4. Conseguir máxima seguridad en las operaciones portuarias.
5. Integrar los diferentes servicios de puertos (grúas, transportes, desembarco) de modo que no interfieran entre si.
6. Adaptarse a los cambios tecnológicos de operatividad.
7. Conseguir economía de costos. Los costos globales del puerto no deben aumentar ante similares cifras de movimiento de mercancías.

Por la necesidad de aprovechar, ampliar y mejorar los servicios portuarios, nacieron las autoridades portuarias (APIS) que son instituciones que tienen como objetivo atender con seguridad y eficiencia las necesidades de los clientes en el uso de la infraestructura y la prestación de servicios portuarios, de tal forma que las competencias de las Autoridades Portuarias son:

- Prestación de servicios portuarios controlando y autorizándolos.
- Ordenación de la zona portuaria y su uso.
- Planificar, proyectar, construir, conservar y explotar las obras y servicios del puerto.
- Gestión del dominio portuario
- Optimizar la gestión económica y rentabilidad de todos sus recursos.
- Fomentar actividades industriales y comerciales
- Coordinar todas las operaciones de cualquier modo de transporte en el espacio portuario.

En México se cuenta con 114 puertos y terminales habilitados para el intercambio comercial y turístico, 65 de los cuales han sido concesionados a las APIS. [(Jáuregui (2009)]

La tabla 2.12 muestra el modelo de organización del sistema portuario nacional y las funciones que ejerce cada órgano regulador.

Tabla 2.12: **Modelo de Organización del Sistema Portuario Nacional.**

Entidad	Funciones
Gobierno Federal	Funciones de Autoridad Custodia de los bienes del dominio público de la federación Planeación del desarrollo Nacional, Políticas Públicas y Regulación
Administraciones Portuarias Integrales	Administración Programas Maestros de Desarrollo Portuario Mantenimiento de la infraestructura concesionada Inversión en nueva infraestructura Promoción de la participación del sector privado en la prestación de servicios Promoción de competencia intra e ínter portuaria
Operadores y prestadores de servicios portuarios	Construcción y/o operación de Terminales Prestación del servicio de maniobras Remolque Abastecimiento de combustibles Avituallamiento

[(Jáuregui (2009)]

2.4.3. Actividades portuarias

La función principal del puerto es esencialmente económica, es decir, intercambiar mercancías del modo de transporte marítimo al terrestre y viceversa, sin embargo aunado a esta simple actividad de intercambio comercial, se han desarrollado actividades paralelas y procesos que permiten el funcionamiento del puerto.

En analogía con una industria, las actividades portuarias corresponderían a los procesos y operaciones, cuyo fin es conseguir un producto terminado o ,en el caso del puerto, un valor agregado al intercambio de mercancías.

De acuerdo con el sistema INDAPORT [IPEC(2004)] las actividades portuarias se clasifican en veintidós actividades distintas que se muestran en la tabla 2.13.

Tabla 2.13: **Clasificación de actividades portuarias.**

Actividades Portuarias	
1	Trafico Marítimo
2	Trafico Terrestre
3	Almacenamiento, Carga y Descarga de Productos Petrolíferos
4	Almacenamiento, Carga y Descarga de Graneles Líquidos
5	Almacenamiento, Carga y Descarga de Graneles Sólidos
6	Almacenamiento, Carga y Descarga de Mercancía General Contenerizada
7	Almacenamiento, Carga y Descarga de Mercancía General No Contenerizada
8	Actividad Pesquera
9	Manipulación y Transformación de Graneles Sólidos Perecederos
10	Servicios Portuarios
11	Servicios Administrativos
12	Servicios Sanitarios
13	Operaciones de Emergencia
14	Actividades de Mantenimiento y Limpieza dentro del Recinto Portuario
15	Dragado
16	Tratamiento de Residuos MARPOL
17	Obra Civil
18	Instalaciones y Mercancías Abandonadas o en Desuso
19	Actividades Recreativas
20	Puertos Deportivos
21	Industria Metálica
22	Industria Energética

[IPEC(2004)]

Dichas actividades involucran a uno o más tipos de fuentes de emisiones atmosféricas (móviles o fijas). Como ejemplo y para dar una idea general de las potenciales fuentes de emisión de cualquier proceso en el puerto, se muestra a continuación una descripción de la actividad portuaria carga y descarga de granel sólido y las fuentes de emisión que son inherentes a ese proceso.

Carga, descarga y almacenamiento de granel sólido [APA (2007)]:

Descripción: la figura 2.4 muestra esta actividad que comprende las operaciones relacionadas con la transferencia de graneles sólidos desde los buques a las instalaciones portuarias. Mediante una grúa equipada con cuchara (almeja) se deposita la mercancía en el muelle o con la cuchara se deposita la mercancía en una tolva y de ésta a la caja de un camión o a un vagón de ferrocarril. También se da el proceso inverso, es decir, acopiar el material en el muelle para posteriormente cargar un barco.

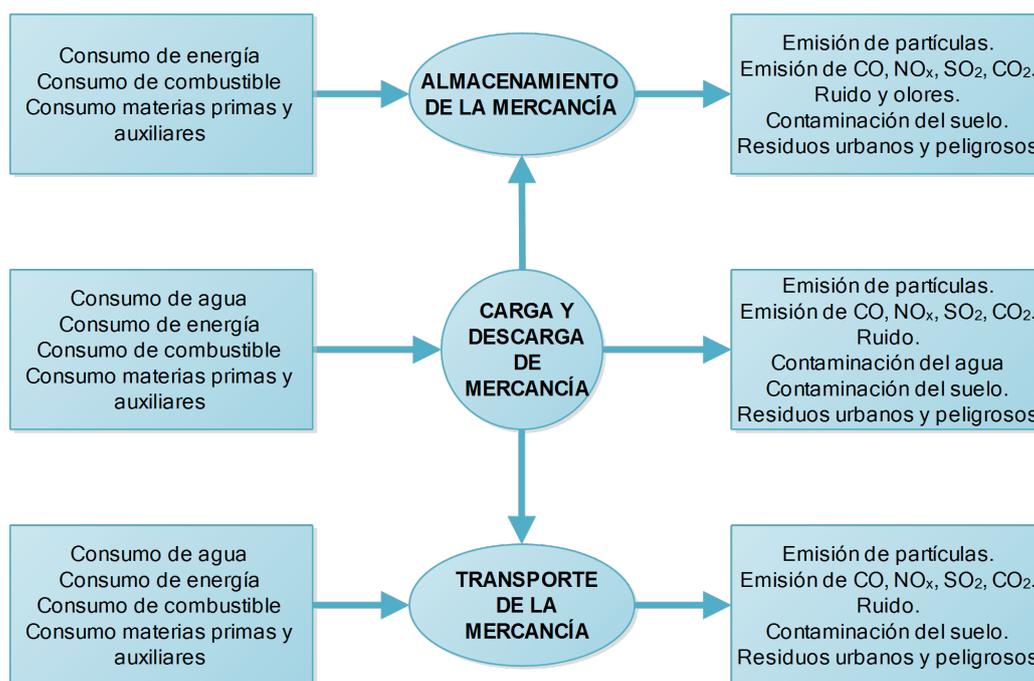


Figura 2.4: Diagrama de proceso de la actividad portuaria carga y descarga de granel sólido.

Aspectos ambientales generados en la actividad:

Consumo de recursos	Consumo de energía eléctrica empleada en las grúas que llevan a cabo la carga y descarga de la mercancía. Consumo de combustible utilizado por los vehículos que transportan la mercancía y la maquinaria empleada en la zona de almacenamiento.
Emisiones atmosféricas	Emisión de gases de combustión y partículas procedentes de los vehículos terrestres que transportan la mercancía y de la maquinaria empleada para las tareas de carga y descarga. Emisión de partículas de polvo en la carga, descarga y almacenamiento en parvas al aire libre.

Cada una de las actividades listadas en la tabla 2.13 involucran diferentes operaciones (carga, descarga, transporte, almacenamiento, etc) que se realizan de formas muy diversas y con diferentes equipos (grúas, montacargas, tolvas, tuberías con sistemas de bombeo e incluso con sistema de calentamiento, etc) a lo que hay que añadir la diversidad de

materiales que se manejan, que finalmente puede influir en la emisión de partículas a la atmósfera.

2.4.4. Clasificación de fuentes de emisión de un recinto portuario

Fuentes móviles

De acuerdo al documento *Best Practices Inventory Port* de la U.S. EPA [USEPA(2005)] el estudio de las emisiones por fuentes móviles se divide en dos áreas: lado tierra y lado mar; además identifica y agrupa estas fuentes por el tipo de función que realizan en las siguientes categorías:

Tabla 2.14: Clasificación de fuentes móviles

Área	Tipo	Modo de operación
Lado mar	Buques	Modo maniobra y modo estancia o “hotelling”
	Lanchas y remolques	
Lado tierra	Equipos de manipulación de carga	Operaciones de recorrido y de patio
	Trenes y locomotoras	
	Camiones de carga	En movimiento o en ralentí
	Vehículos ligeros	En movimiento

[USEPA(2005)]

En un cálculo detallado se cuantifican las emisiones del lado mar y lado tierra considerando el desplazamiento de cada buque dentro y fuera de un puerto, las emisiones producidas por remolques y lanchas y por los equipos de manipulación de carga, trenes y locomotoras y vehículos y camiones de carga.

Fuentes fijas

Una fuente fija es aquella instalación o conjunto de instalaciones, que tiene como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios que generan o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

De acuerdo con la U.S. EPA la tabla 2.15 muestra las fuentes fijas que se pueden encontrar en un recinto portuario.

Los niveles de actividad para cuantificar las emisiones de estas fuentes se basan en el tipo y consumo de combustible, tipo de equipo y horas de operación o por los contaminantes generados y las normas aplicables.

Como ya se menciona en la subsección 2.4.3, las actividades portuarias son diversas e involucran diferentes procesos (carga, descarga, transporte, almacenamiento, etc) a las que hay que añadir las emisiones por instalaciones especiales que prestan servicios en el puerto tales como incineración de residuos sólidos y/o peligrosos. De acuerdo a la U.S. EPA las emisiones por estas fuentes fijas pueden calcularse a partir de los FE del AP-42

teniendo cuidado en caracterizar correctamente las configuraciones de los equipos y de las instalaciones y recabando datos de niveles de actividad de los procesos.

Tabla 2.15: **Clasificación de fuentes fijas**

Fuentes fijas (AP 42 [USEPA (2013)])	Proceso	Ejemplos
Fuentes de combustión externa	Combustión de Gas Natural; combustión de Diesel; combustión de Gas LP; Chimeneas	Cocinas de comedores, calderas industriales.
Disposición de residuos sólidos	Incineración de residuos sólidos.	Incineradores.
Fuentes de pérdida por evaporación	Recubrimiento de superficies industriales y no industriales; tratamiento y almacenamiento de agua; operaciones de pavimentación con asfalto; operaciones con solvente desengrasante	Mantenimiento y reparación de vialidades, explanadas y buques; limpieza de tanques de almacenamiento.
Industria del petróleo	Transporte y comercialización de líquidos de petróleo	Almacenamiento de petroquímicos
Tanques de almacenamiento de líquidos	Tanques de almacenamiento de líquidos orgánicos.	Almacenamiento de resinas y precursores poliméricos.
Industria química inorgánica	Operaciones de carga a granel de productos químicos inorgánicos.	Carga y descarga de fertilizantes.
Industrias alimentarias y agrícolas	Operaciones de carga a granel de sólidos y líquidos para consumo humano y animal.	Carga y descarga de maíz, sorgo, trigo, sebo, aceite vegetal.
Productos minerales	Operaciones de carga a granel y movimiento de chatarra.	Carga y descarga de intermediarios en la fabricación de cemento
Industria metalúrgica	Soldadura por arco eléctrico	Astilleros, reparación de contenedores.
Otras fuentes	Fuentes de polvo fugitivo; operaciones de construcción pesada; manejo de pilas de almacenamiento.	Caminos no pavimentados, almacenamiento de graneles pulverulentos.

[USEPA (2013)]

3 Metodología

3.1. Métodos de estimación de emisiones aplicando FE para las actividades portuarias

En esta sección se hace una descripción de la aplicación de FE al cálculo de emisiones atmosféricas por las actividades portuarias realizadas en el recinto portuario.

3.1.1. Fuentes móviles

Buques

La ecuación para calcular las emisiones producidas por los buques durante su arribo, estancia (para carga y descarga) y posterior salida del recinto portuario es:

$$Emisión = FE \times Potencia \times Actividad \times Factor\ de\ carga = \frac{g\ de\ contaminante}{año} \quad (3.1)$$

Donde

Potencia Máxima Continua es la potencia que desarrolla el motor en Kilo watts [kW]), y viene dada en las características del buque cuando es construido o remanufacturado.

Actividad en horas anuales $\left(\frac{h}{año}\right)$, es la actividad que se refiere al tiempo que el buque permanecen en el recinto portuario (desde que arriba a los límites en el lado mar y hasta que los abandona) y esta asociada al tipo de motor que utiliza durante su estancia ya sean motores principales (MP) o auxiliares (MA).

Factor de Carga que representaría un por ciento de la potencia total del buque y que se calcula con la ecuación 3.2

$$FC = \left(\frac{VA}{VM}\right)^3 \quad (3.2)$$

donde

FC = Factor de carga (en %)

VA = Velocidad actual (nudos marinos)

VM = Velocidad máxima (nudos marinos)

La ecuación 3.1 aplica a buques en modo maniobra o hotelling y para motores principales (MP) o motores auxiliares (MA).

El análisis de dimensiones de la ecuación 3.1 es el siguiente:

$$Emisión = \frac{g \text{ de contaminante}}{kWh} \times kW \times \frac{h \text{ de actividad}}{año} \times \% = \frac{g \text{ de contaminante}}{año}$$

La cuantificación de las emisiones totales para los buques durante su estancia en el puerto es la suma de las emisiones en modo maniobra y en modo hotelling.

El *break specific fuel consumption* (BSFC) o consumo específico de combustible es una medida de la cantidad (en gramos) de combustible consumido en relación con la energía producida por el motor (en kW-h). El BSFC se puede utilizar con el fin de convertir el FE a kilogramos de contaminante por tonelada de combustible consumido, como se indica en la siguiente ecuación:

$$\frac{kg \text{ de contaminante}}{Ton \text{ de combustible}} = FE \text{ en } \left(\frac{g \text{ de contaminante}}{kWh} \right) \times \left(BSFC \text{ en } \frac{kWh}{kg \text{ de combustible}} \times 0.001 \right) \quad (3.3)$$

Entonces, otra forma de realizar el cálculo de las emisiones basado en el consumo de combustible es utilizando la siguiente ecuación:

$$Emisión = [FE \times BSFC] \times Actividad \times Factor \text{ de carga} \quad (3.4)$$

y cuyo análisis dimensional es:

$$Emisión = \left[\frac{g \text{ de contaminante}}{kWh} \times \frac{kWh}{kg \text{ combustible}} \right] \times \frac{kg \text{ combustible}}{año} \times \%$$

$$Emisión = \frac{g \text{ de contaminante}}{año}$$

En los documentos ENTEC [ENTEC (2010)] y *Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories* [USEPA (2009)] pueden encontrarse tablas con FE actualizados para aplicarlos en las ecuaciones 3.1 o 3.4; los contaminantes que pueden ser estimados con estos FE pertenecen tanto a contaminantes criterio como a GEI e hidrocarburos.

