

Agradecimientos

El “*Cuaderno de Trabajo para la Capacitación Avanzada en la Metodología del Proyecto del Inventario de Emisiones de México*” fue el resultado de los esfuerzos de diversos participantes. El Comité Asesor Binacional (BAC, por sus siglas en inglés), condujo el desarrollo de estos manuales. Los miembros del BAC son:

Dr. John R. Holmes, Consejo de Recursos del Aire del Estado de California
Mr. William B. Kuykendal, Agencia de Protección Ambiental de EU
Mr. Gary Neuroth, Departamento de Calidad Ambiental de Arizona
Dr. Víctor Hugo Páramo, Instituto Nacional de Ecología
Mr. Gerardo Rios, Agencia de Protección Ambiental de EU
Mr. Carl Snow, Comisión para la Conservación de los Recursos Naturales de Texas

La Asociación de Gobernadores del Oeste (WGA, por sus siglas en inglés), fue la entidad rectora de este proyecto. El Sr. John T. Leary fungió como Gerente de Proyecto de la WGA. El financiamiento para el desarrollo del cuaderno de trabajo fue aportado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U. S. EPA, por sus siglas en inglés). Radian International elaboró el cuaderno bajo la guía de los participantes del BAC y WGA.

RCN 670-017-52-02

**CUADERNO DE TRABAJO PARA LA CAPACITACION AVANZADA
EN LA METODOLOGIA PARA EL PROYECTO
DEL INVENTARIO DE EMISIONES DE MEXICO**

FINAL

Elaborado para:

La Asociación de Gobernadores del Oeste
Denver, Colorado

y

El Comité Asesor Binacional

Elaborado por:

Radian International LLC
10389 Old Placerville Road
Sacramento, CA 95827

Septiembre, 1997

CONTENIDO

	Pág.
Introducción	1
Ejemplo 1 Motores Estacionarios de Combustión Interna	1-1
Ejemplo 1 Motores Estacionarios de Combustión Interna – Información Complementaria	1-7
Ejemplo 2a Equipos de Combustión Externa – Prorrates de Combustible	2-1
Ejemplo 2b Equipos de Combustión Externa – Factores de Emisión	2-4
Ejemplo 2c Equipos de Combustión Externa – Otras Técnicas de Estimación	2-6
Ejemplo 3 Combustión Residencial	3-1
Ejemplo 4 Sistema de Distribución de Gasolina	4-1
Ejemplo 4a - Tanque de Almacenamiento Aéreo para Despacho a Granel	4-3
Ejemplo 4a – Información Complementaria - Estimación de Especies Individuales	4-14
Ejemplo 4a – Información Complementaria -Comparación de la Ley de Raoult con Otros Métodos	4-18
Ejemplo 4b Emisiones Fugitivas (Fugas del Equipo)	4-20
Ejemplo 4c Emisiones de la Carga de Pipas	4-25
Ejemplo 4d Emisiones de las Pipas en Tránsito	4-30
Ejemplo 4e Emisiones del Llenado de Tanques Subterráneos	4-33
Ejemplo 4f Emisiones de la Respiración de Tanques Subterráneos	4-36
Ejemplo 4g Emisiones en la Carga de Combustible en Vehículos	4-38
Ejemplo 4 – Resumen	4-42
Ejemplo 5a Evaporación de Solventes – Desengrasado	5-1
Ejemplo 5b Evaporación de Solventes – Recubrimiento de Superficies	5-7
Ejemplo 6 Emisiones de Chimenea en Fuente Puntual	6-1
Ejemplo 7 Partículas – Estimación de PM ₁₀ , PM _{2.5} , Carbono Orgánico y Carbono Elemental	7-1
Referencias	8-1

APENDICE A: DATOS MISCELANEOS Y FACTORES DE CONVERSION

APENDICE B: INDICE DE EJEMPLOS EN LOS MANUALES DEL INVENTARIO DE EMISIONES DE MEXICO

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1-1 Correspondencia entre la Relación Aire a Combustible (RAC), Relación de Equivalencia Aire/Combustible (REAC) y Contaminantes Emitidos	1-9
4-1 Fuentes de Emisión del Sistema de Distribución de Gasolina	4-2

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1-1 Factores de Emisión para Motores Industriales a Diesel no Controlados	1-3
2-1 Distribución de Combustible para los Equipos de Combustión Externa en Tortillerías	2-2
2-2 Datos de Prueba en Fuente y Cálculo de Factores de Emisión para Incinerador de Vapores	2-10
2-3 Comparación de los Factores de Emisión Calculados	2-17
4-1 Resumen de los Resultados para la Mezcla de Gasolina Sin Plomo en Verano	4-19
4-2 Factores de Emisión Promedio	4-22
4-3 Factores de Emisión de Separación de Intervalos	4-23
4-4 Factores de Saturación (S) para Calcular las Pérdidas de Carga de Petróleo Líquido	4-26
4-5 Propiedades Físicas de la Gasolina	4-26
4-6 Factores de Emisiones No Controladas para Pipas de Gasolina	4-31
4-7 Factores de Emisión para el Llenado de Tanques Subterráneos en Gasolineras	4-34
4-8 Resumen de las Emisiones del Sistema de Distribución de Gasolina	4-42
5-1 Datos de la Bitácora de Uso de Solventes	5-2
5-2 Datos de Consumo de Solvente	5-3

LISTA DE TABLAS (Continuación)

	Pág.
5-3 Características de los Materiales para el Recubrimiento de Superficies	5-8
5-4 Eficiencias de Transferencia en el Recubrimiento de Superficies	5-11
7-1 Multiplicadores para el Tamaño de Partícula de Polvo para Caminos Pavimentados y No Pavimentados del AP-42	7-2
7-2 Fracciones de Masa de Polvo para Caminos Pavimentados y No Pavimentados de la Base de Datos SPECIATE	7-3
7-3 Fracciones de Masa de Polvo para Caminos Pavimentados y No Pavimentados de la ARB	7-4
7-4 Emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ Calculadas a Partir de Diferentes Fracciones de Tamaño	7-6
7-5 Datos Hipotéticos del Muestreo de co y CE	7-7
7-6 Cálculo de Emisiones de co y CE	7-9

LISTA DE ACRONIMOS

bbbl	barriles
Btu	Unidad térmica británica
C	Celsius
C ₈ H ₁₈	octano
CE	carbón elemental
CFC	clorofluorocarbono
cfm	pie cúbico por minuto
CI	combustión interna
co	carbón orgánico
CO	monóxido de carbono
CO ₂	dióxido de carbono
EC	eficiencia de control
ec	encendido por chispa
ERD	eficiencia de remoción de la destrucción
EU	Estados Unidos
F	Fahrenheit
ft	pie
ft ³	pie cúbico
g	gramo
gal	galón
GOR	gas orgánico reactivo

GOT	gas orgánico total
H ₂ O	agua
hr	hora
HVLP	alto volumen/baja presión
IC	ignición por compresión
J	joule
kcal	kilocaloría
kg	kilogramo
kW	kilowatt
lb	libra
LPG	gas licuado de petróleo (gas LP)
m	metro
m ³	metro cúbico
MEK	metil-etil-cetona
Mg	megagramo (i.e. 10 ⁶ g = 1 tonelada métrica)
mg	miligramo
ml	mililitro
MMBtu	10 ⁶ unidades térmicas británicas
mmHg	milímetros de mercurio
MMscf	10 ⁶ pies cúbicos estándar
mol	mol
MW	peso molecular

n	número de moles
N ₂	Nitrógeno
ng	nanogramo
NMHC	hidrocarburos no metánicos
NO ₂	dióxido de nitrógeno
NO _x	óxidos de nitrógeno
O ₂	Oxígeno
P	Presión
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PM	Material particulado (partículas)
PM ₁₀	Partículas de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros
PM _{2.5}	Partículas de diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros
ppmv	partes por millón - volumen
psi	libras por pulgada cuadrada
psia	libras por pulgada cuadrada absolutas
psig	libras por pulgada cuadrada (manométrica)
PSM	multiplicador del tamaño de partícula
PST	partículas suspendidas totales
PVR	presión de vapor de Reid
R	constante de los gases ideales
R	Rankine
RAC	relación aire a combustible

REAC	relación de equivalencia aire/combustible
scf	pie cúbico estándar
scfm	pie cúbico estándar por minuto
SIG	Sistema de Información Geográfica
sm ³	metro cúbico estándar
SO _x	óxidos de azufre
T	temperatura
TAA	tanque de almacenamiento aéreo
U.S. EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
V	volumen
VKT	kilómetros recorridos por vehículo
wt%	porcentaje en peso
µg	microgramo
µm	micrómetro (micrón)

Introducción

Objetivo y Alcance

El objetivo de este cuaderno de trabajo consiste en proporcionar ejemplos de problemas que ilustren las diversas técnicas para la estimación de emisiones que son utilizadas durante el desarrollo de un inventario de emisiones. El material que se presenta en este cuaderno pretende por un lado, facilitar los programas de capacitación, y por otro, ser utilizado como un recurso documental durante el desarrollo de estimaciones de emisiones por parte de diversas autoridades estatales y municipales.

Este cuaderno de trabajo contiene ejemplos apegados a la realidad, cada uno de los cuales ha sido cuidadosamente redactado para explicar en detalle las bases de cada técnica de estimación, así como cualesquier supuestos inherentes a ésta. Se ha puesto un énfasis especial para explicar el proceso de razonamiento y las decisiones que pueden tomarse al aplicar la técnica ilustrada. El material de este cuaderno de trabajo mostrará el uso de principios ingenieriles específicos e ilustrará la aplicación del juicio ingenieril y las técnicas de solución de problemas para el desarrollo de los estimados de emisiones en México.

Retos de las Técnicas de Emisión (“Más Allá del Libro de Cocina”)

Con la información suficiente, el cálculo de los estimados de emisión de cualquier fuente es, en general, un ejercicio matemático directo. Es posible hacer una analogía en el sentido de que las técnicas de estimados de emisión son tan directas como recetas en un libro de cocina. Sin embargo, cuando se conduce un inventario de emisiones real, a menudo existen fuentes individuales o categorías de fuentes completas para las que el desarrollo de estimados de emisión no es tan simple. Para aplicar la analogía del libro de cocina, existen fuentes y categorías de fuente para las que no existen recetas sencillas.

El problema que se encuentra con mayor frecuencia en cualquier proyecto de inventario de emisiones es la falta de información. En estos casos, la tarea de estimar las emisiones se hace más compleja, y se requiere la aplicación del juicio ingenieril y diversas habilidades para la resolución de problemas. En este cuaderno de trabajo, el Ejemplo 3 (Combustión Residencial) fue desarrollado específicamente para ilustrar algunas de las técnicas que son utilizadas de manera típica para subsanar la falta de datos. Este Ejemplo es una discusión detallada de la metodología utilizada durante el desarrollo de un inventario de emisiones atmosféricas de tóxicos para Nogales, Sonora.

Cuatro de los métodos más comunes para remediar la falta de datos consisten en:

- Derivar la información necesaria a partir de los datos disponibles
- Desarrollar enfoques alternativos razonables para estimar las emisiones
- Aplicar supuestos y estimados limitados al problema
- Recopilar datos adicionales.

El Ejemplo 3 ilustra el proceso de decisión utilizado para seleccionar el más apropiado de estos métodos. Algunos otros ejemplos en este cuaderno de trabajo también ilustran las técnicas que pueden utilizarse para remediar la falta de datos (ver Ejemplos 2a y 7).

Otras dificultades que se encuentran comúnmente al conducir un inventario de emisiones incluyen:

- La selección de la técnica de estimación de emisiones adecuada para cada fuente, incluyendo la selección de los factores de emisión
- El asegurar una precisión razonable en los datos utilizados para elaborar el estimado, incluyendo la selección de la información de fuentes de datos conflictivas

- La verificación de que las emisiones calculadas constituyan una estimación realista de las emisiones verdaderas de la fuente. Si las emisiones calculadas no son realistas, o si no existe una base de comparación razonable, entonces es necesario calcular el nivel de incertidumbre del estimado.

Para lograr el estimado de emisiones más razonable y realista, es necesario identificar y caracterizar todos los tipos y fuentes de emisión posibles, seleccionar las técnicas de estimación adecuadas, desarrollar una comprensión de las técnicas seleccionadas, hacer cualesquier supuestos necesarios y reunir, o desarrollar de alguna otra forma, los datos necesarios para los cálculos. Una vez que la información necesaria esté disponible, los estimados de emisión deben prepararse y documentarse a fondo. Adicionalmente, y como aspecto crítico de la calidad general de cualquier proyecto técnico similar al desarrollo de estimados de emisión, se encuentra la revisión consistente por parte de expertos. Los revisores en general, son personas familiarizadas con la fuente de emisión específica, con experiencia en el campo de la estimación de emisiones. Cada decisión, suposición y cálculo debe ser revisado detalladamente para asegurar la precisión y racionalidad de los estimados finales.

Al igual que en cualquier otro proyecto ingenieril o de investigación científica de gran magnitud, con frecuencia existen muchos problemas interesantes y demandantes que deben ser resueltos durante un esfuerzo de desarrollo de inventario de emisiones. Varios de los problemas más comunes han sido analizados en los ejemplos que se presentan en este cuaderno de trabajo. Como se explica en esta sección y se ilustra en el resto del documento, los problemas más frecuentes no siempre tienen soluciones simples. Los responsables de la elaboración de estimados de emisión se beneficiarán de un entendimiento más profundo de los principios y supuestos inherentes a cada una de las técnicas que se ilustran en este cuaderno de trabajo que, el cual, a su vez, está integrado por siete ejemplos:

- Ejemplo 1 – Motores Estacionarios de Combustión Interna
- Ejemplo 2 – Equipos de Combustión Externa
- Ejemplo 3 – Calefacción Residencial (combustión de biomasa)

- Ejemplo 4 – Sistemas de Distribución de Gasolina
- Ejemplo 5 – Fuentes de Evaporación de Solventes
- Ejemplo 6 – Uso de Datos de Prueba en Fuente Puntual
- Ejemplo 7 – Partículas.

Algunos de estos ejemplos tienen varias partes. Adicionalmente, también se presenta información complementaria para diversos ejemplos.

En los casos donde fue posible, los ejemplos se calcularon utilizando unidades métricas. Las unidades inglesas se utilizan en los demás casos. El Apéndice A contiene una recopilación de factores de conversión y propiedades de los materiales; y el Apéndice B, presenta una lista de ejemplos de problemas que se encuentran en la Serie de Manuales para el Programa del Inventario de Emisiones de México.

Finalmente, todos los ejemplos recopilados en este cuaderno de trabajo presentan situaciones hipotéticas. Los ejemplos muestran las diversas metodologías de cálculo que son útiles. Sin embargo, los datos de actividad contenidos en tales ejemplos **NO** deben ser utilizados en situaciones reales; en su lugar, es necesario recopilar los datos reales.

Ejemplo 1

Motores Estacionarios de Combustión Interna

Los motores estacionarios de combustión interna (CI), son fuentes significativas de emisiones en áreas urbanas que se utilizan en una amplia gama de actividades e incluyen máquinas con movimiento recíprocante (de pistones) y rotatorio. Los principales tipos de combustible para los motores de pistones son la gasolina, el diesel, el combustóleo y el gas natural. Estos son utilizados en equipos tales como generadores y bombas. Los ejemplos de motores CI de movimiento rotatorio incluyen las turbinas de gas utilizadas para la generación de energía eléctrica y en diversas industrias de proceso, y los compresores y turbinas alimentados con gas natural de los gasoductos. Este problema se enfoca en las emisiones de motores CI de pistones alimentados con gasolina y diesel.

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones anuales no controladas de gases orgánicos totales (GOT), monóxido de carbono (CO) óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a 10 micrómetros (PM_{10}) y óxidos de azufre (SO_x) provenientes de motores alimentados con diesel.

Información Disponible

Número de Motores:	6
Potencia Nominal:	20 kilowatts (kW) por motor
Horas de Operación:	12 horas diarias, 356 días al año
Factor de Carga Promedio del Motor:	45%
Tipo de Combustible:	Diesel
Tasa de Uso de Combustible:	5 litros/hora de operación
Valor Calorífico del Diesel:	4×10^7 joules (J)/litro (19,300 Btu/lb)
Emisiones Controladas o No Controladas:	No Controladas

Nota: el valor calorífico del diesel en joules/litro fue convertido a partir del valor de 19,300 Btu/lb obtenido en la *Compilation of Air Pollution Emission Factors* (Compilación de Factores de Emisión de Contaminación Atmosférica) (AP-42) (U.S. EPA, 1995a) Tabla 3.3-2, de la EPA como se muestra a continuación:

$$\text{Valor Calorífico} \left(\frac{\text{J}}{\text{litro}} \right) = \left(19,300 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right) \left(7.428 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} \right) \left(\frac{1 \text{ gal}}{3.78 \text{ litros}} \right) \left(\frac{1055 \text{ J}}{\text{Btu}} \right)$$

$$\text{Valor Calorífico} = 4.0 \times 10^7 \frac{\text{J}}{\text{litro}}$$

Metodología – Método del Factor de Emisión Basado en la Potencia Generada

Las emisiones se calculan utilizando factores de emisión específicos (masa de emisión/potencia-tiempo) y diversos tipos de datos de actividad: tiempo de operación del motor, potencia nominal, y el factor de carga del motor (potencia realmente utilizada sobre la potencia disponible). Matemáticamente, esta metodología se representa con la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones}_p = \sum_{e=1}^N P_e \times LF_e \times T_e \times EF_p$$

donde:

Emisiones _p	=	Masa de emisión del contaminante p (kg)
N	=	Número de motores
P _e	=	Potencia nominal promedio del motor e (kW)
LF _e	=	Factor de carga típico del motor e (%)
T _e	=	Periodo de operación del motor e (horas)
EF _p	=	Factor de emisión para el contaminante p (kg/kW-hr).