Los FE tabulados en estos documentos, se encuentran organizados de acuerdo a las características del buque, es decir, tipo de motor (principal o auxiliar) y los dividen de acuerdo a las velocidades de los motores en: motor a Diesel de baja velocidad (**SSD**), motor a Diesel de velocidad media (**MSD**), motor a Diesel de alta velocidad (**HSD**), turbinas de vapor (**ST**) y turbinas de gas (**GT**). El siguiente nivel de caracterización es por el tipo de combustible que utiliza el motor del buque y el por ciento de azufre que el combustible contiene: Residual Oil (**RO**), Marine Diesel Oil (**MDO**) y Marine Gas Oil (**MGO**).

Lanchas y remolques

Para realizar la estimación de las emisiones de este tipo de embarcaciones se tiene que hacer el censo de la población de lanchas y remolques, determinar el número de motores por barco, la potencia del motor en kW-h, el modelo y las horas anuales de operación y combinar esta información con el factor de emisión y los datos de factores carga de la literatura técnica.

Si los datos detallados sobre la edad y la cilindrada del motor están disponibles, se puede aplicar los factores de emisión de contaminantes publicados en el documento *Regulatory Impact Analysis (RIA)* [USEPA (2008)].

Sin embargo hay muchos casos en los que la potencia del motor, edad y categoría de motor no se conocen, en esos casos, los FE que se aplican son los que proceden de otras fuentes tales como ENTEC, la OMI y la reglamentación de la U.S. EPA de 1999.

Las emisiones anuales de los barcos en el puerto pueden ser estimadas con la ecuación 3.5 de las mejores prácticas de la U.S. EPA:

$$Emisión = N \times [(FE \times N_M \times FC \times A \times P)_{MP} + (FE \times N_M \times FC \times A \times P)_{MA}] \quad (3.5)$$

donde:

E = Emisiones de lanchas y remolques $\left(\frac{g \text{ de contaminante}}{\text{año}}\right)$

N = numero total de embarcaciones similares en categoría de motor 1 ó 2¹.

FE = factor de emisión $\left(\frac{g}{kW-h}\right)$

N_M= Es el número de motores por barco de la población que se va a estimar, el cual usualmente es un promedio.

FC = Factor de carga, el cual se calcula o se toma de tablas y depende de la edad del barco.

A = actividad en horas anuales de funcionamiento

P = potencia desarrollada por los motores (principales y auxiliares)

Análisis de dimensiones de la ecuación 3.5:

$$E = N_{de \text{ barcos}} \times \left\{ \left(\frac{g}{kWh} \times N_{de \text{ motores}} \times \% \times \frac{h}{año} \times kW \right)_{Motor \text{ principal}} + \left(\frac{g}{kWh} \times N_{de \text{ motores}} \times \% \times \frac{h}{año} \times kW \right)_{Motor \text{ auxiliar}} \right\}$$

$$E = \frac{g \text{ de contaminante}}{año}$$

¹La U.S. EPA divide los motores marinos en tres categorías y cada categoría representa una tecnología de motor diferente, basado en el desplazamiento por cilindro (cilindrada)

Equipos de manipulación de carga

Debido a la diversidad de carga que arriba a un puerto, existe una amplia gama de equipos diseñados para manipular y moverla desde los buques a los patios de almacén y de los almacenes a los diferentes tipos de transportes terrestres y viceversa, además hay equipos que prestan servicios de construcción y mantenimiento en el recinto portuario.

Lo FE que provee la U.S. EPA para estos equipos están en función del tipo de equipo, la potencia del motor, año del modelo, tipo de combustible utilizado, horas anuales de operación, factor de carga², nivel de deterioro y los dispositivos de control de emisiones si los tuviera instalados. [USEPA(2009a)]

La siguiente ecuación sirve para calcular las emisiones por este tipo de fuente:

$$Emisión = FE \times Actividad \times Potencia_{del\ equipo} \times Factor\ de\ Carga \times Número_{de\ equipos} \quad (3.6)$$

donde

FE = es el factor de emisión en $\left(\frac{g}{hp-h}\right)$

Potencia media del equipo dato que se puede obtener a partir de tablas del apéndice A del documento *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling* [USEPA(2010b)].

Número de equipos con un mismo intervalo de potencia

Factor de carga, que es un número que relaciona la potencia del motor con la carga desplazada por el equipo.

Actividad anual del equipo, en horas anuales en funcionamiento y que para fines de un inventario simplificado pueden ser estimadas a partir de la carga movilizada en el recinto portuario.

y cuyo análisis dimensional es el siguiente:

$$Emisión = \frac{g}{hp-h} \times \frac{h}{año} \times hp \times \% \times Número_{de\ equipos} = \frac{g\ de\ contaminante}{año}$$

Cabe señalar que el FE puede calcularse a partir de los siguientes factores:

$$FE = FE_{ss} \times FAT \times FD$$

Factor de ajuste transitorio (FAT):

$$FAT = \frac{FE_{trans}}{FE_{ss}}$$

²El factor de carga describe la fracción de la potencia del motor utilizado en promedio durante un período de tiempo y se obtiene de encuestas a los operadores y de un análisis de tiempos y movimiento.

dónde:

- FE_{trans} es un FE ajustado en función del tipo de equipo y se puede obtener de tablas (Apéndice A NONROAD [USEPA(2009a)]).
- FE_{ss} es el FE en estado estacionario (sin ningún ajuste)

Factor de deterioro (FD) que está en función de la edad del equipo y el tipo de tecnología de su sistema de funcionamiento.

$$FD = 1 + A \times (\text{factor de edad})^b \text{ para un Factor de Edad } \leq 1$$

$$FD = 1 + A \quad \text{para un Factor de Edad } \geq 1$$

donde:

Factor de Edad es una fracción de vida media gastada:

$$\frac{\text{horas acumuladas} \times \text{factor de carga}}{\text{vida media en horas}}$$

A y b son constantes para un tipo de contaminante dado por tipo de tecnología del equipo que se quiere estimar, $b \leq 1$. (Apéndice B NONROAD [USEPA(2009a)])

La ecuación 3.7 sirve para calcular las emisiones por este tipo de fuente utilizando el consumo de combustible cuando no se dispone del dato de horas anuales de funcionamiento por equipo:

$$Emisión = FE \times \left[\text{Actividad} \times \frac{1}{BSFC} \right] \times \text{Factor de Carga} \times \text{Numero de equipos} \quad (3.7)$$

y cuyo análisis dimensional es:

$$E = \frac{g \text{ de contaminante}}{Hph} \times \left(\frac{Kg \text{ combustible}}{\text{año}} \times \frac{Hph}{Kg \text{ combustible}} \right) \times \%$$

$$E = \frac{g \text{ de contaminante}}{\text{año}}$$

La documentación del modelo *NONROAD* de la U.S. EPA muestran FE que pueden ser utilizados para calcular las emisiones de este tipo de fuente, están en función del intervalo de potencia del motor y del nivel de emisión³. El Nivel Base (NB) está referido a modelos de equipos de 1988 y anteriores de todos los intervalos de potencia existentes y se consideran

³El nivel de emisión de los equipos de manipulación de carga es un valor asignado basado en el año del modelo del motor o de la tecnología que reporta el fabricante.

sin control de emisiones (no controlados). A partir del nivel cero y hasta el cuarto la relación entre el nivel y la distribución de edad depende del intervalo de potencia del equipo, el documento EPA420-P-04-09 muestra las tablas completas de nivel de emisión en función de la distribución de edad y del intervalo de potencia. [USEPA(2009a)]

Locomotoras

Las operaciones ferroviarias susceptibles de producir emisiones atmosféricas en el puerto se pueden clasificar en dos tipos:

Operaciones de recorrido con transporte de carga hacia y desde el puerto se refieren al movimiento a larga distancia, así como los movimientos dentro de los puertos como el inicio o fin de un viaje de transporte de carga.

Operaciones de patio, que se refiere al montaje y desmontaje de los trenes en varios lugares dentro de un puerto, la carga de vagones de ferrocarril y la entrega de vagones vacíos a las terminales, es decir, maniobras que implican movimientos de corta distancia.

La U.S. EPA, señala que los inventarios de puerto deben incluir únicamente las operaciones dentro de las instalaciones portuarias y que, para estimar las emisiones, la actividad se mida en términos de consumo de combustible el cual se multiplica por los FE en gramos de contaminante por galón de combustible ($\frac{g}{gal}$). El documento "Emission Factors for Locomotives" de U.S. EPA [USEPA(2009b)] muestra los FE que pueden ser aplicados en la ecuación 3.8.

$$Emisión = FE \times Actividad \quad (3.8)$$

Análisis dimensional:

$$E = \frac{g_{de\ contaminante}}{Kg\ combustible} \times \frac{Kg\ combustible}{año} = \frac{g_{de\ contaminante}}{año}$$

Camiones y vehículos

Las emisiones por el movimiento de carga, hacia y desde el puerto, realizada por camiones de carga pesada se pueden calcular con las ecuaciones 3.9 y 3.10; la actividad de los camiones se mide en términos de vehículo-kilómetros recorridos (VKR) y las horas de marcha en ralentí. [USEPA(2009a)]

Las emisiones de los camiones se pueden clasificar en dos tipos:

1. **Las emisiones de funcionamiento**: que se producen en el lado tierra del recinto portuario cuando el camión se encuentra en movimiento desde la entrada hacia los almacenes o zonas logísticas y posteriormente hacia fuera del recinto portuario.

2. **Las emisiones al ralenti**⁴: que son producidas cuando el camión está encendido pero esperando en los patios de los almacenes y por consiguiente consumiendo combustible y produciendo emisiones.

Los dos tipos de emisiones se calculan con las siguientes ecuaciones :

$$E_{movimiento} = \frac{\text{recorrido} \left(\frac{\text{millas}}{\text{año}} \right) \times FE \left(\frac{g_{\text{contaminante}}}{\text{millas}} \right)}{10^6 \frac{g_{\text{contaminante}}}{\text{Ton}_{\text{contaminante}}}} = \frac{\text{Ton}_{\text{contaminante}}}{\text{año}} \quad (3.9)$$

$$E_{ralenti} = \frac{\text{Ralenti} \left(\frac{h}{\text{año}} \right) \times FE \left(\frac{g_{\text{contaminante}}}{h} \right)}{10^6 \frac{g_{\text{contaminante}}}{\text{Ton}_{\text{contaminante}}}} = \frac{\text{Ton}_{\text{contaminante}}}{\text{año}} \quad (3.10)$$

Sin embargo cuando los datos sobre kilómetros recorridos de los camiones no este disponible, se pueden estimar las emisiones utilizando la ecuación 3.11 propuesta por IPCC (método D) que está basada en el consumo de combustible [IPCC(1996)]:

$$\text{Emisiones} = FE \times \text{Actividad} \quad (3.11)$$

Análisis dimensional:

$$\text{Emisiones} = \frac{\text{gramos de contaminante}}{\text{Kg de combustible}} \times \frac{\text{Kg de combustible}}{\text{año}} = \frac{\text{gramos de contaminante}}{\text{año}}$$

Aunque las mejores practicas de la U.S. EPA recomiendan el uso de un modelo para calcular las emisiones de vehículos y tráileres, tanto en recorrido como en ralenti, los FE propuestos por IPCC que fueron calculados con el modelo *MOBILE5a* dan una buena aproximación de las emisiones de los camiones y también de los vehículos ligeros. Cabe señalar que estos FE unicamente sirven para calcular las emisiones en recorrido, por lo que no sirven para estimar las emisiones de los tráileres al ralenti.

3.1.2. Fuentes fijas

En general las fuentes fijas pueden ser estimadas en los siguientes tres niveles de detalle [WGA(1996)]:

- A nivel de planta, en el que pueden incluirse diversas actividades emisoras
- A nivel de punto de emisión o chimenea
- A nivel de proceso o segmento, que representa las operaciones de la unidad de emisión de una categoría de fuentes.

⁴El ralenti es el régimen mínimo de revoluciones por minuto (giros o vueltas por minuto) a las que se ajusta un motor de combustión interna para permanecer en funcionamiento de forma estable sin necesidad de accionar un mecanismo de aceleración o entrada de carburante. (wikipedia.org)

Siempre que se pueda, las emisiones de las fuentes fijas deben ser estimadas a nivel de proceso o segmento de acuerdo con la identificación del tipo de proceso y equipo a los que una regulación, cumplimiento y autorización pudiera aplicar. A este nivel una planta puede estar integrada por varios procesos u operaciones.

La información necesaria para estimar las emisiones utilizando FE a este nivel incluye [WGA(1996)]:

- Identificación del proceso (datos de operación, incluyendo la capacidad utilizada real, máxima y de diseño)
- Información de actividad para el proceso, tal y como se especifique en el factor de emisión pertinente
- FE para traducir la información de actividad en estimados de emisiones controladas o no controladas
- Características de los combustibles (cenizas, azufre, elementos traza, contenido calorífico, etc.)
- Identificación del equipo de control de contaminación atmosférica y su valor de eficiencia de los equipos de captura y control cuando se aplica un factor de emisiones no controladas (los FE de “emisiones controladas” lo incluyen por definición).

La ecuación básica para la estimación de emisiones de fuentes fijas aplicando un FE es:

$$Emisión = FE \times Actividad \times Control \quad (3.12)$$

Al aplicar la ecuación 3.12 se deben tener las siguientes consideraciones:

1. *Características de la combustión*: las emisiones, producto de la combustión, están fuertemente influenciados por el tipo de combustible y de equipo de combustión, la configuración del incinerador y las condiciones de operación del proceso de combustión.
2. *Propiedades de los combustibles*: la Norma Oficial Mexicana NOM-086-ECOL-1994 define las especificaciones para gas natural y productos derivados del petróleo, tales como gasolina, Diesel, aceite y gas licuado (GLP), que son usados en varias regiones geográficas.
3. *Condiciones de operación*: la formación de contaminantes como el NO_x depende de la temperatura y la relación aire/combustible cerca de los quemadores.
4. *Materias primas*: las propiedades físicas y químicas de materias primas usadas por una fuente fija influyen en las emisiones.

5. *Prácticas de operación*: Esta es la diferencia de emisiones que puede producir una planta automatizada contra otra que aplica procesos manuales en mayor medida.
6. *Edad del equipo*: los equipos modernos, a diferencia de equipos antiguos, tienden a incluir tecnologías en sus sistemas diseñadas para reducir las emisiones.
7. *Efectividad del equipo de control*: las emisiones están determinadas por la eficacia de captura de un sistema de control, que indica el porcentaje del flujo de emisiones que es atrapado por el equipo de control.

Por último, la precisión de los estimados de emisiones depende de la precisión relativa de cada uno de sus componentes individuales. Los errores en que se incurra en alguna de las partes afectarán el estimado final [WGA(1996)].

3.2. Aplicación de factores de emisión

La figura 3.1 muestra la secuencia general para la aplicación de FE en las actividades portuarias del Recinto Portuario de Veracruz.

Consideraciones

- La metodología de cálculo de emisiones está basada en la que recomienda la U.S. EPA.
- El caso de estudio es aquel que se muestra en la figura 4.2.
- Salvo en los casos en que se mencione lo contrario, el periodo de tiempo de estimación es anual en concordancia con los niveles de actividad que se mostrarán en la sección caso de estudio.
- Los contaminantes que se van a estimar dependerán de los FE disponibles persiguiendo estimar las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero.

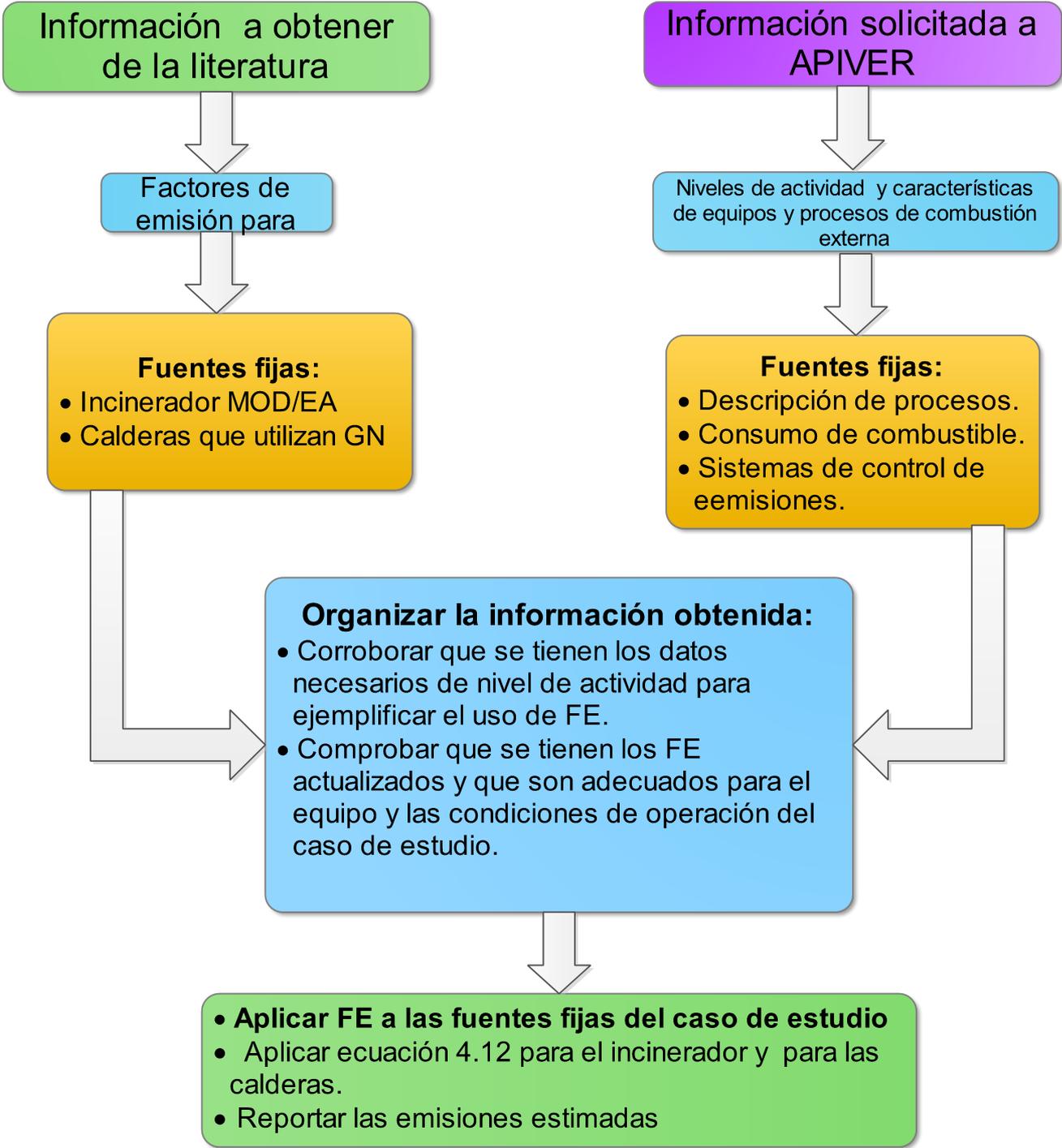


Figura 3.1: Metodología general

4 Caso de estudio. Puerto de Veracruz

4.1. Proyecto Puertos Verdes

El proyecto “*Sistema de Manejo Integral Sustentable del Recinto Portuario de Veracruz, Veracruz, México*” (SMAIP) considera la realización de un inventario preliminar de emisiones en el recinto portuario de Veracruz, con el compromiso y cooperación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad Veracruzana (UV) y la Administración Portuaria integral del Puerto de Veracruz (APIVER).

El SMAIP tiene como meta identificar el impacto ambiental significativo en el Recinto Portuario de Veracruz, para evitar, o mitigar este impacto dentro de la mejor factibilidad técnica económica.

En la primera fase del proyecto, el grupo técnico proponente (UNAM-UV) analizará la información disponible en lo referente a la operación integral del recinto portuario y sus impactos potenciales al ambiente para su desarrollo actual y futuro.

El SMAIP es un conjunto de procesos y tecnologías que aplicadas de una manera ínter y multidisciplinaria debe participar en la operación de puertos y como consecuencia incrementar su eficiencia y sustentabilidad con la finalidad de crecer con responsabilidad social y prevenir un deterioro ambiental significativo.

Con este tipo de proyecto el Recinto Portuario de Veracruz puede ser pionero en México y en América Latina de crear un puerto cuya operación y crecimiento sea sustentable.

Los resultados que se esperan son

- Hacer eficiente y sustentable la operación del Recinto Portuario de Veracruz.
- Beneficio en el movimiento de carga dentro y en la zona de influencia del Puerto.
- Dentro del beneficio social, contemplar que la población de la región tenga una calidad de vida adecuada.
- Asegurar la conservación de los ecosistemas regionales.

4.2. Descripción del área de estudio

El Puerto de Veracruz es el principal puerto comercial de México. Tiene una excelente ubicación estratégica con 60 millones de consumidores potenciales en su zona de

influencia. Constituye una de las puntas mas importantes para el abasto de graneles y productos industriales para los principales centros productivos y comerciales del país. Por este puerto se operan cargas de prácticamente toda la República Mexicana. Además de contar con infraestructura diversificada, tiene una extensa red de servicios de transporte, aduanales y comerciales, entre otros, que facilitan el desarrollo de las exportaciones e importaciones destinadas prácticamente a todo el país. Más de 30 líneas navieras arriban al puerto. Se comunican con todo el país a través de una extensa red de carreteras y dos rutas ferroviarias. Actualmente registra altas tasas de crecimiento del movimiento de carga y embarcación, importantes inversiones en infraestructura y equipo. [APIVER (2012)]

- El puerto ofrece atractivas oportunidades para el inversionista:
- Elevado dinamismo en sus actividades.
- 116 hectáreas para instalaciones como almacenes, patios, bodegas refrigeradas, etc.
- Modernización de terminales de usos múltiples y especializados
- Área para el desarrollo de un estacionamiento para tráileres con servicios adicionales. CALT
- Servicios portuarios diversos y desarrollo turístico náutico.
- Cuenta con 3.5 km. de muelles para todo tipo de carga, 9 terminales especializadas para contenedores, granel mineral, fluidos y vehículos, una terminal de productos petroleros y astillero.
- Su canal de acceso es de 12.8 m de profundidad y permite el arribo de embarcaciones con 10.97 m de calado en la terminal de contenedores y 9.5 m en la terminal de carga general.

4.3. Distribución de las áreas en el recinto portuario (lado tierra)

El plano de la figura 4.1 muestra de manera general la distribución del recinto portuario entre las áreas que pertenecen a APIVER y las que están en cesión de derechos parciales (cesionarios).

Las tablas 4.1 y 4.2 describen los usos que APIVER y cesionarios dan a las áreas que están a su cargo así como el tipo de fuentes de emisión que predominan en cada una.

Áreas del Recinto Portuario Cesionadas y de Almacenamiento

Áreas, terminales e instalaciones del Puerto - Nomenclatura, ubicación y dimensiones

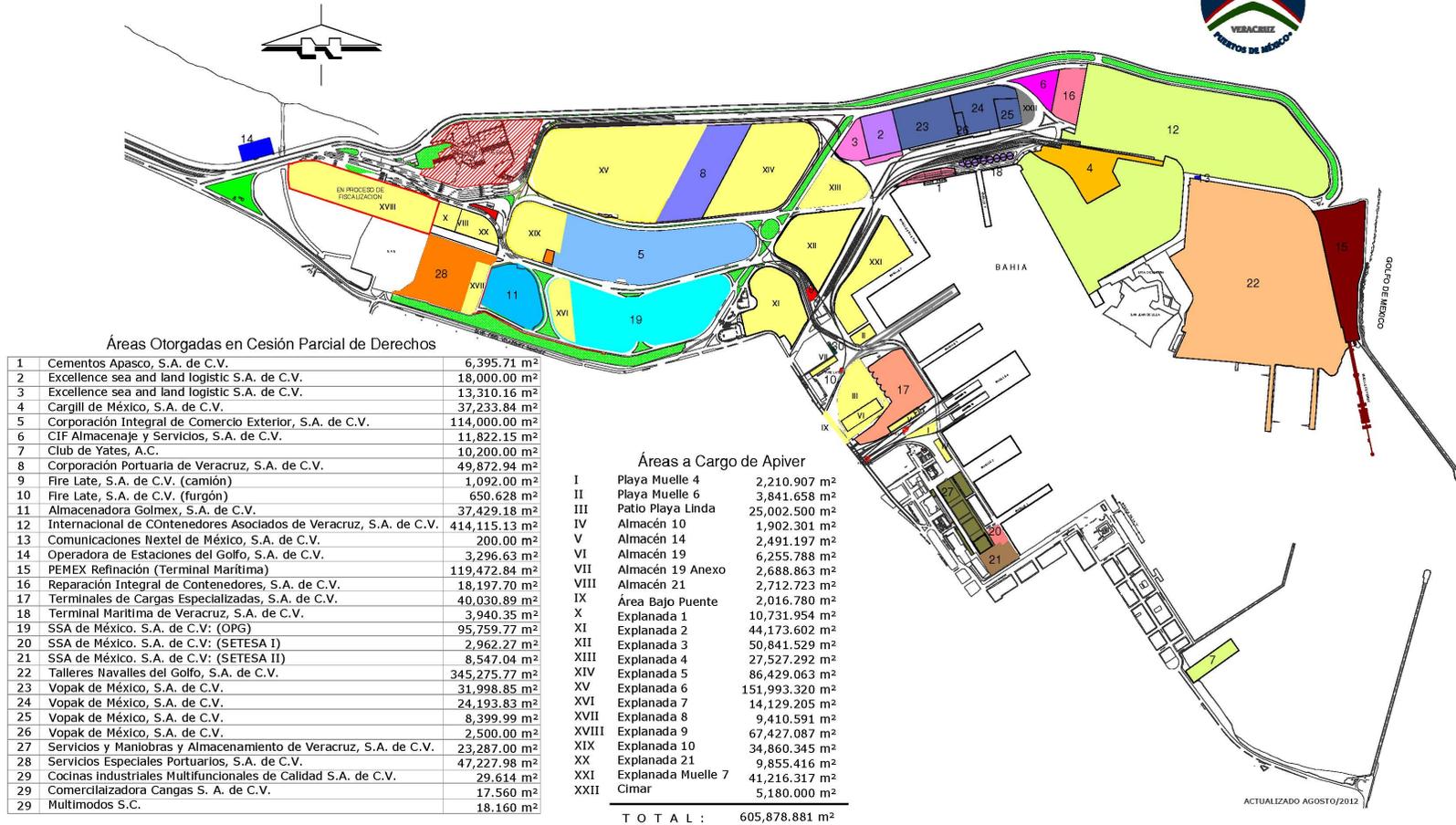


Figura 4.1: Áreas del recinto portuario de Veracruz [APIVER (2012)]

Tabla 4.1: Áreas a cargo de APIVER

Área	Abreviatura	Usos	Tipo de fuente de emisiones atmosféricas
Playa de muelle 4	I	Carga General	Móviles
Playa de muelle 6	II	Carga General	Móviles
Patio Playa Linda	III	Carga General	Móviles
Almacén No.10 (Benito Juárez)	IV	Carga General	Móviles
Almacén No. 14	V	Carga General	Móviles
Almacén No.19	VI	Carga General	Móviles
Patio Frontal 19 Anexo	VII	Carga General	Móviles
Almacén No.21	VIII	Carga General	Móviles
Área bajo Puente	IX		
Explanada 1	X	Carga General	Móviles
Explanada 2	XI	Carga General	Móviles
Explanada 3	XII	Carga General	Móviles
Explanada 4	XIII	Carga General	Móviles
Explanada 5	XIV	Carga General	Móviles
Explanada 6	XV	Carga General	Móviles
Explanada 7	XVI	Carga General	Móviles
Explanada 8	XVII	Carga General	Móviles
Explanada 9	XVIII	Carga General	Móviles
Explanada 10	XIX	Carga General	Móviles
Explanada 21	XX	Carga General	Móviles
Explanada muelle 7	XXII	Carga General	Móviles
Almacén No.1		Carga General	Móviles
Almacén No.2		Carga General	Móviles
Almacén No.4		Carga General	Móviles
Almacén No.7		Carga General	Móviles
CIMAR	XXI	Incinerador	Fijas
Centro de Actividades Logísticas al Transporte	CALT	Tráfico de tracto camiones	Móviles
Cobertizo Efrén Cervantes Altamirano		Carga General	Móviles

[APIVER (2012)]

Tabla 4.2: Áreas a cargo de cesionarios

Área	Abreviatura	Usos	Tipo de fuente de emisiones atmosféricas
Internacional de Contenedores Asociados de Veracruz	ICAVE	Carga contenerizada	Móviles
Talleres Navales del Golfo	TNG	Reparaciones	Móviles y fijas
Cargill de México	CARGILL	Granel agrícola	Móviles
Corporación Integral de Comercio Exterior	CICE	Carga general	Móviles
SSA México	SSA	Autos y Carga general	Móviles
Terminales de Cargas Especializadas	TCE	Carga general	Móviles
Petróleos Mexicanos, Refinación.	PEMEX	Petróleo y derivados	Móviles y fijas
Vopak Terminales México	VOPAK	Polímeros y precursores	Móviles y fijas
Corporación Portuaria de Veracruz	CPV	Carga general y multi propósitos	Móviles
Reparación Integral de Contenedores	RICSA	Reparaciones	Móviles
CIF Almacenes y Servicios	CIF	Carga contenerizada	Móviles
Idesa Logística Veracruz	IDESA	Granel líquido	Móviles y fijas
Terminal marítima de Veracruz	TMV	Carga general	Móviles
Almacenadora Golmex	GOLMEX	Carga general	Móviles
Fire Late	FIRE LATE	Pesaje de camiones y furgones de ferrocarril	Móviles
Club de Yates de Veracruz, A.C.	CLUB YATES	Administración marina turística	Móviles
Servicios especiales portuarios	SEPSA	Granel mineral	Móviles
Servicios maniobras y almacenamientos de Veracruz	SEMAVE	Carga general y contenerizada	Móviles
Cementos Apasco.	APASCO	Cemento y derivados	Móviles
Comunicaciones Nextel de México	NEXTEL		
Operadora de estaciones del golfo	OPEGOL	Suministro de combustible para autos	Móviles
Cocinas industriales multifuncionales de calidad	CIMCA	Comedores	Fijas
Comercializadora cangas	CANGAS	Comedores	Fijas
Multimodos, S.C.	MULTIMODOS	Comedores	Fijas
Bodega de Autos (SETESA)	O.P.G.	Autos	Móviles

[APIVER (2012)]

4.4. Descripción del caso de estudio

Con el propósito de estimar las emisiones a la atmósfera para algunas de las actividades del recinto portuario utilizando el método de factores de emisión, se seleccionaron en esta investigación las siguientes fuentes fijas:

1. El proceso de destrucción de residuos sólidos en las instalaciones del Centro de Incineración y Manejo de Residuos (CIMAR) a cargo de APIVER,
2. El proceso de calentamiento de tanques de almacenamiento de líquidos a granel mediante dos calderas a gas natural en las instalaciones del cesionario VOPAK, y
3. El proceso de calentamiento de tanques de almacenamiento mediante una caldera a Diesel en las instalaciones del cesionario Excellence.