Si bien este ejemplo proporciona todos los datos de actividad requeridos, la recopilación de dichos datos puede implicar un proceso adicional. Típicamente, la información del equipo será recopilada en los inventarios de equipo (datos de placa). Si la información no está disponible a través de los inventarios de equipo, debe contactarse al fabricante. De manera alternativa, la información de equipo similar podría ser utilizada si no hubiera otros datos disponibles. El *Nonroad Engine and Vehicle Emissions Study* (Estudio de Emisiones de Motores y Vehículos que no Circulan por Carretera) (U.S. EPA, 1991a) contiene diversas características físicas típicas de motores CI que pueden ser utilizadas cuando la información específica del motor no está disponible.

La referencia principal para los factores de emisión de fuentes estacionarias de combustión interna es el Capítulo 3 del AP-42. La Tabla 1-1 presenta los factores de emisión para motores diesel industriales.

Tabla 1-1

Factores de Emisión para Motores Industriales a Diesel No Controlados

Contaminante	Factor de Emisión (g/kW-hr)	Factor de Emisión (ng/J)
GOT de Escape	1.50	152
GOT Evaporativos	0.00	0.00
GOT del Cárter	0.03	2.71
GOT de Reabastecimiento de Combustible	0.00	0.00
TOG ^a Totales	1.53	154.71
CO	4.06	410
NO _x	18.8	1,896
PM ₁₀	1.34	135
SO _x	1.25	126

Fuente: AP-42, Tabla 3.3-1

^a Los GOT totales están integrados por los GOTs de escape, evaporativos, del cárter y de reabastecimiento de combustible.

Cálculos – Emisiones No Controladas Anuales Utilizando Factores de Emisión Basados en la Potencia Generada

$$E_{\text{TOG}} = (6)(20 \text{ kW})(0.45) \left(\frac{12 \text{ hr}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(\frac{1.53 \text{ g}}{\text{kW-hr}} \right)$$
$$= 362 \text{ kg/ año} = 0.36 \text{ Mg/ año}$$

$$E_{\text{CO}} = (6)(20 \text{ kW})(0.45) \left(\frac{12 \text{ hr}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(\frac{4.06 \text{ g}}{\text{kW-hr}} \right)$$
$$= 960 \text{ kg/ año} = 0.96 \text{ Mg/ año}$$

$$E_{\text{NOx}} = (6)(20 \text{ kW})(0.45) \left(\frac{12 \text{ hr}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(\frac{18.8 \text{ g}}{\text{kW-hr}} \right)$$
$$= 4,447 \text{ kg/ año} = 4.45 \text{ Mg año}$$

$$E_{\text{PM}_{10}} = (6)(20 \text{ kW})(0.45) \left(\frac{12 \text{ hr}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(\frac{1.34 \text{ g}}{\text{kW-hr}} \right)$$
$$= 317 \text{ kg/ año} = 0.32 \text{ Mg/ año}$$

$$E_{\text{SOx}} = (6)(20 \text{ kW})(0.45) \left(\frac{12 \text{ hr}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(\frac{1.25 \text{ g}}{\text{kW-hr}} \right)$$
$$= 296 \text{ kg/ año} = 0.30 \text{ Mg/ año}$$

Metodología Alternativa – Método del Factor de Emisión Basado en el Consumo de Combustible

Si las características físicas de los motores no están disponibles, es posible utilizar un método alternativo para la estimación de emisiones basado en el uso de combustible. Los factores de emisión basados en el consumo de combustible están disponibles en el AP-42 y otras fuentes. Los factores de potencia generada son un enfoque de estimación de “arriba hacia abajo” que incluyen una considerable cantidad de información específica del equipo. Los factores de emisión de consumo de combustible son enfoques de estimación “de abajo hacia arriba” que tienden a omitir los detalles específicos del equipo. Los factores de emisión basados en la potencia generada son la metodología preferida, sin embargo, las limitaciones de los datos podrían apuntar hacia la utilización de los factores de emisión de consumo de energía.

Las emisiones se calculan utilizando los factores de emisión basados en la entrada de combustible (masa de emisiones/contenido energético del combustible), y diversos tipos de datos de actividad. Los datos de actividad requeridos son: tiempo de operación del motor, tasa de uso de combustible y valor calorífico del combustible. Matemáticamente, esta metodología se representa con la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones}_p = \sum_{e=1}^N \text{FUR}_e \times T_e \times H \times \text{EF}_p$$

donde:

Emisiones _p	=	Masa de emisión del contaminante p (kg)
N	=	Número de motores
FUR _e	=	Uso de combustible del motor e (litros/hora)
T _e	=	Periodo de operación del motor e (horas)
H	=	Valor calorífico del combustible (J/litro)
EF _p	=	Factor de emisión para el contaminante p (ng/J).

Los factores de emisión basados en el consumo de combustible también pueden encontrarse en el Capítulo 3 del AP-42, mismos que se presentaron anteriormente en este ejemplo.

Cálculos – Emisiones Anuales No Controladas Utilizando Factores de Emisión Basados en el Consumo de Combustible

$$E_{\text{TOG}} = (6) \left(\frac{5 \text{ litros}}{\text{hora}} \right) \left(\frac{12 \text{ horas}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(4.0 \times 10^7 \frac{\text{J}}{\text{litro}} \right) \left(154.71 \frac{\text{ng}}{\text{J}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{10^{12} \text{ ng}} \right)$$
$$= 813 \text{ kg/año} = 0.81 \text{ Mg/año}$$

$$E_{\text{CO}} = (6) \left(\frac{5 \text{ litros}}{\text{hora}} \right) \left(\frac{12 \text{ horas}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(4.0 \times 10^7 \frac{\text{J}}{\text{litro}} \right) \left(410 \frac{\text{ng}}{\text{J}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{10^{12} \text{ ng}} \right)$$
$$= 2,155 \text{ kg/año} = 2.16 \text{ Mg/año}$$

$$E_{\text{NOx}} = (6) \left(\frac{5 \text{ litros}}{\text{hora}} \right) \left(\frac{12 \text{ horas}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(4.0 \times 10^7 \frac{\text{J}}{\text{litro}} \right) \left(1,896 \frac{\text{ng}}{\text{J}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{10^{12} \text{ ng}} \right)$$
$$= 9,965 \text{ kg/año} = 9.97 \text{ Mg/año}$$

$$E_{\text{PM}_{10}} = (6) \left(\frac{5 \text{ litros}}{\text{hora}} \right) \left(\frac{12 \text{ horas}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(4.0 \times 10^7 \frac{\text{J}}{\text{litro}} \right) \left(135 \frac{\text{ng}}{\text{J}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{10^{12} \text{ ng}} \right)$$
$$E_{\text{PM}_{10}} = 710 \text{ kg/año} = 0.71 \text{ Mg/año}$$

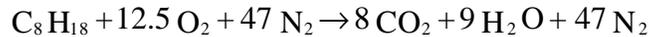
$$E_{\text{SOx}} = (6) \left(\frac{5 \text{ litros}}{\text{hora}} \right) \left(\frac{12 \text{ horas}}{\text{día}} \right) \left(\frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) \left(4.0 \times 10^7 \frac{\text{J}}{\text{litro}} \right) \left(126 \frac{\text{ng}}{\text{J}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{10^{12} \text{ ng}} \right)$$
$$= 662 \text{ kg/año} = 0.66 \text{ Mg/año}$$

Ejemplo 1

Motores Estacionarios de Combustión Interna – Información Complementaria

Controles de Emisión – Relación Aire a Combustible (RAC)

Uno de los parámetros principales que determinan la cantidad de contaminantes producidos durante la combustión es la relación aire a combustible (RAC). El cálculo de la RAC se basa en la reacción estequiométrica del combustible y el aire durante la combustión. La combustión ideal de la gasolina (representada por el octano), en un motor de encendido por chispa (ec) tiene la siguiente representación:



La RAC estequiométrica es simplemente la relación de la masa de aire sobre la masa de combustible utilizado en una combustión ideal.

Masa de aire:	$12.5 \text{ g-moles O}_2 \times 32 \text{ g/g-mol}$	=	400 g
	$47 \text{ g-moles N}_2 \times 28 \text{ g/g-mol}$	=	<u>1,316 g</u>
			1,716 g
Masa de Combustible:	$1 \text{ g-mol C}_8\text{H}_{18} \times 114 \text{ g/g-mol}$	=	114 g

$$\text{AFR} = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}} = \frac{1,716}{114} = 15.05$$

Por supuesto, la RAC estequiométrica real aquí calculada puede variar ligeramente debido al hecho de que el aire no está compuesto sólo por nitrógeno y oxígeno, y que la gasolina no es equivalente al octano. De hecho, la gasolina es una mezcla de muchos compuestos de hidrocarburos, y una RAC típica para la gasolina es de 14.7. Las relaciones estequiométricas varían con base en el tipo de motor y de combustible. Se dice que un motor que opera a una RAC estequiométrica está operando en una relación de equivalencia aire/combustible (REAC) de 1.0, donde la REAC se define como la relación de la RAC estequiométrica sobre la RAC real. La REAC es menor que 1.0 para la operación del quemador de mezcla pobre (i. e., más aire), y mayor que 1.0 para la operación de motores con quemador de mezcla rica. El intervalo operativo para un motor de ec convencional de gasolina es $12 \leq \text{RAC} \leq 18$, y para los motores de ignición por compresión (IC) a diesel es de $18 \leq \text{RAC} \leq 70$.