El caso de estudio consistió en la recopilación de niveles de actividad para estas fuentes fijas de combustión externa en el Puerto de Veracruz durante el año 2011 a los cuales se le aplicaron FE para estimar las emisiones de contaminantes criterio.

La figura 4.2 muestra la ubicación de las fuentes fijas que se estimaron (CIMAR, Vopak y Excellence). A continuación se muestra la información recopilada acerca de los procesos y los niveles de actividad.



Figura 4.2: Área caso de estudio [Google Earth (2012)]

4.4.1. Incinerador CIMAR

El sistema de incineración CIMAR fue diseñado para procesar residuos fitosanitarios y su función principal en el puerto de Veracruz es la de destruir productos que por cuestiones sanitarias no pueden ingresar nuestro país. Los residuos que se someten al proceso de incineración son: residuos orgánicos, productos de origen animal o vegetal, perecederos, madera, papel, cartón, archivo histórico y residuos textiles.

Descripción del proceso. [INCIMEX(2013)]

1. La instalación del incinerador CIMAR cuenta con un área de almacenaje y trituración para los residuos que serán destruidos. La carga a destruir es alimentada manualmente por lo que la operación del sistema es intermitente. La capacidad de la cámara de ignición es de 500 kg/h, que de acuerdo a la clasificación de U.S. EPA, el incinerador es del tipo Industrial/Comercial.
2. El Sistema consta de un *Modulo de Incineración o cámara primaria de combustión* cuya operación tiene varias etapas: precombustión, deshidratación, combustión y calcinación; una sub-cámara en la parte inferior del modulo se encarga de la destrucción de lixiviados. La inyección de aire es proporcional a la combustión y ayuda a que los residuos se consuman por si mismos cuando se ha alcanzado la temperatura de auto-combustión.
3. El flujo de gases producidos en la cámara primaria contiene gases que son, en si mismos, combustibles de bajo poder que al ser conducidos hacia el *Modulo de Post-Combustión o Cámara secundaria* pasan a través del puerto de flama donde la combustión se termina de realizar a la temperatura adecuada (950 °C) eliminando humos y olores, y de ahí a la Cámara de Retención.
4. En el *Sistema de Enfriamiento y Retención de Partículas* (SERP) el flujo de gases y partículas es enfriado mediante espreas de agua, consiguiendo que las partículas sean retenidas y enviadas a un tanque de sedimentación en el que se depositan.
5. Finalmente, las emisiones a la atmósfera son conducidas a través del ducto de la *Chimenea*.

De acuerdo con U.S. EPA, este equipo es un incinerador de residuos sólidos con aire en exceso (MOD/EA). (AP 42 Capítulo 2, Sección 2.1 "Refuse Combustion, Modular Excess-Air Combustors")

Con base a la información disponible del proceso y del equipo de incineración, se elaboró para esta actividad el diagrama que se muestra en la figura 4.3.

Descripción de la generación de contaminantes atmosféricos en el proceso de incineración.

A continuación se describe brevemente la formación de contaminantes atmosféricos en el proceso de incineración de residuos sólidos.

Óxidos de nitrógeno (NO_x) Los NO_x son producto de la combustión que se realiza en las cámaras de combustión y se forman principalmente por el exceso de aire que se le inyecta al sistema.

Bióxido de carbono (CO₂) El CO₂ se produce de la reacción de oxidación entre el carbono de los residuos y el aire adicional para formar CO₂ y H₂O. La formación de CO e hidrocarburos no quemados indica una inestabilidad y falta de uniformidad en el proceso de combustión.

Bióxido de azufre (SO₂) Las concentraciones de SO₂ en los gases de combustión se relacionan directamente con el contenido de azufre en los residuos. Las emisiones dependen de la forma química de azufre y el tipo de sistema de control de emisiones utilizado.

Partículas (PM) La cantidad de PM que son emitidas depende de las características de los residuos, el diseño y el funcionamiento de la cámara de combustión. Las mayorías de estas partículas son capturadas por el colector de partículas y no se emiten a la atmósfera.

Metales Los metales se emiten en asociación con las PM (por ejemplo As, Cd, Cr y Pb) y como gases volátiles (por ejemplo Hg). Las concentraciones de metales son muy variables, debido a la variabilidad en la composición de los residuos y son esencialmente independientes del tipo de cámara de combustión.

Las emisiones de partículas en las cámaras de combustión del sistema de incineración MOD/EA son altas en comparación con otros sistemas de incineración que no cuentan con inyección de aire en exceso, sin embargo, los NO_x procedentes de este tipo de cámaras de combustión suelen ser más bajos siempre y cuando el sistema este funcionando correctamente, por esa razón el sistema principal de control es la retención de partículas.

Descripción del nivel de actividad

Debido a que en el mes de junio del 2012 comenzó a llevarse un control de las operaciones del incinerador y de la cantidad de material incinerado, la tabla 4.3 muestra el registro de las cantidades y tipos de residuos incinerados en el periodo de junio hasta octubre del 2012.

Tabla 4.3: Cargas de incineración en el año 2012

Mes	Cantidad de material incinerado (Kg)
Junio	2,116
Julio	4,324
Agosto	2,649
Octubre	2,915

(APIVER 2012)

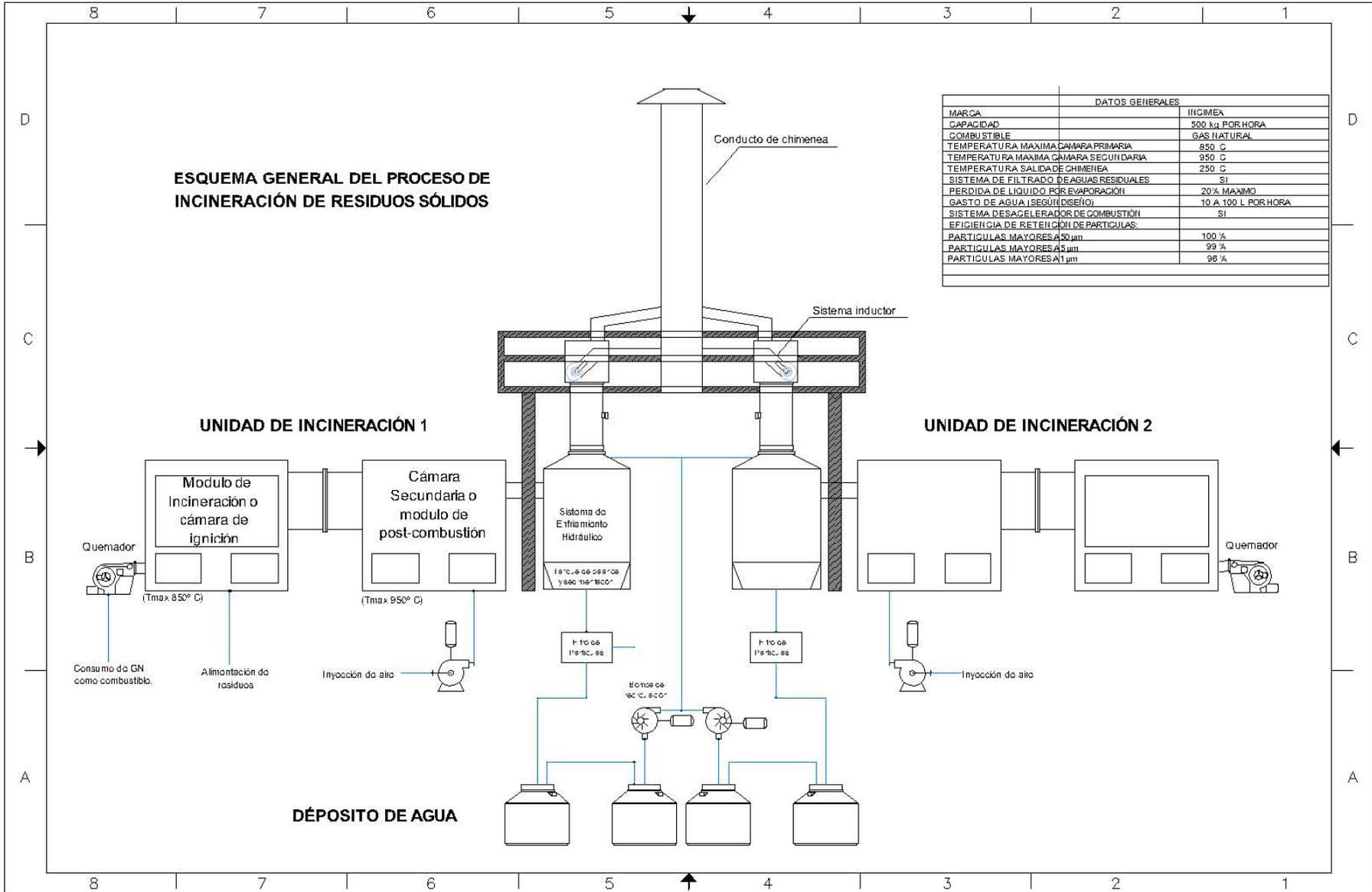


Figura 4.3: Descripción del proceso de incineración CIMAR [INCIMEX(2013)]

4.4.2. Calderas VOPAK

Vopak México es una terminal que cuenta con instalaciones de tanques de almacenamiento para líquidos a granel. Tiene una capacidad de almacenamiento de 117,200 m³, los cuales están dedicados a almacenar químicos, aceites vegetales, oleoquímicos, gas licuado y melaza. Los tanques de almacenamiento son tanques cilíndricos verticales, contruidos en acero al carbón o en acero inoxidable y de distintas capacidades que oscilan entre 300 y 11,000 m³. [VOPAK(2012)]

Descripción de la operación

La actividad comprende operaciones de transferencia de granel líquido desde los buques a los tanques de almacenamiento mediante un sistema de tuberías; posteriormente la mercancía es cargada en los camiones o vagones cisterna para ser distribuido a sus lugares de destino. [VOPAK(2012)]

Las instalaciones básicamente están constituidas por:

- Muelles y áreas de carga y descarga tanto de buques-tanque como de camiones y de vagones cisterna.
- Red de tuberías con aislamiento térmico.
- Estaciones de bombeo.
- Tanques de almacenamiento.
- Instalaciones auxiliares como calderas, inertización con nitrógeno, refrigeración y sistema contra incendios.

Se consume gas natural (GN) para el funcionamiento de las dos calderas que generan gases de combustión identificadas como fuentes fijas de emisiones atmosféricas en esta industria.

Las calderas empleadas son del tipo acuo-tubulares que están diseñadas para calentar tubos internos, por donde se hace pasar agua, a través de la transferencia de calor por contacto directo entre los gases de combustión calientes. El propósito de las calderas acuo-tubulares es el de proporcionar grandes cantidades de vapor de proceso para el calentamiento de los tanques de almacenamiento que contienen los líquidos a granel que a temperatura ambiente resulta difícil circular por las tuberías de distribución (sebo por ejemplo).

Con base a la información disponible acerca del proceso y de los equipos de combustión, se elaboró el diagrama de proceso de esta actividad portuaria que se muestra en la figura 4.4.

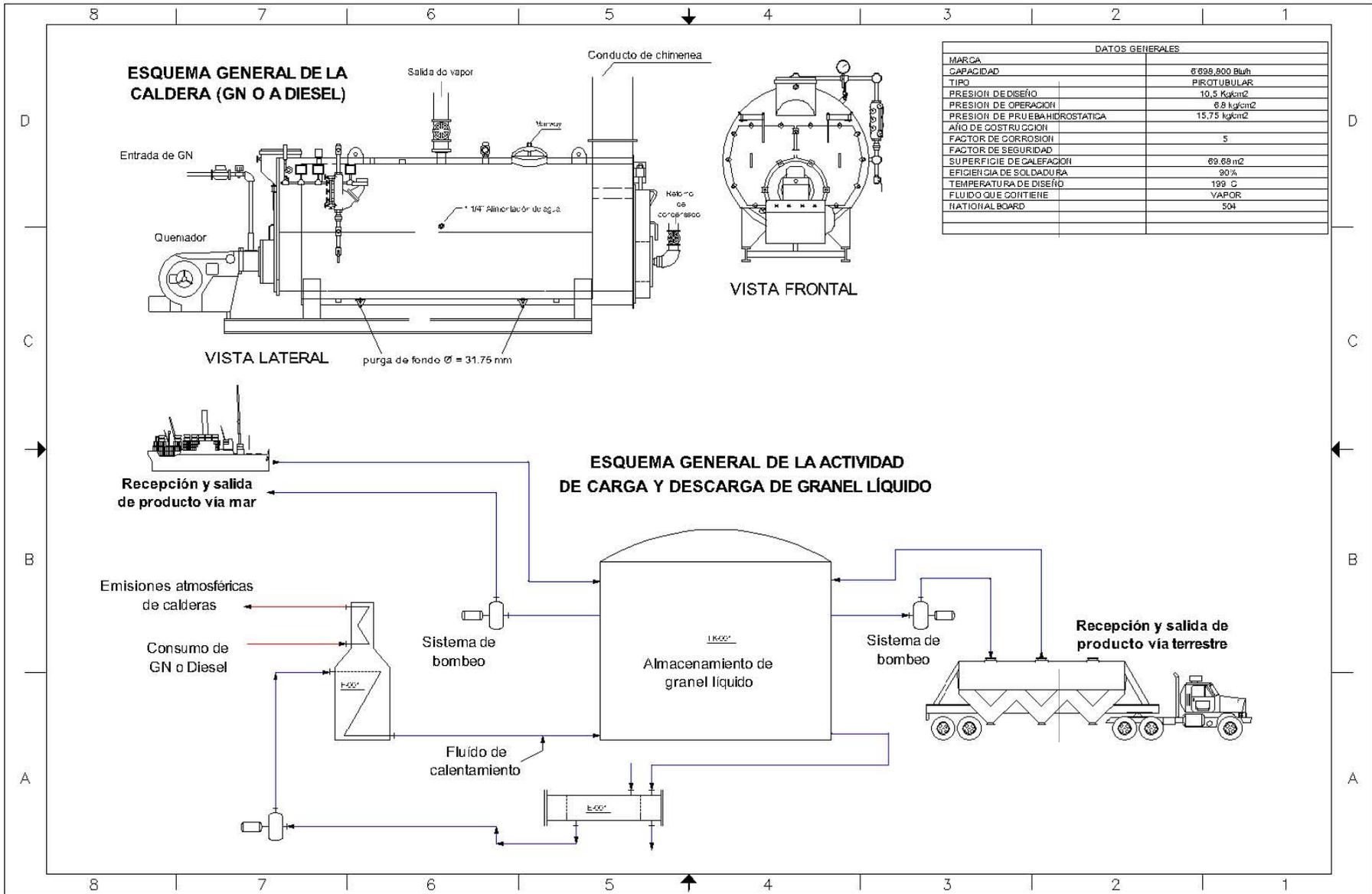


Figura 4.4: Descripción del proceso de calentamiento VOPAK [VOPAK(2012)]

Descripción de la generación de contaminantes atmosféricos en el proceso de combustión de gas natural

De acuerdo la U.S. EPA, los contaminantes emitidos en este proceso de combustión son los NO_x , CO, CO_2 , el CH_4 , N_2O , COV, rastros de SO_2 y partículas. [USEPA(1995)]

Óxidos de nitrógeno (NO_x) El NO_x térmico es el principal mecanismo de la formación de NO_x en la combustión de GN, se produce a través de la disociación térmica y la posterior reacción de las moléculas de nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) en el aire de combustión que se produce en la zona de la llama de alta temperatura cerca de los quemadores. Los factores que afectan la formación de NO_x térmico en la zona de combustión son: la concentración de oxígeno, la temperatura pico, y el tiempo de exposición a la temperatura pico. Cuando estos factores aumentan, los niveles de emisión de NO_x aumentan.