Con frecuencia, el desempeño de un motor es optimizado para minimizar el consumo

de combustible. Esto, en general, minimiza también las emisiones de GOT y CO debido a la maximización en la eficiencia de la combustión, pero las emisiones de NO_x también están cerca del máximo. Sin embargo, si la relación RAC no es correcta, el desempeño del motor disminuye, y el consumo de combustible aumenta incrementando también las emisiones de GOT y CO.

La Figura 1-1 ilustra el efecto de la RAC en las emisiones de GOT, CO y NO_x de un motor SI. Las formas de las curvas indican la complejidad del control de emisiones mediante el ajuste de RAC. La figura muestra que las emisiones de GOTs disminuyen a medida que la RAC incrementa, o que la mezcla combustible-aire se hace pobre en combustible. Este decremento en las emisiones de GOTs continúa a medida en que la mezcla se hace pobre en combustible, hasta que la mezcla se hace tan pobre que la calidad de la combustión se hace deficiente y comienza a haber problemas de encendido. El resultado es un incremento significativo en las emisiones de GOTs debido al incremento en las emisiones de hidrocarburos no quemados en el escape.

La temperatura de combustión y la disponibilidad de oxígeno afectan en gran medida las emisiones de NO_x . La operación de motores cerca del punto estequiométrico resulta en emisiones de NO_x cercanas al máximo, debido a las elevadas temperaturas de combustión. En esta relación de equivalencia, sin embargo, las concentraciones de oxígeno son bajas. A medida en que la mezcla se enriquece con combustible, las temperaturas del gas quemado bajan, ocasionando un decremento en la eficiencia de la combustión. Esto, a su vez, resulta en un incremento de las emisiones de GOTs y CO, y una disminución en las NO_x . Las primeras aumentan debido a las condiciones de riqueza de combustible, dado que el exceso de combustible no es quemado completamente durante la combustión. El incremento sostenido en las curvas se debe al aumento constante del exceso de combustible. A medida que la mezcla se hace pobre en combustible a partir del punto estequiométrico, el incremento en la concentración de oxígeno inicialmente compensa la decreciente temperatura de combustión, resultando en un incremento en las emisiones de NO_x . A medida en que la mezcla se hace pobre, la temperatura de combustión reducida se hace más importante que la disponibilidad de oxígeno para las emisiones de NO_x , y, en consecuencia, las emisiones disminuyen.

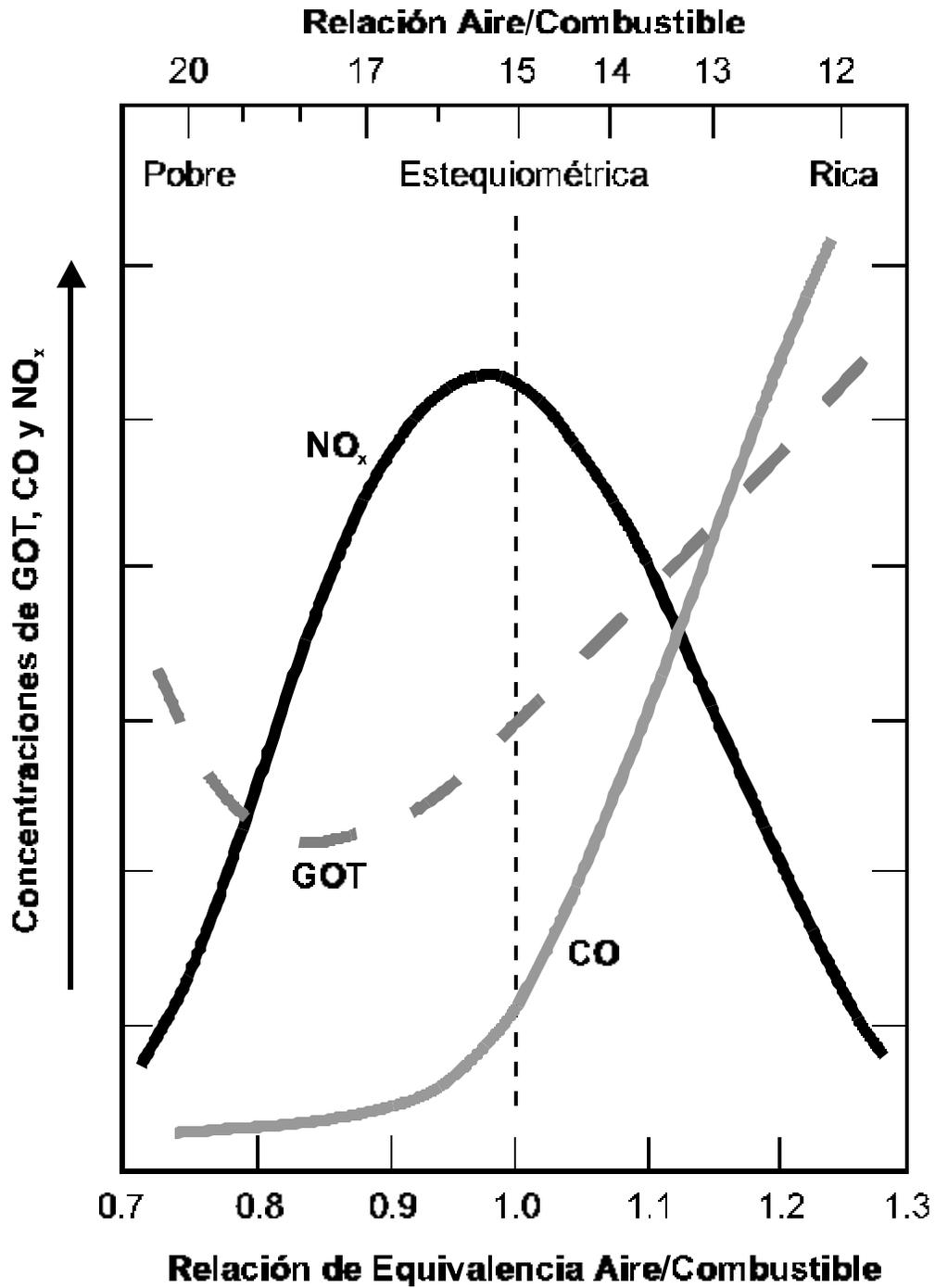


Figura 1-1. Correspondencia entre la Relación Aire a Combustible (RAC), Relación de Equivalencia Aire/Combustible (REAC) y Contaminantes Emitidos

Ejemplo 2a

Equipos de Combustión Externa – Prorratio de Combustible

Introducción

Los factores de emisión que son comúnmente publicados para los equipos de combustión externa tales como los que se encuentran en el AP-42 (U.S. EPA, 1995a), se basan en el tamaño del equipo y en la cantidad de combustible consumido. Estos factores de emisión están expresados en unidades de lb/MMscf (libras/10⁶ pies cúbicos estándar) para gas natural, ó lb/gal para combustibles líquidos como el diesel. La precisión de los estimados de emisión depende de la precisión de los datos de uso de combustible; sin embargo, estos datos a menudo no están disponibles para los equipos individuales de combustión externa. Con frecuencia existe un solo parámetro de medición de combustible para un edificio u otro establecimiento que contiene diversos equipos de combustión, y el consumo de combustible para cada fuente individual debe ser estimado con base en el diseño del equipo y los parámetros operativos.

El ejemplo que se presenta a continuación ilustra la técnica de prorratio de combustible para un caso en el que un medidor registra el combustible total abastecido a un conjunto de equipos. El consumo de combustible para los equipos en el ejemplo se define con base en las horas de operación y el tamaño o capacidad del equipo. La misma metodología puede ser utilizada para prorratio el consumo de combustible entre cualquier número de equipos, si se conoce la capacidad y horas de operación de cada uno de ellos.

Planteamiento del Problema

Estimar el consumo de gas natural para cada equipo de combustión externa individual con base en la capacidad y las horas de operación del equipo.

Información Disponible

Una tortillería tiene cuatro maquinas tortilladoras, cada una de ellas con un quemador que funciona con gas natural, gas LP o ambos. Existe sólo un medidor en la línea de gas natural para el establecimiento, y se sabe que en 1996, el consumo total de gas fue de 240 MMscf. La Tabla 2-1 muestra las capacidades del quemador y las horas de operación para 1996, y resume los resultados de los cálculos de prorrateo del combustible total entre las cuatro tortilladoras (quemadores). Los cálculos detallados se presentan posteriormente.

Tabla 2-1

Distribución de Combustible para los Equipos de Combustión Externa en Tortillerías

DADO			CALCULADO			
Quemador	Capacidad (MMBtu/hr)	Horas Operadas en 1996	Carga Anual de Calor para la Capacidad (MMBtu/año)	% de la Carga Total	Consumo de Combustible Estimado	
					(MMscf/año)	(10 ⁶ m ³ /año)
A	21	4,320	90,720	36	86.4	2.45
B	8	4,512	36,096	14	33.6	0.95
C	21	2,880	60,480	24	57.6	1.63
D	7.5	8,760	65,700	26	62.4	1.77
Total			252,996	100	240.0	6.80

Para prorratear el consumo de combustible entre los quemadores, los cálculos son como se muestra a continuación:

1. Calcular la carga anual de calor para cada quemador a su máxima capacidad:

$$\text{Carga Anual de Calor (MMBtu/año)} = \text{Capacidad del quemador (MMBtu/hr)} \times \text{Horas Anuales (hr/año)}$$

$$\begin{aligned} \text{Para el quemador A, carga anual de calor} &= 21 \text{ MMBtu/hr} \times 4,320 \text{ horas/año} \\ &= 90,720 \text{ MMBtu/año} \end{aligned}$$

2. Encontrar la carga anual de calor total para los cuatro quemadores (ver Tabla).

$$90,720 + 36,096 + 60,480 + 65,700 = 252,996 \text{ MMBtu/año}$$

3. Determinar el % de la carga anual de calor total para cada quemador.

$$\begin{aligned} \text{Para el Quemador A} &= \frac{90,720 \text{ MMBtu/año}}{252,996 \text{ MMBtu/año}} \\ &= 36\% \end{aligned}$$

4. Asignar el rendimiento de combustible total para cada quemador con base en el porcentaje de la carga anual de calor total.

$$\begin{aligned} \text{Para el quemador A} &= 240 \text{ MMscf/año} \times 0.36 \\ &= 86.4 \text{ MMscf/año} \end{aligned}$$

Existen muchas fuentes de incertidumbre potenciales en este método de prorrateo, y su impacto en las emisiones estimadas para las fuentes de interés deben ser analizadas. Estas incluyen:

- La operación variable de los diferentes equipos (en este método existe el supuesto implícito de que cada equipo opera al mismo porcentaje relativo de su capacidad).
- Los registros incompletos o imprecisos de las horas de operación para uno o más equipos.
- Los registros incompletos o imprecisos del consumo de combustible
- Los datos de diseño incompletos o no disponibles para una o más fuentes (capacidad incierta).

Ejemplo 2b

Equipos de Combustión Externa – Factores de Emisión

Introducción

Este problema muestra el uso de los factores de emisión publicados para estimar las emisiones. Si bien este problema podría parecer simplista, es una técnica de estimación valiosa que se utiliza en prácticamente todos los inventarios de emisiones.

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones totales de NO_x de los quemadores de las cuatro máquinas tortilladoras descritas en el Ejemplo 2a.

Información Disponible

Los factores de emisión de combustión externa en el AP-42 están clasificados con base en la generación de calor del equipo de combustión externa, como se muestra a continuación:

- Planta de generación industrial de gran tamaño (>100 MMBtu/hr)
- Industrial pequeña (10-100 MMBtu/hr)
- Comercial (0.3-10 MMBtu/hr)
- Residencial (<0.3 MMBtu/hr).

Con base en esta clasificación, los quemadores A y C del Ejemplo 2a son equipos industriales pequeños, mientras que los quemadores B y D son equipos comerciales. Ninguno de los cuatro quemadores tiene instalado ningún tipo de equipos de control de emisiones.

Solución

A partir de la Tabla 1.4-2 del AP-42, el factor de emisión de NO_x para equipos industriales pequeños es de 2,240 kg/10⁶ m³ y el de equipos comerciales es de 1,600 kg/10⁶ m³. Las emisiones de los quemadores de la tortillería se calculan aplicando la siguiente ecuación:

$$E_{\text{Total}} = \sum_{d=1}^n (FC_d \times EF_d)$$

donde:

E_{Total} = Emisiones Totales (kg/año)

n = Número de equipos

FC_d = Consumo de combustible por equipo d (10⁶ m³/año)

EF_d = Factor de emisión para el equipo d (kg/10⁶ m³).

entonces:

$$\begin{aligned} E_{\text{Total}} &= (2.45 \times 2,240) + (0.95 \times 1,600) + (1.63 \times 2,240) + (1.77 \times 1,600) \\ &= 5,488 + 1,520 + 3,651 + 2,832 = 13,491 \text{ kg/yr} = 13.5 \text{ Mg/yr} \end{aligned}$$

Ejemplo 2c

Equipos de Combustión Externa – Otras Técnicas de Estimación

Introducción

Este problema muestra las limitaciones de los factores de emisión, que son ampliamente utilizados en el desarrollo de inventarios de emisiones.

Los factores de emisión son una técnica de estimación de emisiones ampliamente utilizada, en particular porque son relativamente baratos y fáciles de usar. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias pueden no proporcionar una estimación precisa de las emisiones de un proceso específico. Es importante comprender que los factores de emisión se basan en los resultados de pruebas en fuente específicas. Si bien los factores publicados pueden ser adecuados para el equipo y condiciones particulares para los que fueron probados, su precisión puede disminuir de manera significativa para otros equipos y condiciones.

Cuando se realiza un inventario de emisiones, no es raro encontrar una fuente para la que no existen factores de emisión específicos en la literatura. En estos casos, se ha hecho práctica común el utilizar los factores de emisión publicados para los tipos de fuente que podrían ser similares. Si bien esta práctica de extrapolación parecería razonable, puede ocasionar errores significativos en los estimados de emisión.

Este problema se enfoca específicamente en los factores de emisión de combustión externa que se encuentran en el Capítulo 1 del AP-42, y presenta un ejemplo para ilustrar el caso en que estos factores de emisión no son aplicables. Asimismo, se presentan los ejemplos de los datos de prueba en fuente y los cálculos asociados.

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones de GOT de un incinerador de vapores (equipo de control para abatir la contaminación del aire, diseñado para destruir los compuestos orgánicos emitidos de fuentes tales como las grandes cabinas de pintado en la industria automotriz).

Información Disponible

Las entradas al incinerador son la corriente de aire de venteo de la cabina de pintado (que contiene pequeñas cantidades de los vapores orgánicos a ser destruidos), y el gas natural combustible para los quemadores del incinerador. Los ingenieros que realizaron los estimados de emisión para diversos incineradores de vapores se enfrentaron al problema de no tener factores de emisión específicos para el equipo, o datos de prueba en fuente para los incineradores. Ellos analizaron el proceso del incinerador y determinaron que las emisiones provenían principalmente del consumo de combustible, dado que la cantidad de contaminantes en el aire de venteo de la cabina de pintado era pequeña comparada con la cantidad de combustible. Sabiendo que las emisiones de los quemadores también resultarían sólo de la combustión de combustible, los ingenieros lógicamente decidieron utilizar los factores de emisión en el AP-42 para calderas con capacidades caloríficas similares para estimar las emisiones del incinerador de vapores.

Desafortunadamente, esta decisión arrojó estimados de emisiones imprecisos. En las subsecuentes pruebas en fuente de los incineradores de vapores se demostró que las emisiones de NO_x reales eran aproximadamente ocho (8) veces más elevadas que las emisiones estimadas con base en los factores de emisión de calderas. Después de un detallado análisis de la operación del incinerador, se determinó que sus parámetros operativos eran sustancialmente diferentes a las condiciones de las calderas en dos aspectos:

- Los incineradores operaban a concentraciones de aire excesivo mucho más altas que las calderas debido a la gran cantidad del aire de venteo de las cabinas de pintado
- Los incineradores operaban a temperaturas sustancialmente más elevadas que las calderas para asegurar la combustión completa de los contaminantes orgánicos.

Estas dos condiciones llevan a la formación de NO_x térmico (ver Nota 1 al final del Ejemplo), lo que explica la gran diferencia entre las emisiones de NO_x reales y las estimadas. Estas condiciones determinan el alcance de la combustión que también afecta la formación de CO y la cantidad de los gases orgánicos no incinerados (GOTs) en el gas de la chimenea del incinerador. En este caso, el haber utilizado los factores de emisión de calderas publicados resultó en un error sustancial en las emisiones estimadas para los incineradores debido a que éstos estaban siendo operados en condiciones significativamente diferentes a las de las pruebas en caldera en la que los factores de emisión fueron basados.

La metodología correcta para estimar las emisiones de NO_x del incinerador de vapores consistió en realizar pruebas en fuente. Se requirieron costosos ensayos para el diseño del quemador y repetidas pruebas en fuente para encontrar una solución que redujera las emisiones de NO_x de los incineradores de vapores a niveles aceptables sin incrementar las emisiones de GOT y CO a límites inaceptables. La Tabla 2-2 presenta los datos de prueba en fuente y los factores de emisión calculados para dióxido de nitrógeno (NO₂), NO_x, CO, y la eficiencia de remoción de la destrucción (ERD) de hidrocarburos no metánicos (HCNM), para uno de los incineradores de vapores. Los siguientes párrafos presentan la metodología utilizada para el cálculo de los factores de emisión de NO_x y CO de los datos de prueba en fuente. Los datos ERD HCNM se presentan sólo como información y para ilustrar la relación entre las emisiones de NO_x, CO y GOTs de la combustión externa para condiciones variables.

Los datos de prueba en fuente con frecuencia se obtienen en unidades que no son útiles para estimar las emisiones. Es posible que los datos de prueba deban ser convertidos a condiciones estándar (temperatura y presión) para ser comparados con otros datos, o ser convertidos a partir de las unidades medidas a otras unidades deseadas. Cuando las pruebas en fuente involucran una serie de ajustes del proceso para determinar la influencia de parámetros tales como la temperatura o el porcentaje del aire excesivo, puede requerirse un rápido análisis de los datos en sitio, de manera tal que el equipo de estudio pueda ponderar el efecto de cada cambio. Durante las pruebas en fuente del incinerador de vapores conducidas en el ejemplo anterior, se desarrolló una hoja de cálculo para permitir la rápida conversión de las emisiones de NO_x a las unidades de emisión deseadas. Esta hoja de cálculo se presenta como la Tabla 2-2 de este cuaderno de trabajo, y la explicación de la forma en que fue utilizada para calcular los factores de emisión de NO_x y CO se presenta posteriormente.