Bióxido de carbono (CO_2) Cuando una caldera funciona correctamente, casi todo el carbono del GN (99,9 por ciento) se convierte en CO_2 durante el proceso de combustión. Esta conversión es relativamente independiente de la cámara de combustión o tipo de caldera. Las emisiones de CO de las calderas depende de la eficiencia de combustión del GN, por lo que altas concentraciones de este contaminante en las emisiones de la chimenea son un buen indicador de que el equipo necesita mantenimiento.

Bióxido de azufre (SO_2) Las emisiones de SO_2 en las calderas son bajas debido a la calidad del GN que por lo general tiene niveles de azufre de 2.000 gramos por millón de pies cúbicos. Sin embargo, una práctica es añadir sustancias olorosas que contienen azufre al GN para la detección de fugas, lo que conduce a pequeñas cantidades de emisiones de SO_2 .

Partículas (PM) Las emisiones de partículas de la combustión de GN son típicamente bajas y han sido estimada en menos de 1 micrómetro de tamaño.

Gases de efecto invernadero (GEI) Aparte de CO_2 , durante la combustión del GN se producen el CH_4 y N_2O . Comúnmente las condiciones que favorecen la formación de N_2O también favorecen las emisiones de metano. La formación de N_2O durante el proceso de combustión se ve afectada por la temperatura de combustión y el exceso de oxígeno, si la temperatura se mantiene alta (por encima de 800°C) y el exceso de oxígeno se mantiene a un mínimo (menos de 1 por ciento) las emisiones de N_2O se reducen al mínimo. Las emisiones de metano son más altas durante la combustión a baja temperatura o como resultado de una combustión incompleta, como el ciclo de puesta en marcha o apagado de las calderas.

Descripción del nivel de actividad

En la tabla 4.4 se muestra el consumo de GN total anual en el año 2011, así como las características más relevantes del equipo y de la operación.

Tabla 4.4: **Características de las calderas**

Equipo	Capacidad de operación del equipo (Btu/hr)	Tipo de combustible	Tipo de quemador	Consumo anual (m³)	Sistema o equipo de control
Caldera 1	6'698,800	Gas natural	de cañón	359,900	Ninguno
Caldera 2	6'698,800	Gas natural	de cañón	1'079,687	Ninguno

[APIVER (2012)]

Estos datos fueron obtenidos a través de la Cédula de Operación Anual (COA) de Vopak del año 2011.

4.4.3. Caldera EXCELLENCE

Excellence es una terminal marítima que ofrece servicios de almacenaje, manejo y custodia de fluidos en el puerto de Veracruz con instalaciones para carga y descarga de fluidos a granel. Cuenta con dos posiciones de atraque y cada posición de atraque cuenta con líneas de descarga, válvulas, mangueras y conexiones independientes para garantizar el servicio de descarga de sus productos. Las líneas para la carga y descarga cuentan con aislamiento térmico, lo que permite que el producto no se enfríe en las tuberías evitando posibles mermas. Cuenta con 18 tanques con una capacidad total de 50,200 m³, 14 tanques de acero al carbón de 3,100 m³ de capacidad cada uno y 4 tanques de acero al carbón de 1,700 m³ de capacidad cada uno. [IDESA (2013)]

Descripción de la operación

Al igual que con las instalaciones de VOPAK, la actividad comprende operaciones de transferencia de granel líquido, almacenamiento en tanques y distribución a sus lugares de destino. Las instalaciones están básicamente constituidas por:

- Muelles de carga y descarga de buques-tanque y área de carga y descarga de camiones y de vagones cisterna
- Red de tuberías con aislamiento térmico
- Estaciones de bombeo
- Tanques de almacenamiento
- Instalaciones auxiliares como calderas, inertización con nitrógeno, refrigeración y sistema contra incendios.

El Diesel es el combustible consumido en este proceso de combustión y que se utiliza en el funcionamiento de una caldera de tipo acuo-tubular que es la fuente fija de emisiones atmosféricas.

La figura 4.4 muestra un esquema de la operación de la caldera instalada en EXCELLENCE.

Descripción de la generación de contaminantes atmosféricos en el proceso de combustión de Diesel

Las emisiones de contaminantes atmosféricos en el proceso de combustión de las calderas que queman Diesel como combustible dependen de la composición del combustible, el tipo y el tamaño de la caldera y el nivel de mantenimiento de los equipos. En general, las emisiones de estas fuentes, cuando no tienen instalado ningún equipo de control, abarca tanto contaminantes criterio como contaminantes no criterio.

Óxidos de nitrógeno (NO_x) Los NO_x formados en este proceso de combustión se deben principalmente al mecanismo de NO_x térmico en la combustión de Diesel. Se ha demostrado que para la mayoría de los sistemas de combustión de combustibles fósiles el 95 por ciento de los NO_x son emitidos en forma de óxido nítrico (NO). Los factores que afectan la formación de NO_x térmico en la zona de combustión son: Temperatura pico, la concentración de nitrógeno en el combustible, la concentración de oxígeno, y (el tiempo de exposición a la temperatura pico. Las tendencias de las emisiones debido a los cambios en estos factores son generalmente consistentes para todos los tipos de calderas: un aumento de la temperatura de la llama, la disponibilidad de oxígeno, y/o tiempo de permanencia a altas temperaturas conduce a un aumento en la producción de NO_x.

Bióxido de carbono (CO₂) Cuando una caldera funciona correctamente, casi todo el carbono del Diesel (99,9 por ciento) se convierte en CO₂ durante el proceso de combustión. Esta conversión es relativamente independiente de la cámara de combustión o tipo de caldera.

Monóxido de carbono (CO) Las emisiones de CO dependen de la eficacia de combustión del combustible. La presencia de CO en los gases de escape son resultado principalmente de la combustión incompleta de combustible ocasionado por la insuficiencia de O₂, una mezcla no cuantitativa de aire/combustible, extinción de la llama, reducción de la temperatura de combustión, disminución del tiempo de residencia de los gases de combustión, y la reducción de la carga (es decir, la reducción de la intensidad de la combustión), así que al controlar cuidadosamente el proceso de combustión, las emisiones de CO pueden reducirse al mínimo.

Óxidos de azufre (SO_x) Las emisiones de SO_x se generan durante la combustión del combustible y dependen casi en su totalidad del contenido de azufre en el combustible, no se ven afectados por el tamaño de la caldera y diseño del quemador. En promedio, más de 95 por ciento del azufre en el combustible se convierte en SO₂, aproximadamente 1 a 5 por ciento se oxida adicionalmente a trióxido de azufre (SO₃), y de 1 a 3 por ciento se emite como partículas de sulfato.

Partículas (PM) En general, las emisiones de partículas dependen de la integridad de la combustión, así como en el contenido de cenizas en el combustible. Las PM emitidas por calderas alimentadas con Diesel comprende principalmente partículas carbonosas resultantes de la combustión incompleta del combustible y no se correlaciona con el contenido de ceniza o de azufre del Diesel.

Compuestos orgánicos volátiles (COV) Al igual que con las emisiones de CO, la velocidad a la que se emiten compuestos orgánicos depende, en cierta medida, de la eficiencia de la combustión de la caldera. Por lo tanto, cualquier modificación de combustión que reduzca la eficiencia de la combustión aumentará las concentraciones de los compuestos orgánicos en los gases de combustión.

Gases de efecto invernadero (GEI) Aparte de CO₂, durante la combustión del Diesel se producen el CH₄ y N₂O por la temperatura de combustión y el exceso de oxígeno. Las emisiones de N₂O pueden variar ampliamente de una unidad a otra, o incluso en la misma unidad en diferentes condiciones de funcionamiento, por ejemplo la puesta en marcha o apagado de las calderas.

Descripción del nivel de actividad

En la tabla 4.5 se muestra el consumo de Diesel en el año 2012, así como las características más relevantes del equipo y de la operación. Dichos datos fueron proporcionados por la APIVER.

Tabla 4.5: **Características de la caldera de EXCELLENCE**

Equipo	Capacidad de operación del equipo (Btu/hr)	Tipo de combustible	Tipo de quemador	Consumo anual (L)	Sistema o equipo de control
Caldera 1	4'182,641.4	Diesel	de cañón	732,336	Ninguno

[APIVER (2012)]

La caldera instalada en Excellence tiene una capacidad de 4413 MJ/h, consume 104.5 L/h de combustible Diesel y opera con un factor de operación anual del 80 % en promedio, con estos datos se calculó el consumo anual de combustible Diesel.

5 Resultados y discusión

5.1. Resultados de la estimación de emisiones para las fuentes fijas del caso de estudio

5.1.1. Resultados de la estimación de emisiones atmosféricas del incinerador

De acuerdo con las características del incinerador del Centro de Incineración y Manejo de Residuos (CIMAR) la ecuación para estimar las emisiones corresponde a:

$$Emisión = FE \times Actividad \times Control \quad (5.1)$$

Las emisiones de este equipo incluyen las de la carga a incinerar y las de la operación, los FE incluyen el sistema de control del equipo.

El análisis dimensional de la ecuación 5.1 quedaría como sigue:

$$E = \frac{kg \text{ de contaminante}}{Ton \text{ de residuos}} \times \frac{Ton \text{ de residuos}}{año} \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) = \frac{kg \text{ de contaminante}}{año}$$

La tabla 5.1 muestra los resultados obtenidos para el incinerador con el dato de carga alimentada en el mes de julio de 2012 utilizando la ecuación 5.1. (Ver cálculos en el Anexo)

Como se observa en la tabla 4.3 la actividad está reportada mensualmente por esa razón las emisiones están reportadas en kg/mes.

Tabla 5.1: Cálculo de emisiones del incinerador.

Resultados utilizando la ecuación 5.1					
Carga alimentada mes de julio 4.324 (Ton/mes)					
FE (kg/Ton de residuos)	NO _x	SO ₂	PM	Pb	CO ₂
	1.24	1.73	12.6	0.17	9.85 × 10 ²
Calidad	A	A	A	A	D
Eficiencia de control (%)	NA	NA	96	NA	NA
Emisiones (kg _{contaminante} /mes)	5.36	7.48	2.18	7.35 × 10 ⁻¹	4.26 × 10 ⁻³

La tabla 5.2 muestra las emisiones estimadas para los meses reportados en la tabla 4.3.

Tabla 5.2: Emisiones mensuales del incinerador del incinerador CIMAR.

Resultados utilizando la ecuación 5.1

Emisiones (kg de contaminante/mes)						
Mes	Carga (ton)	NO _x	SO ₂	PM	Pb	CO ₂
Junio	2.116	2.62	3.66	1.07	3.60×10^{-1}	2.08×10^{-3}
Julio	4.324	5.36	7.48	2.18	7.35×10^{-1}	4.26×10^{-3}
Agosto	2.649	3.28	4.58	1.34	4.50×10^{-1}	2.61×10^{-3}
Octubre	2.915	3.61	5.04	1.47	4.96×10^{-1}	2.87×10^{-3}

Como se observa en la tabla 5.2 el contaminante que es emitido en mayor cantidad es el CO₂, siendo el mes de julio el que mayor emisiones registro durante la operación del incinerador que corresponde al mes en que más carga fue destruida. Cabe señalar que los FE presentados en la tabla 5.1 son para un incinerador tipo MOD/EA sin control.

Se debe solicitar que se lleve a cabo un registro anual de la carga destruida con la finalidad de tener un reporte de emisiones anuales para el incinerador.

5.1.2. Resultados de la estimación de emisiones atmosféricas de las calderas de VOPAK

La ecuación para calcular las emisiones producidas en las calderas es la siguiente:

$$E_{total} = FE \times Consumo \quad (5.2)$$

Como no se reporta la operación de algún sistema de control, el análisis dimensional de la ecuación 5.2 quedaría como sigue:

$$E = \frac{kg \text{ de contaminante}}{10^6 m^3 \text{ de GN}} \times \frac{m^3 \text{ de GN}}{año} = \frac{kg \text{ de contaminante}}{año}$$

Los resultados se muestran en la tabla 5.3 donde se reportan las emisiones anuales para las calderas 1 y 2 utilizando la ecuación 5.2. (Ver cálculos en el Anexo)

Tabla 5.3: Cálculo de emisiones de las calderas de VOPAK.

Contaminante	FE(kg/10 ⁶ m ³ de GN)	Calidad	Consumo GN 359,900 m ³ /año	Consumo GN 1'079,687 m ³ /año
			Emisiones Caldera 1 (kgcontaminante/año)	Emisiones Caldera 2 (kgcontaminante/año)
NO_x	2240	A	806.17	2.42 $\frac{Ton}{año}$
CO	560	B	201.54	604.62
SO₂	9,6	A	3.46	10.37
Pb	0,008	D	0.0029	0.0086
CO₂	1920000	A	691 $\frac{Ton}{año}$	2073 $\frac{Ton}{año}$
CH₄	36,8	B	13.24	39.73
COV	88	C	31.7	95
PM_{Total}	0.24	D	43.76	131.3

5.1.3. Resultados de la estimación de emisiones atmosféricas de la caldera de Excellence

La ecuación para calcular las emisiones producidas en la caldera es la siguiente:

$$E_{contaminante} = FE \times Consumo \quad (5.3)$$

Como no se reporta la operación de algún sistema de control, el análisis dimensional de la ecuación 5.3 quedaría como sigue:

$$E = \frac{kg \text{ de contaminante}}{10^3 L \text{ de Diesel}} \times \frac{L \text{ de Diesel}}{año} = \frac{kg \text{ de contaminante}}{año}$$

Los resultados utilizando la ecuación 5.3 se muestran en la tabla 5.4 donde se reportan las emisiones anuales para la caldera de Excellence. (Ver cálculos en el Anexo)

Tabla 5.4: Cálculo de emisiones de la caldera de Excellence

Contaminante	FE (kg/10 ³ L de Diesel)	Calidad	Emisiones (kg _{contaminante} /año)
NO_x	2.4	A	374.4
CO	0.6	A	439.4
CO₂	3000	A	1986.1 $\frac{Ton}{año}$
Pb	1.08	C	790.9
SO₂	0.5112	A	374.4
SO₃	0.0072	A	5.3
CH₄	0.00624	A	4.6
NMCOT	0.024	A	17.6
PM	0.24	D	175.8

5.2. Comparación de las emisiones globales de las calderas

Debido a que no se cuenta con una estimación anual de los contaminantes emitidos por el incinerador, la figura 5.1 muestra la proporción de emisiones únicamente para las calderas del caso de estudio, de las cuales la caldera 2 de Vopak es la que emite la mayor cantidad de NO_x , CO, CH_4 , PM_{tot} y COV, mientras que la caldera de Excellence es la que mayor cantidad de Pb, SO_2 y PM emite, esto es congruente con el tipo y cantidad de combustible que consumen las calderas, cabe recordar que la caldera 2 de Vopak consume $1'079,687 \text{ m}^3$ de GN al año mientras que la caldera de Excellence consume $732,336 \text{ L}$ de Diesel, porque como se mencionó en la sección caso de estudio la composición del combustible esta ligada a las emisiones de estos equipos.