Tabla 2-2.
Datos de Prueba en Fuente y Cálculo de Factores de Emisión para Incinerador de Vapores

ID PRUEBA EN FUENTE		FACTORES DE EMISIÓN DE NO _x CA						FACTORES DE EMISIÓN DE CO				
Fecha de la Prueba	Temperatura de la Prueba °F	NO ₂ O ₂ Bsd	NO ₂ CO ₂ Bsd	NO ₂ Bsd del Combustible	NO _x @ 3% O ₂	Emisión de NO _x	Emisión de NO _x	CO O ₂ Bsd	CO CO ₂ Bsd	CO Bsd del Combustible	HCNM ERD	
		lb/MMBtu	lb/MMBtu	lb/MMBtu	ppmv	lb/hr	lb por MMcfm	lb/MMBtu	lb/MMBtu	lb/MMBtu	%	
3/25/92	1462	0.78	0.81	0.84	633	3.24	15.63	0.000	0.000	0.000	100.0%	
3/25/92	1248	0.44	0.48	0.45	360	1.49	7.05	0.184	0.199	0.185	100.0%	
3/25/92	1204	0.37	0.40	0.43	298	1.23	5.63	0.195	0.211	0.227	99.7%	
3/25/92	1152	0.30	0.34	0.43	245	1.05	4.47	0.567	0.628	0.800	98.6%	
3/25/92	1163	0.31	0.31	#N/A	253	1.25	5.31	0.414	0.412	#N/A	99.2%	
3/25/92	1206	0.34	0.35	0.38	275	1.47	6.31	0.287	0.294	0.323	99.8%	
3/25/92	1258	0.38	0.38	0.41	308	1.75	7.29	0.175	0.173	0.190	100.0%	
2/13/92	1050	*	0.21	0.24	#N/A	168	0.52	2.16	0.687	0.773	#N/A	93.6%
2/13/92	1100	*	0.24	0.27	#N/A	198	0.64	2.68	0.744	0.797	#N/A	96.6%
2/13/92	1150	*	0.28	0.32	#N/A	226	0.77	3.21	0.715	0.806	#N/A	98.6%
2/13/92	1200	*	0.33	0.36	#N/A	266	0.95	3.95	0.459	0.498	#N/A	99.5%
2/13/92	1250	*	0.39	0.41	#N/A	317	1.18	4.93	0.219	0.230	#N/A	99.8%
1/31/92	1250		#N/A	0.43	#N/A	#N/A	1.39	6.02	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
1/31/92	1300		#N/A	0.48	#N/A	#N/A	1.67	7.23	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
1/31/92	1350		#N/A	0.56	#N/A	#N/A	2.20	9.53	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
1/31/92	1400		#N/A	0.66	#N/A	#N/A	2.73	11.83	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
1/31/92	1450		#N/A	0.80	#N/A	#N/A	3.49	15.09	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
1/16/92	1450	*	0.74	0.90	#N/A	563	2.90	12.55	0.019	0.019	0.019	99.8%

Notas:

Tabla 2-2 (Continuación)
Datos de Prueba en Fuente y Cálculo de Factores de Emisión para Incinerador de Vapores

ID PRUEBA EN FUENTE		Entrada					Escape					Alimentación de Combustible			
Fecha de la Prueba	Temperatura de la Prueba °F	NOx	O2	CO2	CO	HC	NOx	O2	CO2	CO	HC	Gas de Escape	delta	Tasa de Consumo Energético	
		ppmv	%	ppmv	ppmv	ppmv	ppmv	%	%	ppmv	ppmv	scfm	P	MMBtu/hr	
3/25/92	1462	0.25	20.9	1030	0.5	476.7	129.4	17.25	2.11	0.5	0	3454	7.5	3.87	
3/25/92	1248	0.25	20.9	1020	0.5	454	58.5	18	1.62	40.1	0	3532	5.6	3.35	
3/25/92	1204	0.25	20.9	1010	0.5	450	46.8	18.1	1.57	41	1.3	3646	4.15	2.88	
3/25/92	1152	0.25	20.9	850	0.5	423	37.2	18.2	1.46	114.2	5.8	3897	3	2.45	
3/25/92	1163	0.25	20.9	860	0.5	423	44.1	17.8	1.85	95.8	3.5	3942	#N/A	#N/A	
3/25/92	1206	0.25	20.9	965	0.5	453	52.4	17.5	1.98	73	0.7	3886	7.45	3.86	
3/25/92	1258	0.25	20.9	980	0.5	457	60.5	17.4	2.11	46	0	4003	9	4.24	
2/13/92	1050	*	0.25	20.9	480	0.5	380	18.1	19	1	97.5	24.5	3992	#N/A	#N/A
2/13/92	1100	*	0.25	20.9	490	0.5	410	22.4	18.9	1.1	111	13.9	3992	#N/A	#N/A
2/13/92	1150	*	0.25	20.9	505	0.5	415	26.8	18.8	1.1	112	6	3992	#N/A	#N/A
2/13/92	1200	*	0.25	20.9	530	0.5	510	32.9	18.7	1.2	75.5	2.7	3992	#N/A	#N/A
2/13/92	1250	*	0.25	20.9	525	0.5	575	41	18.6	1.3	38	1.1	3992	#N/A	#N/A
1/31/92	1250		0.25	20.9	400	0.5	#N/A	50	#N/A	1.5	#N/A	#N/A	3850	#N/A	#N/A
1/31/92	1300		0.25	20.9	400	0.5	#N/A	60	#N/A	1.6	#N/A	#N/A	3850	#N/A	#N/A
1/31/92	1350		0.25	20.9	400	0.5	#N/A	79	#N/A	1.8	#N/A	#N/A	3850	#N/A	#N/A
1/31/92	1400		0.25	20.9	400	0.5	#N/A	98	#N/A	1.9	#N/A	#N/A	3850	#N/A	#N/A
1/31/92	1450		0.25	20.9	400	0.5	#N/A	125	#N/A	2	#N/A	#N/A	3850	#N/A	#N/A
1/16/92	1450	*	0.25	20.7	550	3	283	104	17.6	1.5	2.5	0.5	3850	#N/A	#N/A

Notas: 2 1, 2 1, 2 1, 2 1, 2

Notas y Abreviaturas para la Tabla 2-2

Notas:

1. %CO₂ y O₂ en las muestras del gas de escape = ppmv/10,000
2. Las mediciones del gas de escape están en una base seca.

Abreviaturas:

CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ Bsd	Cálculo del factor de emisión basado en el %CO ₂ en el escape
delta P	Presión diferencial
ERD	Eficiencia de remoción de la destrucción
F	Grados Fahrenheit (temperatura)
Bsd del Combustible	Cálculo del factor de emisión basado en la tasa de flujo del combustible
HC	Hidrocarburo
hr	hora
lb	Libras
MMBtu	Millones de unidades térmicas británicas
MMcf	Millones de pies cúbicos de gas de entrada
HCNM	Hidrocarburos no metánicos
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
NO _x	Oxidos de nitrógeno
O ₂	Oxígeno
O ₂ Bsd	Cálculo del factor de emisión basado en el %O ₂ en el escape
ppmv	Partes por millón (volumen)
scfm	Pie cúbico estándar por minuto
Temp	Temperatura

Dados los siguientes parámetros operativos, el factor de emisión de NO_x (lb/Btu) puede estimarse:

- Con los datos de entrada y salida medidos en la prueba en fuente (todas las concentraciones de gas están en una base seca)
- Con la temperatura de prueba (°F)
- Con la tasa de flujo de los gases de escape (scfm)
- Con la tasa de alimentación de gas natural (combustible).

El factor de emisión puede ser determinado con base en la concentración de O₂ ó de CO₂ en el gas de escape o en la tasa de alimentación del combustible. Cualquiera de estos tres métodos es adecuado para utilizarse en el cálculo de factores de emisión de pruebas en fuente. Ambos factores de emisión basados en O₂ y CO₂ fueron calculados utilizando el método del Factor F, que el 6 de octubre de 1975 fue promulgado por el Registro Federal (*Federal Register*) de EU, como el procedimiento que sustituye al método original para determinar los factores de emisión. La EPA ha publicado factores F para los combustibles más comunes, y los valores del factor F utilizados en estos cálculos se tomaron del *Stack Sampling Technical Information* (U.S. EPA, 1978). El factor F para el factor de emisión basado en O₂ para gas natural es de 8,740 scf/MMBtu. El factor F para el factor de emisión basado en CO₂ para gas natural es de 1,040 scf/MMBtu. En este ejemplo se utilizaron los datos de prueba 25/03/1992 a 1,462 °F de la Tabla 2-1.

La ecuación para el cálculo de un factor de emisión de NO_x basado en O₂ utilizando en método del factor F es:

$$E = Cd \times Fd \times \frac{20.9}{20.9 - \% O_2}$$

donde:

- E = Tasa de emisión en lb/MMBtu
- Cd = Concentración del contaminante en base seca menos la concentración del contaminante en el gas de entrada (lb/scf)
- Fd = Factor F basado en oxígeno (8,740 scf/MMBtu)
- %O₂ = Porcentaje de O₂ en el gas de escape seco
- 20.9 = Porcentaje de O₂ supuesto en el gas de entrada (en condiciones de atmósfera ambiente)

A continuación se presenta el cálculo del Cd en lb/scf del gas de escape a partir de las concentraciones de NO_x (medidas como NO₂) en ppmv:

$$Cd = \frac{[C]_{ppmv} \times MW}{CF_1}$$

donde:

- [C]_{ppmv} = Concentración del contaminante en el escape menos la concentración de contaminante en el gas de entrada en ppmv (scf contaminante/MMscf gas de escape)
- MW = Peso molecular del NO₂ (46 lb/lb-mole)
- CF₁ = Factor de conversión basado en la ley de los gases ideales de que 1 lb-mole de gas ideal = 380 scf.

Utilizando los datos de la Tabla 2-1 para los datos de prueba 25/03/92 a 1,462 °F, el cálculo de Cd es:

$$Cd = \frac{\left[(129.4 - 0.25) \frac{\text{scf NO}_x}{10^6 \text{ scf gas de escape}} \right] \times \frac{46 \text{ lb}}{\text{lb - mol}}}{380 \text{ scf/1 lb - mol}}$$
$$= 1.563 \times 10^{-5} \frac{\text{lb NO}_x}{\text{scf gas de escape}}$$

Entonces, el cálculo del factor de emisión de NO_x utilizando el factor F basado en oxígeno es:

$$E = \left(1.563 \times 10^{-5} \frac{\text{lb NO}_x}{\text{scf}} \right) \times \frac{8,740 \text{ scf}}{10^6 \text{ Btu}} \times \left(\frac{20.9}{20.9 - 17.25} \right)$$

$$E = \frac{0.78 \text{ lb NO}_x}{10^6 \text{ Btu}}$$

La ecuación para calcular un factor de emisión de NO_x basado en CO₂ utilizando el método del factor F es:

$$E = Cd \times Fc \times \left(\frac{100}{\% \text{ CO}_2} \right)$$

donde:

E = Tasa de emisión (lb/MMBtu)

Cd = Concentración del contaminante en el gas de escape seco menos la concentración del contaminante en el gas de entrada (lb/scf)

Fc = CO₂ basado en el factor F (1,040 scf/MMBtu)

%CO₂ = Porcentaje de CO₂ en el gas de escape seco menos el porcentaje de CO₂ en el gas de entrada.

El cálculo de Cd en lb/scf a partir de las concentraciones medidas de NO_x en ppmv se realizó anteriormente. El cálculo del %CO₂ es como se muestra a continuación:

$$\% \text{ CO}_2 = \% \text{ CO}_2 \text{ (como se midió en el gas de escape seco)} - \frac{\text{ppmv CO}_2 \text{ en el gas de entrada}}{10,000}$$

$$E = 2.11 - \frac{1,030}{10,000} = 2.007$$

Entonces, el cálculo del factor de emisión de NO_x utilizando el factor F basado en CO₂

es:

$$E = \left(\frac{1.563 \times 10^{-5} \text{ lb NO}_x}{\text{scf}} \right) \times \frac{1,040 \text{ scf}}{10^6 \text{ Btu}} \times \frac{100}{2.007}$$

$$E = \frac{0.81 \text{ lb NO}_x}{10^6 \text{ Btu}}$$

Si se utiliza la tasa de alimentación de combustible para calcular un factor de emisión de NO_x, entonces se aplica la siguiente ecuación:

$$E = \frac{Cd \times Q \times 60}{FR}$$

donde:

E = Tasa de emisión (lb/MMBtu)

Cd = Concentración del contaminante en el gas de escape seco menos la concentración del contaminante en el gas de entrada (lb/scf)

Q = Tasa de flujo de escape (scf/minuto)

60 = Factor de conversión de minutos a horas

FR = Tasa de alimentación energética de combustible (MMBtu/hora)

El cálculo de la Cd en lb/scf a partir de las concentraciones de NO_x medidas en ppmv se hizo anteriormente.

Por lo tanto, el factor de emisión basado en la tasa de alimentación de combustible es:

$$E = \frac{\left(\frac{1.563 \times 10^{-5} \text{ lb NO}_x}{\text{scf}} \right) \times \left(\frac{3,454 \text{ scf}}{\text{min}} \right) \times \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} \right)}{3.87 \times 10^6 \text{ Btu/hr}}$$

$$E = \frac{0.84 \text{ lb NO}_x}{10^6 \text{ Btu}}$$

La Tabla 2-3 muestra una comparación de los factores de emisión calculados con un factor de emisión dado en el AP-42.

Tabla 2-3
Comparación de los Factores de Emisión Calculados

Método de Cálculo	Factor de Emisión (lb NO _x /10 ⁶ Btu)
Factor F basado en O ₂	0.78
Factor F basado en CO ₂	0.81
Tasa de Alimentación de Combustible	0.84
AP-42, Tabla 1.4-2 Caldera Comercial No Controlada *	0.10

* Supone un mayor valor calorífico alimentado con gas natural de 1,000 Btu/scf.

Como se mencionó anteriormente, el factor de emisión tomado del AP-42 puede ser menor hasta en un factor de ocho (8).

Para comparar los factores de emisión en una base equivalente, en ocasiones es necesario ajustar los factores de emisión estimados a una concentración de O₂ en exceso dada. Esto se realiza a menudo con propósitos regulatorios, mediante la siguiente ecuación:

$$EF_{ex} = EF \times \frac{(20.9 - O_{2(ex)})}{(20.9 - O_2)}$$

donde:

EF_{ex} = Factor de emisión de NO_x al nivel de O₂ en exceso deseado (lb/MMBtu)

EF = Factor de emisión de NO_x calculado (lb/MMBtu)

20.9 = Concentración de O₂ atmosférico supuesta (%)

O_{2(ex)} = Concentración de O₂ en exceso deseada (%)

O₂ = Concentración de O₂ medida en el gas de escape seco (%).

Usando el factor de emisión basado en O₂ anterior, el factor de emisión de NO_x a un

exceso de O₂ del 3% para los datos de prueba del 25/03/92 a 1462 °F se calcula como:

$$\begin{aligned} \text{NO}_x (3\%) &= 0.78 \frac{\text{lb NO}_x}{10^6 \text{ Btu}} \times \left(\frac{20.9 - 3}{20.9 - 17.25} \right) \\ &= \frac{3.83 \text{ lb NO}_x}{10^6 \text{ Btu}} \end{aligned}$$

El factor de emisión ajustado difiere del factor de emisión calculado debido a que la concentración de O₂ en exceso deseada (3%) es muy diferente comparada con la concentración de O₂ medida real (17.25%). Si la concentración del O₂ en exceso deseada es igual a la concentración de O₂ medida, entonces el factor de emisión ajustado será idéntico al factor de emisión calculado.

Nota 1:

El NO_x se forma en la combustión externa de dos formas principales: NO_x térmico y NO_x del combustible (*fuel NO_x*). El NO_x térmico se forma cuando el nitrógeno y el oxígeno en el aire de combustión reaccionan a altas temperaturas en la flama. El NO_x del combustible se forma por la reacción de cualquier compuesto de nitrógeno en el combustible con el aire de la combustión. El NO_x térmico es la principal fuente de NO_x en la combustión de gas natural y aceite ligero, y el factor más significativo que afecta su formación es la temperatura de la flama. El nivel del exceso de aire y la temperatura del aire de la combustión también son factores que intervienen en la formación de NO_x térmico. La formación de NO_x del combustible depende del contenido de nitrógeno en el combustible y puede constituir hasta el 50% de las emisiones de NO_x de la combustión de combustibles con alto contenido de nitrógeno, principalmente aceites pesados.

Ejemplo 3

Combustión Residencial

Introducción

Este ejemplo ilustra una situación común en la que las emisiones deben ser estimadas con un mínimo de datos. En muchos casos, el especialista del inventario se enfrentará con una escasez de datos que requiere un enfoque creativo para el desarrollo de estimados de emisión. Debido a la falta de datos, los métodos típicos para la estimación de emisiones no siempre son una opción factible. En su lugar, deben identificarse y analizarse otros métodos opcionales. Cada uno de los métodos alternativos tendrán aspectos positivos y negativos que deben ser evaluados antes de seleccionar alguno de ellos. En ciertos casos, podrían seleccionarse más de uno de los métodos alternativos para obtener un posible intervalo de estimados de emisión (i. e., cálculos de intervalo). Si bien es factible que uno de los estimados fuera incorporado en la base de datos de emisiones, el intervalo de estimados proporciona una medición de la incertidumbre potencial asociada con esa categoría de fuente específica. Esto es un beneficio adicional de los cálculos de intervalo.