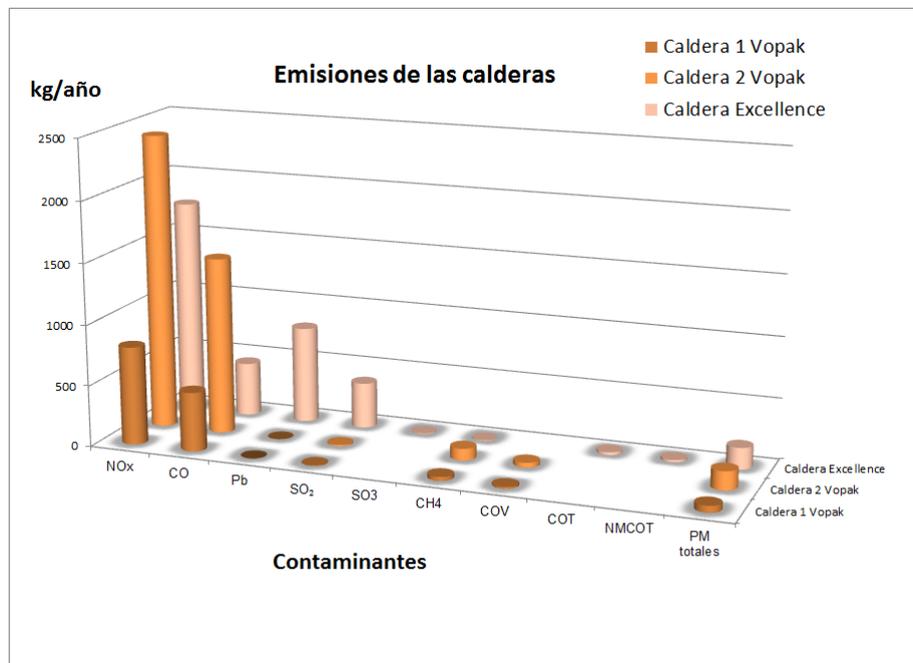


Figura 5.1: Emisiones estimadas

La figura 5.2 muestra las emisiones de CO₂ de las calderas tanto de Vopak como de Excellence.

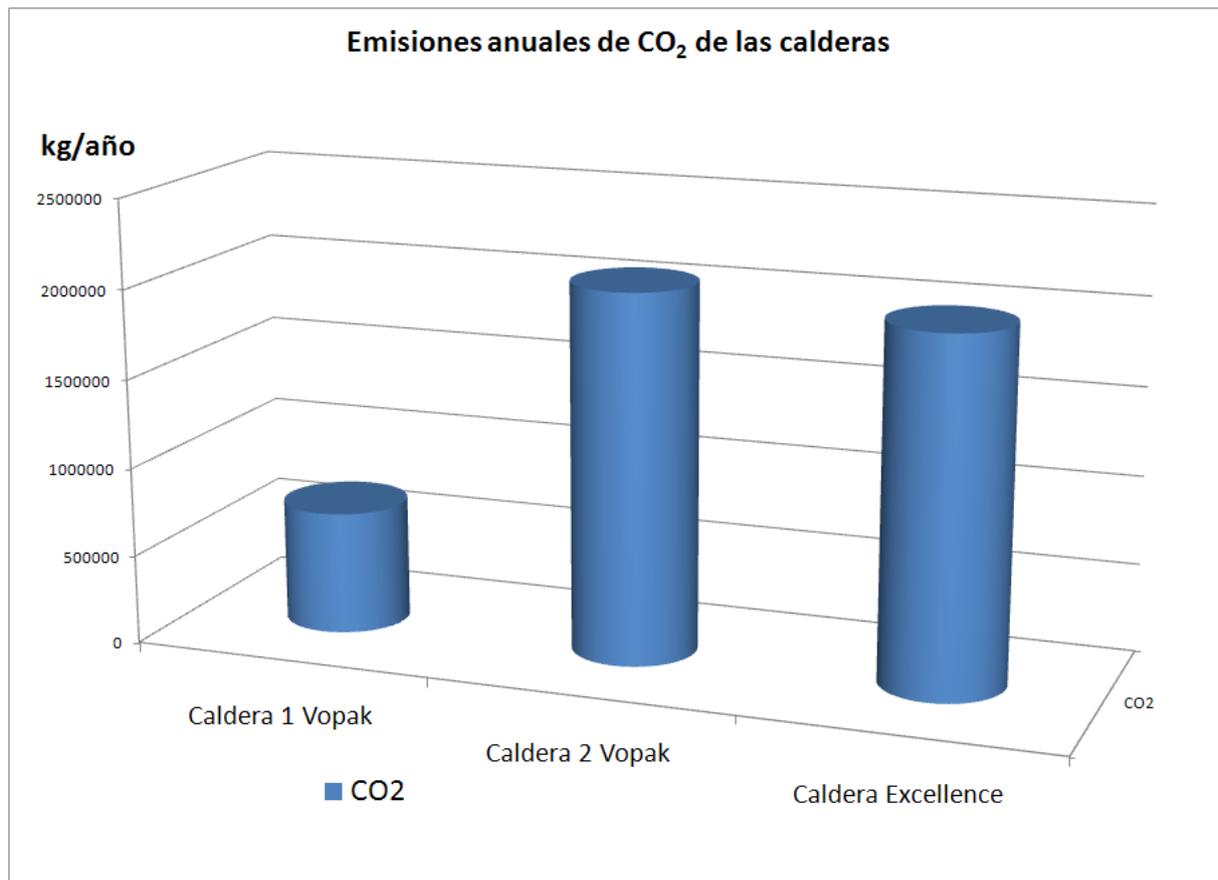


Figura 5.2: **Emisiones estimadas de CO₂ para las calderas del caso de estudio**

De acuerdo con la figura 5.2 la caldera 2 de Vopak es la que emite mayor cantidad de CO₂. Conforme al mecanismo de formación de este contaminante durante el proceso de combustión, el FE que se aplicó se basa en la suposición de que el 99 % de carbono en el combustible (GN) se convierte a CO₂, a diferencia del cálculo para la caldera de Excellence que consume Diesel y cuyo FE involucra el por ciento de carbono que contiene el combustible.

5.3. Evaluación y comparación de las emisiones de la caldera de Excellence consumiendo Diesel (actual) y consumiendo gas natural (propuesta)

A continuación se muestran los resultados de una simulación de las emisiones producidas por la caldera de Excellence si ésta consumiera GN para producir la misma energía que produce con Diesel. Lo anterior con el propósito de comparar las emisiones

generadas por los dos tipos de combustibles y tener las bases para recomendar medidas para la reducción de emisiones.

La ecuación para calcular el consumo de gas natural como combustible de la caldera de Excellence es la siguiente:

$$NA_{Diesel} \times PC_{Diesel} = NA_{Gas\ Natural} \times PC_{Gas\ Natural} \quad (5.4)$$

Despejando el nivel de actividad del GN de la ecuación 5.4 y sustituyendo los valores conocidos del consumo anual de Diesel así como de los poderes caloríficos de Diesel y GN, se obtiene el nivel de actividad expresado en consumo anual de gas natural:

$$NA_{Gas\ Natural} = 7.284492 \times 10^8 \frac{m^3\ de\ GN}{año}$$

Con este valor de nivel de actividad y aplicandolo a la ecuación 5.2 se comparan a continuación las emisiones estimadas para la caldera de Excellence a Diesel (actual) y a GN (propuesta) (ver cálculos en el Anexo):

Tabla 5.5: Comparación de emisiones de la caldera de Excellence

Contaminante	FE (kg/10 ³ L de Diesel)	Emisiones (kg _{contaminante} /año)	FE(kg/10 ⁶ m ³ de GN)	Emisiones (kg _{contaminante} /año)
NO_x	2.4	374.4	2240	1631.66
CO	0.6	439.4	560	407.91
CO₂	3000	1986.1 $\frac{Ton}{año}$	1920000	1398.6 $\frac{Ton}{año}$
Pb	1.08	790.9	0.008	0.006
SO₂	0.5112	374.4	9.6	7
SO₃	0.0072	5.3	N/A	-----
CH₄	0.00624	4.6	36.8	26.8
NMCOT	0.024	17.6	-----	-----
COV	-----	-----	88	64.1
PM	0.24	175.8	0.24	110.7

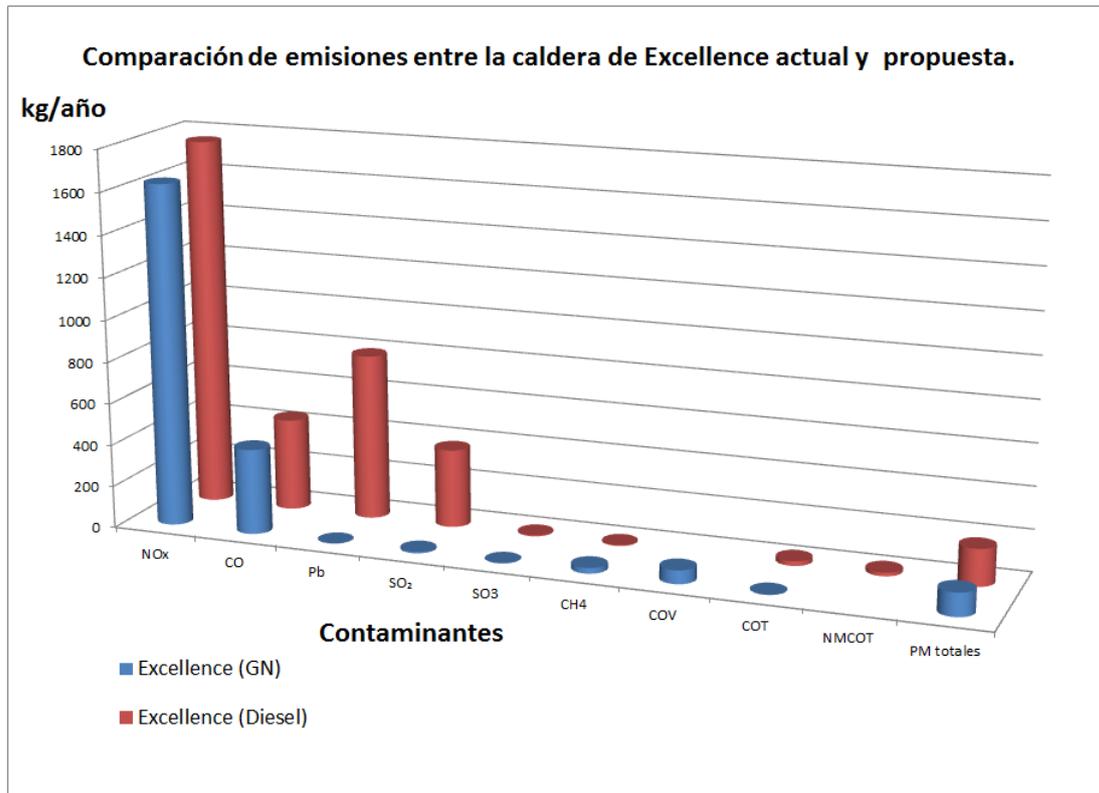


Figura 5.3: Emisiones anuales para la caldera de Excellence utilizando Diesel (actual) y gas natural (propuesta).

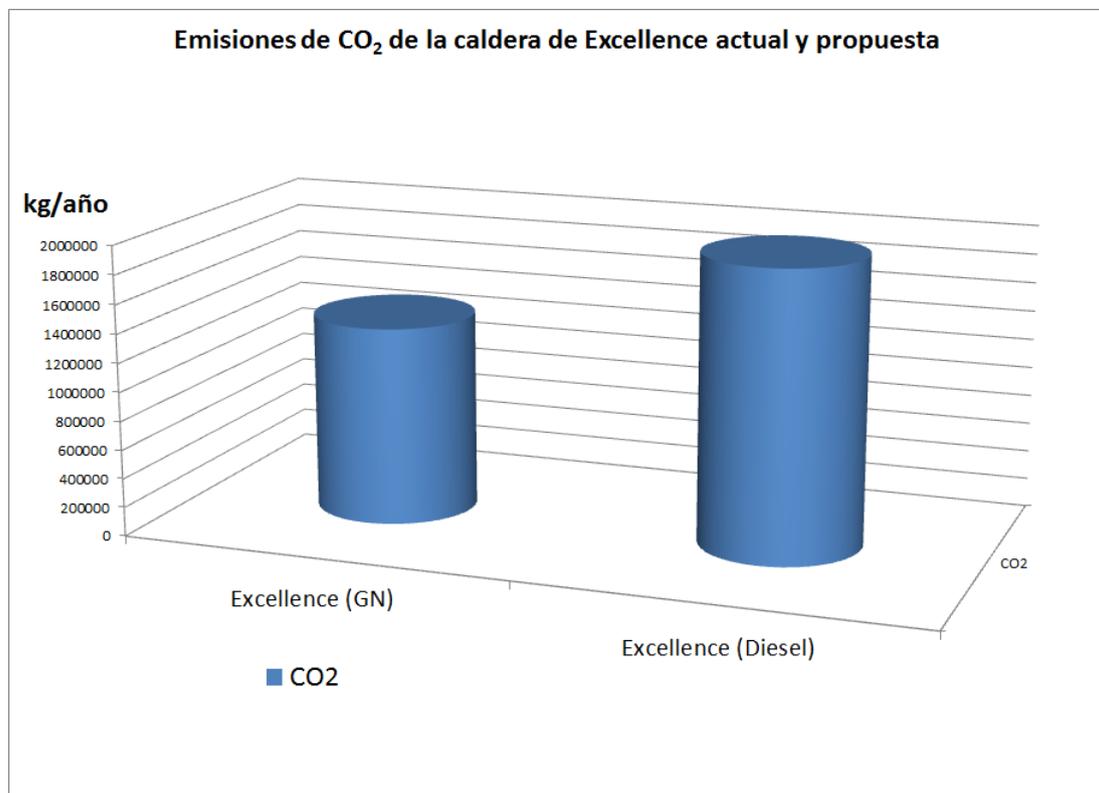


Figura 5.4: Emisiones anuales de CO₂ suponiendo misma cantidad de energía entregada al proceso.

Las figuras 5.3 y 5.4 muestran que el uso de GN como combustible emitiría menor cantidad de contaminantes como Pb, SO₂, CO, PM, COT e incluso CO₂ y NO_x; sin embargo las emisiones de CH₄ se elevarían hasta cuatro veces más de las que se emiten con Diesel como combustible. Los altos valores de emisiones de CO₂, CO y CH₄ son resultado de la composición del GN como combustible, aunque, como se menciona anteriormente, la presencia de altas concentraciones de CO en una caldera que quema GN es un indicador de que la caldera necesita mantenimiento o de que la operación de la misma ha sido inadecuada. Por otro lado, los altos valores de emisiones de NO_x son resultado exclusivamente del proceso de combustión.

Si bien se considera al GN como un combustible más limpio que el carbón y los derivados del petróleo, las emisiones de contaminantes en un proceso de combustión como los de estos casos de estudio están directamente relacionadas con la cantidad de consumo.

Finalmente cabe recordar que los FE dan una buena aproximación de las emisiones de un proceso, pero como ya se menciona, el factor de emisión es sólo el promedio de un intervalo de emisiones y los FE utilizados en este documento son representativos para las condiciones de operación de equipos en los Estados Unidos de Norteamérica, por lo que desarrollar y aplicar FE para las condiciones de operación en México daría resultados más próximos a la realidad.

6 Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

De acuerdo con el tipo de combustible:

- Para el proceso de combustión de las calderas que consumen gas natural (GN), los contaminantes que emiten en orden decreciente de cantidad son: CO_2 , NO_x , CO , $\text{PM}_{\text{totales}}$, CH_4 , Pb , COV y SO_2 ; mientras que para la caldera que consume Diesel los contaminantes que emite en orden decreciente de cantidad son: CO_2 , NO_x , Pb , CO , SO_2 , PM , COT , CH_4 , COV , NMCO , SO_3 y CH_4 .
- Para el caso de la caldera-2 de Vopak, la estimación de emisiones indica que este equipo es el que mayor cantidad de contaminantes emite y que las cantidades de emisión están relacionadas directamente con la cantidad de combustible que consume al año.
- Haciendo una simulación de la operación de la caldera 1 de Excellence utilizando GN y comparando las emisiones contra las que emite con Diesel, el uso de GN emitiría menor cantidad de CO_2 , CO , NO_x , PM , SO_2 y Pb , sin embargo aumentarían las emisiones de CH_4 y COV debido principalmente a la composición del combustible.
- De acuerdo con el registro de operaciones del incinerador (se analizaron cuatro meses), los contaminantes que emite en orden decreciente de cantidad son: CO_2 , SO_2 , NO_x , PM y Pb , ya que la cantidad de emisión de cada contaminante depende de la carga alimentada para su destrucción.
- La precisión de los FE puede disminuir si estos no son aplicados para el equipo y las condiciones de operación particulares para los que fueron desarrollados, de tal forma que la incertidumbre de los cálculos está ligada a las suposiciones en cuanto al contenido de carbono en el combustible (caso de la caldera que quema Diesel).
- Para poder aplicar correctamente los factores de emisión se debe comprender como se desarrollaron y las limitaciones e incertidumbre que su uso presenta al

momento de hacer una estimación; es imprescindible entender el proceso que genera la emisión, esto es, caracterizar la fuente (móvil o fija, tipo de equipo, transporte o proceso), tipo de control y el tipo y las características del combustible que se consume, así como registrar la actividad que realiza por hora, día, mes o año dependiendo del tipo de fuente al cual se le quiere aplicar el factor de emisión.

Recomendaciones

- Para poder ampliar y mejorar éste trabajo es necesario contar con más información del recinto portuario acerca de los niveles de actividad de cada actividad portuaria para que en la medida de lo posible la metodología de la U.S. EPA sea aplicable al recinto portuario sin ninguna limitación.
- Solicitar a la APIVER y a cesionarios llevar un registro de los niveles de actividad de los equipos o procesos que están dentro de sus instalaciones y clasificarlas de acuerdo al tipo de fuente (móviles o fijas). De esta forma se podrían desarrollar inventarios locales que incluyan la estimación de las emisiones de las fuentes involucradas en el desarrollo de la actividad portuaria para después conjuntamente cesionarios y la APIVER puedan desarrollar un inventario global en el recinto portuario.
- Considerar la conversión de la caldera de Excellence que actualmente opera utilizando Diesel como combustible a gas natural, ya que esto reduciría las emisiones de contaminantes criterio tales como PM, Pb, SO₂, CO así como del gas de efecto invernadero CO₂.
- Considerar que las estimaciones se pueden hacer con variabilidad temporal la cual puede ser diaria, mensual, estacional, etc.
- Desarrollar factores de emisión específicos para las condiciones de operación en nuestro país.

Bibliografía

APA. 2007. "Manual de buenas prácticas ambientales en el puerto de Alicante". Autoridad Portuaria de Alicante. Puerto de Alicante, España.

APIVER. 2012. "Programa Maestro de Desarrollo Portuario de Veracruz" Autoridad Portuaria Integral de Veracruz.

Disponible en: http://www.apiver.com/apiver/archivos/PMDP_actual.pdf (*Consultado el 20 de septiembre de 2013*)

Boubel R.W., Fox D. L., Stern A. C., Turner B. 1994. "Fundamentals of air pollution". Academic Press, San Diego, California USA, 3rd edition.

Corey G., Bravo A. H., Fortoul T., Gutiérrez J. H., Romieu I., Sosa E. R. 1997. "Contaminación del aire; riesgos para la salud" Facultad de Medicina, UNAM/Editorial El Manual Moderno, S.A. de C.V.

Cureño G. I. V. 2010. "Determinación de factores de emisión aplicables a México para centrales termoeléctricas que consumen combustóleo como combustible". Tesis de Maestría, Facultad De Ingeniería UNAM.

Cureño G. I., Bravo A. H., Sosa E. R. 2012. "The importance of the generation of emission factors for developing countries: Case of Mexico" Journal of Environmental Science & Engineering, 1A(1):495-502, Abril 2012.

DEFRA. 2010. "ENTEC. Entec UK ship emissions inventory final report". Department for Environment, Food and Rural Affairs. Disponible en:

http://uk-air.defra.gov.uk/reports/cat15/1012131459_21897_Final_Report_291110.pdf (*Consultado el 20 de septiembre de 2013*)

GOOGLE. 2013. Puerto de Veracruz, Zona Federal, Veracruz, VER. Google Maps.

Disponible en: <https://maps.google.com.mx/> (*Consultado el 21 de septiembre de 2013*)

IDESA. 2013. Excellence Sea & Land Logistics, Grupo IDESA.

Disponible en: <http://www.excellencell.com/es/content/servicios-e-infraestructura>. (*Consultado el 21 de septiembre de 2013*)

Guevara V.M. 2010. "Inventario de emisiones atmosféricas de puertos y aeropuertos de España para el año 2008. Anexos". Proyecto de fin de carrera ingeniero industrial. Tesis de Maestría, Escuela Técnica Superior de ingeniería Industrial de Barcelona.

Disponible en: http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10640/2/PFC_Anexos.pdf (*Consultado el 18 de febrero de 2013*)

Hunt W. Jr., Mobley D., Pouliot G., Wisner E. 2012. "Quantification of emission factor uncertainty". Journal of the Air & Waste Management Association, 62(3):287–298

Incineradores INCIMEX. 2013.

Disponible en: <http://www.excellencesll.com/es/content/servicios-e-infraestructura>.
(Consultado el 21 de septiembre de 2013)

INE. 2009a. Inventarios de emisiones. Instituto Nacional de Ecología.

Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/calair-información-basica/552-calair-inv-emisiones>. (Consultado el 6 de marzo de 2013)

INE. 2009b. Normativa. Instituto Nacional de Ecología.

Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/calair-información-basica/564-calair-normatividad-normas>. (Consultado el 6 de marzo de 2013)

INE. 2012. Contaminantes criterio. Instituto Nacional de Ecología.

Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/calair-indicadores/523-calair-cont-criterio>.
(Consultado el 6 de marzo de 2013)

IPCC. 1996. "Guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference manual energy". Intergovernmental Panel on Climate Change.

Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5a.html>
(Consultado el 6 de marzo de 2013)

Sistema de indicadores ambientales para el sistema portuario español (INDAPORT).

2004. Disponible en: <http://www.imarpor.pt/pdf/home/d3.pdf>
(Consultado el 18 de febrero de 2013)

Jáuregui G. C. M. 2009. "Reestructuración y desarrollo en los puertos mexicanos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes Asociación Americana de Autoridades Portuarias. XVIII Congreso Latinoamericano de Puertos".

PEMEX. 2013. Especificaciones Técnicas Diesel bajo azufre Anexo 11. PEMEX

Disponible en:

http://www.ref.pemex.com/files/content/02franquicia/sagli002/sagli002_05ab.html
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

SEMARNAT. 2001. "Guía para la correcta selección y empleo de métodos de estimación de emisiones contaminantes". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tlalpan México D.F., 1ª edición.

Truyols M. S. 2010. "Economía, ingeniería y logística portuaria. Teoría y práctica". Delta publicaciones, Collado Villalba, Madrid España, 2ª edición, 2010.

USEPA. 2013. Emissions factors AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors.

Disponible en: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

USEPA. 2005. Best practices in preparing port emission inventories. Draft for review. U S Environmental Protection Agency. Disponible en: http://www.epa.gov/otaq/stateresources/rellinks/docs/bp_portemissions.pdf
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

USEPA. 2008. "RIA: Regulatory impact analysis: Control of emissions of air pollution from locomotive engines and marine compression-ignition engines less than 30 liters per cylinder (epa420-r-08-001)". U S Environmental Protection Agency - Office of Transportation and Air Quality (OAR).
Disponible en: <http://www.epa.gov/nonroad/420d07001.pdf>
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

USEPA. 2009a. Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories. U S Environmental Protection Agency
Disponible en: <http://epa.gov/cleandiesel/documents/ports-emission-inv-april09.pdf>
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

USEPA. 2009b. "Emission factors for locomotives. Technical Highlights EPA- 420-F-09-025". Office of Transportation and Air Quality; Assessment and Standards Division, April 2009. U S Environmental Protection Agency.
Disponible en: <http://www.epa.gov/nonroad/locomotv/420f09025.pdf>
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

USEPA. 2010. The final findings were published in the federal register. U S Environmental Protection Agency.
Disponible en: <http://www.epa.gov/climatechange/endangerment/>
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

USEPA. 2010. "Median life, annual activity, and load factor values for non- road engine emissions modeling" U S Environmental Protection Agency.
Disponible en:
<http://www.epa.gov/otaq/models/nonrdmdl/nonrdmdl2010/420r10016.pdf>
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

USEPA. 2010c. "Recommended procedures for development of emissions factors and use of the webfire emissions factor database" U S Environmental Protection Agency.
Disponible en:
<http://www.epa.gov/ttnchie1/efpac/procedures/procedures81213.pdf>
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

VOPAK, 2012. Disponible en: http://www.bnamericas.com/company-profile/es/Vopak_Mexico_-_Terminal_Veracruz-Vopak_Mexico_-_Terminal_Veracruz
(Consultado el 20 de septiembre de 2013)

WGA. 1996. "Manuales del programa de inventarios de emisiones de México volumen IV desarrollo del inventario de fuentes puntuales. Western Governors Association And Binational Advisory Committee, USEPA, INE y SEMARNAP.

Anexo

Cálculos incinerador

Estimación de emisiones atmosféricas por contaminante

Óxidos de nitrógeno. (Mes de julio)

Utilizando la ecuación 5.1:

$$E_{NO_x} = FE_{NO_x} \times NA_{julio} \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

donde:

$E_{NO_x} = \frac{kg \text{ de } NO_x}{mes}$ es la emisión de óxidos de nitrógeno,

$FE_{NO_x} = \frac{1.24 \text{ kg de } NO_x}{Ton \text{ de residuos}}$ es el factor de emisión de óxidos de nitrógeno (AP-42, Sección 2.1),

$NA_{julio} = \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{mes}$ es el nivel de actividad del incinerador en el mes de julio expresado como las toneladas de residuos destruidos y

$ER = 0$ es la eficiencia de reducción de emisiones y que es cero para este contaminante porque el equipo no cuenta con un sistema de control de NOx.

Entonces:

$$E_{NO_x} = \frac{1.24 \text{ kg de } NO_x}{Ton \text{ de residuos}} \times \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{mes} \times \left(1 - \frac{0}{100}\right) = 5.36 \frac{kg \text{ de } NO_x}{mes}$$

Partículas

$$E_{PM} = FE_{PM} \times NA_{julio} \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

donde:

$E_{PM} = \frac{kg \text{ de } PM}{mes}$ es la emisión de partículas,

$FE_{PM} = \frac{12.6 \text{ kg de } PM}{Ton \text{ de residuos}}$ es el factor de emisión de partículas (AP-42, Sección 2.1),

$$NA_{julio} = \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{\text{mes}} \text{ y}$$

$ER = 96$ es la eficiencia de reducción de emisiones de partículas.

Entonces:

$$E_{PM} = \frac{12.6 \text{ kg de PM}}{\text{Ton de residuos}} \times \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{\text{mes}} \times \left(1 - \frac{96}{100}\right) =$$

$$E_{PM} = 54.48 \frac{\text{kg de PM}}{\text{mes}} \times (0.04) = 2.179296 \frac{\text{kg de PM}}{\text{mes}}$$

Plomo

$$E_{Pb} = FE_{Pb} \times NA_{julio} \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

donde:

$E_{Pb} = \frac{\text{kg de PM}}{\text{mes}}$ es la emisión de plomo,

$FE_{Pb} = \frac{0.17 \text{ kg de Pb}}{\text{Ton de residuos}}$ es el factor de emisión de plomo (AP-42, Sección 2.1),

$$NA_{julio} = \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{\text{mes}} \text{ y}$$

$ER = 0$ es la eficiencia de reducción de emisiones y que es cero para este contaminante porque el equipo no cuenta con un sistema de control de Pb.

Entonces:

$$E_{Pb} = \frac{0.17 \text{ kg de Pb}}{\text{Ton de residuos}} \times \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{\text{mes}} \times \left(1 - \frac{0}{100}\right) = 7.35 \times 10^{-1} \frac{\text{kg de PM}}{\text{mes}}$$

Bióxido de azufre

$$E_{SO_2} = FE_{SO_2} \times NA_{julio} \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

donde:

$E_{SO_2} = \frac{\text{kg de } SO_2}{\text{mes}}$ es la emisión de bióxido de azufre,

$FE_{SO_2} = \frac{1.73 \text{ kg de } SO_2}{\text{Ton de residuos}}$ es el factor de emisión de bióxido de azufre (AP-42, Sección 2.1),

$$NA_{julio} = \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{\text{mes}} \text{ y}$$

$ER = 0$ es la eficiencia de reducción de emisiones y que es cero para este contaminante porque el equipo no cuenta con un sistema de control de SO_2 .

Entonces:

$$E_{SO_2} = \frac{1.73 \text{ kg de } SO_2}{\text{Ton de residuos}} \times \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{\text{mes}} \times \left(1 - \frac{0}{100}\right) = 7.48 \frac{\text{kg de } SO_2}{\text{mes}}$$

Bióxido de carbono

$$E_{CO_2} = FE_{CO_2} \times NA_{julio} \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

donde:

$E_{CO_2} = \frac{\text{kg de } CO_2}{\text{mes}}$ es la emisión de bióxido de carbono,

$FE_{CO_2} = \frac{9.85 \times 10^2 \text{ kg de } CO_2}{\text{Ton de residuos}}$ es el factor de emisión de bióxido de carbono (AP-42, Sección 2.1),

$NA_{julio} = \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{\text{mes}}$ y

$ER = 0$ es la eficiencia de reducción de emisiones y que es cero para este contaminante porque el equipo no cuenta con un sistema de control de CO_2 .

Entonces:

$$E_{CO_2} = \frac{9.85 \times 10^2 \text{ kg de } CO_2}{\text{Ton de residuos}} \times \frac{4.324 \text{ Ton de residuos}}{\text{mes}} \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) = 4.26 \times 10^3 \frac{\text{kg de } CO_2}{\text{mes}}$$

La tabla 5.1 muestra los resultados obtenidos

Cálculos calderas 1 y 2 de VOPAK

Estimación de emisiones atmosféricas por contaminante

Óxidos de nitrógeno

Caldera₁ (Gas natural)

Haciendo uso de la ecuación 5.2

$$E_{NO_x} = FE_{NO_x} \times NA_1$$

donde:

$E_{NO_x} = \frac{\text{kg}}{\text{año}}$ es la emisión de óxidos de nitrógeno,

$FE_{NO_x} = \frac{2240 \text{ kg de } NO_x}{10^6 \text{ m}^3 \text{ de GN}}$ es el factor de emisión de óxidos de nitrógeno (AP-42 sección 1.4) y

$NA_1 = \frac{359,000 \text{ m}^3 \text{ de GN}}{\text{año}}$ es el nivel de actividad de la Caldera₁ expresado como el consumo de GN y cuyo dato fue obtenido de la COA de VOPAK del año 2011.

Entonces:

$$E_{NO_x} = \frac{2240 \text{ kg de } NO_x}{10^6 \text{ m}^3 \text{ de GN}} \times \frac{359,000 \text{ m}^3 \text{ de GN}}{\text{año}} = 806.17 \frac{\text{kg de } NO_x}{\text{año}}$$

Monóxido de carbono

$$E_{CO} = FE_{CO} \times NA_1$$

donde:

$E_{CO} = \frac{\text{kg}}{\text{año}}$ es la emisión de monóxido de carbono,

$FE_{CO} = \frac{560 \text{ kg de CO}}{10^6 \text{ m}^3 \text{ de GN}}$ es el factor de emisión de monóxido de carbono (AP-42, Sección 1.4) y

$$NA_1 = \frac{359,000 \text{ m}^3 \text{ de GN}}{\text{año}}$$

Entonces:

$$E_{CO} = \frac{1344 \text{ kg de CO}}{10^6 \text{ m}^3 \text{ de GN}} \times \frac{359,000 \text{ m}^3 \text{ de GN}}{\text{año}} = 201.54176 \frac{\text{kg de CO}}{\text{año}}$$

Plomo

$$E_{Pb} = FE_{Pb} \times NA_1$$

donde:

$E_{Pb} = \frac{\text{kg}}{\text{año}}$ es la emisión de plomo,

$FE_{Pb} = \frac{0.008 \text{ kg de PM}}{10^6 \text{ m}^3 \text{ de GN}}$ es el factor de emisión de plomo (AP-42, Sección 1.4) y

$$NA_1 = \frac{359,000 \text{ m}^3 \text{ de GN}}{\text{año}}$$

Entonces:

$$E_{Pb} = \frac{0.008 \text{ kg de PM}}{10^6 \text{ m}^3 \text{ de GN}} \times \frac{359,000 \text{ m}^3 \text{ de GN}}{\text{año}} = 2.879168 \times 10^{-3} \frac{\text{kg de Pb}}{\text{año}}$$

Bióxido de azufre

$$E_{SO_2} = FE_{SO_2} \times NA_1$$

donde:

$E_{SO_2} = \frac{kg}{año}$ es la emisión de dióxido de azufre,

$FE_{SO_2} = \frac{9.6 kg de SO_2}{10^6 m^3 de GN}$ es el factor de emisión de dióxido de azufre (AP-42, Sección 1.4) y

$$NA_1 = \frac{359,000 m^3 de GN}{año}$$

Entonces:

$$E_{SO_2} = \frac{9.6 kg de SO_2}{10^6 m^3 de GN} \times \frac{359,000 m^3 de GN}{año} = 3.4550016 \frac{kg de SO_2}{año}$$

Partículas totales

$$E_{PM_{Totales}} = FE_{PM_{Totales}} \times NA_1$$

donde:

$E_{PM_{Totales}} = \frac{kg}{año}$ es la emisión de partículas,

$FE_{PM_{Totales}} = \frac{121.6 kg de PM_{Totales}}{10^6 m^3 de GN}$ es el factor de emisión de partículas (AP-42, Sección 1.4) y

$$NA_1 = \frac{359,000 m^3 de GN}{año}$$

Entonces:

$$E_{PM_{Totales}} = \frac{121.6 kg de PM_{Totales}}{10^6 m^3 de GN} \times \frac{359,000 m^3 de GN}{año} = 43,7633536 \frac{kg de PM_{Totales}}{año}$$

Bióxido de carbono

$$E_{CO_2} = FE_{CO_2} \times NA_1$$

donde:

$E_{CO_2} = \frac{ton}{año}$ es la emisión de bióxido de carbono,

$FE_{CO_2} = \frac{1.92 \times 10^6 \text{ kg de } CO_2}{10^6 m^3 \text{ de } GN}$ es el factor de emisión dióxido de carbono (AP-42, Sección 1.4) y

$$NA_1 = \frac{359,000 m^3 \text{ de } GN}{año}$$

Entonces:

$$E_{CO_2} = \frac{1.92 \times 10^6 \text{ kg de } CO_2}{10^6 m^3 \text{ de } GN} \times \frac{359,000 m^3 \text{ de } GN}{año} \times \frac{1 ton}{1000 kg} = 691.00032 \frac{ton \text{ de } CO_2}{año}$$

Metano

$$E_{CH_4} = FE_{CH_4} \times NA_1$$

donde:

$E_{CH_4} = \frac{kg}{año}$ es la emisión de metano,

$FE_{CH_4} = \frac{36.8 \text{ kg de } CH_4}{10^6 m^3 \text{ de } GN}$ es el factor de emisión de metano (AP-42, Sección 1.4) y

$$NA_1 = \frac{359,000 m^3 \text{ de } GN}{año}$$

Entonces:

$$E_{CH_4} = \frac{36.8 \text{ kg de } CH_4}{10^6 m^3 \text{ de } GN} \times \frac{359,000 m^3 \text{ de } GN}{año} = 13.2441728 \frac{kg \text{ de } CH_4}{año}$$

Compuestos Orgánicos Volátiles

$$E_{COV} = FE_{COV} \times NA_1$$

donde:

$E_{COV} = \frac{kg}{año}$ es la emisión de compuestos orgánicos volátiles,

$FE_{COV} = \frac{88 \text{ kg de } COV}{10^6 m^3 \text{ de } GN}$ es el factor de emisión de compuestos orgánicos volátiles (AP-42, Sección 1.4) y

$$NA_1 = \frac{359,000 \text{ m}^3 \text{ de GN}}{\text{año}}$$

Entonces:

$$E_{COV} = \frac{88 \text{ kg de COV}}{10^6 \text{ m}^3 \text{ de GN}} \times \frac{359,000 \text{ m}^3 \text{ de GN}}{\text{año}} = 31,670848 \frac{\text{kg de COV}}{\text{año}}$$

Los cálculos para la caldera 2 son similares, estos resultados se incluyen en la tabla 5.3 donde se reportan las emisiones anuales para las calderas 1 y 2.

Cálculos caldera Excellence

Estimación de emisiones atmosféricas por contaminante

Óxidos de nitrógeno

Haciendo uso de la ecuación 5.3

$$E_{NO_x} = FE_{NO_x} \times NA$$

donde:

$E_{NO_x} = \frac{\text{kg}}{\text{año}}$ es la emisión de óxidos de nitrógeno,

$FE_{NO_x} = \frac{2.4 \text{ kg de } NO_x}{10^3 \text{ L de Diesel}}$ es el factor de emisión de óxidos de nitrógeno (AP-42 sección 1.3)

y

$NA = \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}}$ es el nivel de actividad de la Caldera expresado como el consumo de Diesel.

Entonces:

$$E_{NO_x} = \frac{2.4 \text{ kg de } NO_x}{10^3 \text{ L de Diesel}} \times \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}} = 1757.6064 \frac{\text{kg de } NO_x}{\text{año}}$$

Partículas

$$E_{PM} = FE_{PM} \times NA$$

donde:

$E_{PM} = \frac{kg}{año}$ es la emisión de partículas,

$FE_{PM} = \frac{0.24 kg de PM}{10^3 L de Diesel}$ es el factor de emisión de partículas (AP-42, Sección 1.3) y

$$NA = \frac{732.336 \times 10^3 L de Diesel}{año}$$

Entonces:

$$E_{PM} = \frac{0.24 kg de PM}{10^3 L de Diesel} \times \frac{732.336 \times 10^3 L de Diesel}{año} = 175.76064 \frac{kg de PM}{año}$$

Monóxido de carbono

$$E_{CO} = FE_{CO} \times NA$$

donde:

$E_{CO} = \frac{kg}{año}$ es la emisión de monóxido de carbono,

$FE_{CO} = \frac{0.6 kg de CO}{10^3 L de Diesel}$ es el factor de emisión de monóxido de carbono (AP-42, Sección 1.3) y

$$NA = \frac{732.336 \times 10^3 L de Diesel}{año}$$

Entonces:

$$E_{CO} = \frac{0.6 kg de CO}{10^3 L de Diesel} \times \frac{732.336 \times 10^3 L de Diesel}{año} = 439.4016 \frac{kg de CO}{año}$$

Plomo

$$E_{Pb} = FE_{Pb} \times NA$$

donde:

$E_{Pb} = \frac{kg}{año}$ es la emisión de plomo,

$FE_{Pb} = \frac{1.08 kg de PM}{10^3 L de Diesel}$ es el factor de emisión de plomo (AP-42, Sección 1.3) y

$$NA = \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}}$$

Entonces:

$$E_{Pb} = \frac{1.08 \text{ kg de PM}}{10^3 \text{ L de Diesel}} \times \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}} = 790.92288 \frac{\text{kg de Pb}}{\text{año}}$$

Bióxido de azufre

$$E_{SO_2} = FE_{SO_2} \times NA$$

donde:

$E_{SO_2} = \frac{\text{kg}}{\text{año}}$ es la emisión de dióxido de azufre,

$FE_{SO_2} = \frac{(17.04 \times S) \text{ kg de } SO_2}{10^3 \text{ L de Diesel}}$ es el factor de emisión de dióxido de azufre (AP-42, Sección 1.3), donde S es por ciento de azufre contenido en el combustible y que es igual 0.03 % [PEMEX (2013)]; y

$$NA = \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}}$$

Entonces:

$$E_{SO_2} = \frac{(17.04 \times 0.03) \text{ kg de } SO_2}{10^3 \text{ L de Diesel}} \times \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}} = 374.3701632 \frac{\text{kg de } SO_2}{\text{año}}$$

Trióxido de azufre

$$E_{SO_3} = FE_{SO_3} \times NA$$

donde:

$E_{SO_3} = \frac{\text{kg}}{\text{año}}$ es la emisión de trióxido de azufre,

$FE_{SO_3} = \frac{(0.24 \times S) \text{ kg de } SO_3}{10^3 \text{ L de Diesel}}$ es el factor de emisión de trióxido de azufre (AP-42, Sección 1.3), donde S es por ciento de azufre contenido en el combustible y que es igual 0.03 % [PEMEX (2013)]; y

$$NA = \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}}$$

Entonces:

$$E_{SO_3} = \frac{(0.24 \times 0.03) \text{ kg de } SO_3}{10^3 \text{ L de Diesel}} \times \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}} = 5.2728192 \frac{\text{kg de } SO_3}{\text{año}}$$

Bióxido de carbono

$$E_{CO_2} = FE_{CO_2} \times NA$$

donde:

$E_{CO_2} = \frac{\text{ton}}{\text{año}}$ es la emisión de dióxido de carbono,

$FE_{CO_2} = \frac{2712.0408 \text{ kg de } CO_2}{10^3 \text{ L de Diesel}}$ es el factor de emisión bióxido de carbono que de acuerdo con la U.S. EPA corresponde a la formula $FE_{CO_2} = 259C \frac{\text{lb de } CO_2}{10^3 \text{ gal de Diesel}}$, donde C es el porcentaje de carbono en el combustible, se supuso un valor de C = 87.26 % para el combustible Diesel bajo en azufre de acuerdo con la U.S. EPA (AP-42, Sección 1.3).

$$NA = \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}}$$

Entonces:

$$E_{CO_2} = \frac{3000 \text{ kg de } CO_2}{10^3 \text{ L de Diesel}} \times \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} = 1986.1251 \frac{\text{ton de } CO_2}{\text{año}}$$

Metano

$$E_{CH_4} = FE_{CH_4} \times NA$$

donde:

$E_{CH_4} = \frac{\text{kg}}{\text{año}}$ es la emisión de metano,

$FE_{CH_4} = \frac{6.24 \times 10^{-3} \text{ kg de } CH_4}{10^3 \text{ L de Diesel}}$ es el factor de emisión de metano (AP-42, Sección 1.3) y

$$NA = \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}}$$

Entonces:

$$E_{CH_4} = \frac{6.24 \times 10^{-3} \text{ kg de } CH_4}{10^3 \text{ L de Diesel}} \times \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}} = 4.56977664 \frac{\text{kg de } CH_4}{\text{año}}$$

Compuestos Orgánicos Totales No Metano

$$E_{NMCOT} = FE_{NMCOT} \times NA$$

donde:

$E_{NMCOT} = \frac{kg}{año}$ es la emisión de compuestos orgánicos totales no metano,

$FE_{NMCOT} = \frac{0.024 \text{ kg de NMCOT}}{10^3 \text{ L de Diesel}}$ es el factor de emisión de compuestos orgánicos totales no metano (AP-42, Sección 1.3) y

$$NA = \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{año}$$

Entonces:

$$E_{NMCOT} = \frac{0.024 \text{ kg de NMCOT}}{10^3 \text{ L de Diesel}} \times \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{año} = 17.576064 \frac{\text{kg de NMCOT}}{año}$$

Los resultados se muestran en la tabla 5.4 donde se reportan las emisiones anuales para la caldera de Excellence.

Cálculos caldera Excellence a Diesel (actual) y a gas natural (propuesta)

La ecuación para calcular la energía producida utilizando Diesel como combustible es la siguiente:

$$NA_{Diesel} \times PC_{Diesel} = NA_{Gas Natural} \times PC_{Gas Natural}$$

de

Energía proporcionada al proceso:

$$Nivel de actividad \times Poder calorífico = Energía producida$$

sustituyendo los siguientes datos

Poder calorífico del Diesel:

$$Poder calorífico_{Diesel} = 9.3 \times 10^6 \frac{kcal}{m^3 \text{ de Diesel}} = 9.3 \times 10^3 \frac{kcal}{L \text{ de Diesel}} \text{ (AP-42 apéndice A)}$$

y Nivel de actividad de consumo de Diesel:

$$NA_{Diesel} = \frac{732.336 \times 10^3 \text{ L de Diesel}}{\text{año}} = \frac{0.732336 \times 10^6 \text{ L de Diesel}}{\text{año}}$$

se obtiene que la energía producida utilizando Diesel como combustible es:

Energía proporcionada al proceso:

$$\frac{0.732336 \times 10^6 \text{ L de Diesel}}{\text{año}} \times 9.3 \times 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{de Diesel}} = 6.811 \times 10^8 \frac{\text{kcal}}{\text{año}}$$

Despejando el nivel de actividad de la ecuación 5.4 y sustituyendo los valores de energía proporcionada al proceso y poder calorífico del GN, se obtiene el nivel de actividad basado en el consumo de gas natural:

Poder calorífico del gas natural:

$$Poder\ calorífico_{GN} = 9350 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \text{ (AP-42 apéndice A)}$$

se tiene que el consumo anual de GN sería:

$$NA_{GN} = \frac{6.811 \times 10^8 \frac{\text{kcal}}{\text{año}}}{9,350 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}} = 7.284492 \times 10^5 \frac{\text{m}^3 \text{ de GN}}{\text{año}}$$

Con este valor de nivel de actividad y aplicandolo a la ecuación 5.2 se compararon las emisiones estimadas para la caldera de Excellence a Diesel (actual) y a GN (propuesta) (tabla 5.5)