El siguiente ejemplo se basa en los datos y metodología reales que fueron utilizados en un inventario de tóxicos del aire para Nogales, Sonora (Radian, 1997), y no tiene el objetivo de dar un método de estimación específico y recomendado, sino que está diseñado para presentar los procesos de razonamiento que deben aplicarse para estimar las emisiones cuando haya datos incompletos.

Planteamiento del Problema

Determinar las emisiones anuales de CO de la combustión de combustibles no comerciales. Incluir sólo aquellos combustibles destinados a propósitos de cocinado y calefacción. Excluir el quemado de cualquier residuo.

Información Disponible

En México, Petróleos Mexicanos (Pemex), así como algunas entidades

gubernamentales mantienen estadísticas con cierto grado de detalle para el consumo de combustibles comerciales (e. g., petróleo destilado, gas LP, etc.). Sin embargo, en algunas áreas del país se utilizan cantidades significativas de combustibles no comerciales, para calefacción y para la cocina. Los ejemplos de combustibles no comerciales incluyen la madera, otro tipo de biomasa, bosta, materiales de desecho, llantas, solventes residuales y otros combustibles derivados de residuos. En este problema, tales energéticos son denominados combustibles de biomasa o residuos. En la mayoría de los países, incluyendo a México, las estadísticas para estos tipos de combustibles son prácticamente inexistentes.

Si bien según diversas estadísticas oficiales y la información proporcionada por los residentes indican que, para 1994 el 98% de los hogares en Nogales usan gas LP (Carrillo, 1996; Gastelum, 1996; Guerrero, 1996), el uso de combustibles derivados de residuos fue considerado una fuente potencialmente significativa de emisiones. Sin embargo, durante la visita al sitio se encontró muy poca información relacionada con la combustión de combustibles de biomasa o residuos. Las estadísticas de población y vivienda generales estuvieron disponibles para el dominio del inventario, pero no así las tasas de combustión de dichos tipos de combustibles.

Selección de la Metodología

De manera ideal, las tasas de combustión de los combustibles de biomasa o residuos a partir de estudios estadísticamente válidos deberían ser combinados con los factores de emisión para arrojar estimados de emisión. Sin embargo, debido a que los datos de los estudios no estuvieron disponibles, se utilizaron métodos de estimación alternativos. Se consideraron tres métodos que podrían permitir la estimación de las tasas de combustión de combustibles de biomasa o residuos, que incluyen:

- El Método de la Carga Calorífica
- El Método de Equivalencia de Gas LP
- El Método del Micro-inventario.

Cada uno de estos métodos se describe detalladamente a continuación.

El Método de la Carga Calorífica

Para estimar las emisiones, este método usa la carga calorífica mensual promedio para una casa típica en Nogales. La carga calorífica mensual promedio requerida para un edificio puede ser determinada con la siguiente ecuación (Harris et al., 1985):

$$Q_i = (UA + 0.018V) \times DD_i \times 24$$

donde:

- Q_i = Carga calorífica mensual promedio (Btu/mes) para el mes i
- UA = Pérdida de calor por transmisión por hora por grado de diferencia de temperatura de diseño (Btu/hr-°F);
- $0.018V$ = Pérdida de calor por infiltración-ventilación por hora por grado de diferencia de temperatura de diseño (Btu/hr-°F);
- DD_i = Grados-días mensuales [temperatura base de 65°F] (°F-día/mes) para el mes i
- 24 = Factor de conversión de días a horas.

El término UA en realidad es el producto de un coeficiente general de transmisión de calor para un elemento estructural dado (U) y el área de la superficie de dicho elemento estructural (A). El término V representa el volumen de infiltración de aire por hora (el producto de los cambios del aire y el volumen del espacio por hora). Los lineamientos para estimar los valores para UA y $0.018V$ para un edificio completo pueden ser obtenidos de diversos manuales de ingeniería (e. g., ASHRAE, 1997 – capítulos 24 y 25). Para estimar estas dos variables, deben determinarse algunas características de una casa “típica” (material de construcción, espacio promedio del piso, altura promedio de la construcción, grosor de las paredes, número de puertas, número y tamaño de las ventanas, etc.). Un grado-día es la diferencia entre una temperatura base fija (usualmente 65°F) y la temperatura promedio a la intemperie, en un periodo de tiempo específico, por ejemplo, mes o año. Un grado-día más elevado indica una carga calorífica más alta. Los datos grado-día típicamente están disponibles en las estaciones

meteorológicas.

La carga calorífica anual promedio requerida para una vivienda individual se calcula agregando cada una de las cargas caloríficas mensuales promedio utilizando diferentes grados-días para cada mes, como se muestra a continuación.

$$Q_{\text{Anual}} = \sum_{i=1}^{12} Q_i$$

donde:

Q_{Anual} = Carga calorífica anual (Btu/año)

Q_i = Carga calorífica mensual promedio (Btu/mes) para el mes i.

Una vez que la carga calorífica anual ha sido estimada, es posible calcular la cantidad de combustibles de biomasa o residuos que proporciona la cantidad de calor requerida, utilizando un contenido energético promedio para ese combustible específico. Esto se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Fuel}_{\text{Anual}f} = \frac{Q_{\text{Anual}}}{EC_f}$$

donde:

$\text{Fuel}_{\text{Anual}f}$ = Uso anual de combustible (lb/año) para el combustible f

Q_{Anual} = Carga calorífica anual (Btu/año)

EC_f = Contenido de energía (Btu/lb) para el combustible f.

Esta cantidad estimada de material biomasa o residuos requeriría ser ajustada a la alza para incluir las actividades de la cocina que utilizan combustibles similares.

El método de Equivalencia de Gas LP

Este método aplica un uso promedio doméstico de gas LP para estimar el consumo de combustible no comercial. Dado que el número de hogares en Nogales que utilizan gas LP era

conocido, era posible estimar el uso promedio de gas LP por vivienda si la cantidad total del consumo de este combustible estaba disponible.

$$GLP_{Uso} = \frac{GLP_{Res}}{Viviendas_{GLP}}$$

donde:

- GLP_{Uso} = Uso anual de GLP por vivienda (lb/año);
 GLP_{Res} = Uso residencial anual total de GLP (lb/año)
 $Viviendas_{GLP}$ = Viviendas totales que usan GLP.

Utilizando el contenido energético del GLP y combustibles de biomasa o residuos típicos, es posible estimar el uso promedio equivalente de biomasa o residuos por vivienda.

$$Bio/Res_{Uso} = GLP_{Uso} \times \frac{EC_{GLP}}{EC_{Bio/Res}} \times \frac{Eff_{GLP}}{Eff_{Bio/Res}}$$

donde:

- Bio/Res_{Uso} = Uso de combustibles de biomasa o residuos anual por vivienda (kg/año)
 GLP_{Uso} = Uso anual de GLP por vivienda (litros/año)
 EC_{GLP} = Contenido energético del GLP (kcal/litro)
 $EC_{Bio/Res}$ = Contenido energético de combustibles de biomasa o residuos (kcal/kg)
 Eff_{GLP} = Eficiencia de la combustión del GLP
 $Eff_{Bio/Res}$ = Eficiencia de la combustión del combustible de biomasa o residuos.

El Método del Micro-inventario

Este método implica la realización de un micro-inventario de 25 o 30 viviendas que utilicen combustibles de biomasa o residuos. Una corta entrevista puede proporcionar información suficiente. La información más importante es la cantidad de combustible quemado. La mayoría de las

personas entrevistadas no podrán estimar el uso anual o mensual, pero sí pueden estimar el uso en un periodo de tiempo más corto. La información también debe ser recopilada con respecto a las variaciones estacionales en el uso y otras prácticas de quemado. El uso anual de los combustibles de biomasa o residuos puede entonces ser derivado a partir de estos datos.

Análisis y Selección de los Métodos de Estimación de Emisiones

Después de establecer tres métodos alternativos, fue necesario seleccionar uno de ellos. Esta selección estuvo basada en diversos criterios y en el juicio ingenieril general. Los criterios de selección incluyeron aspectos tales como la facilidad de uso, el grado de representatividad, la magnitud de la incertidumbre, la racionalidad, etc. Finalmente, para el inventario de tóxicos del aire de Nogales, Sonora, se eligió el método de Equivalencia del GLP.

Los métodos de Carga Calorífica y Micro-Inventario no se seleccionaron por diversas razones, entre las que destacan:

- **Sesgo Potencial.** Sería muy difícil asegurar que la “vivienda típica” seleccionada para el método de Carga Calorífica realmente representa los tipos de vivienda que existen en el dominio del inventario. De manera similar, sería difícil garantizar que las viviendas seleccionadas para la entrevista del método del Micro-Inventario en realidad fueran representativas de las viviendas que queman combustibles de biomasa o residuos. El sesgo potencial habría disminuido si se hubiese realizado un estudio de gran escala para determinar las características de las viviendas o el uso de combustibles, pero el costo asociado lo habría hecho prohibitivo.
- **Disponibilidad de los datos y tipos de suposiciones.** Si bien los datos disponibles son limitados, el método de Equivalencia del GLP utiliza estos datos limitados, así como diversas suposiciones razonables para estimar las emisiones. El método de la Carga Calorífica, por otro lado, habría requerido la recopilación de algunos datos adicionales, así como ciertas suposiciones “menos razonables”.
- **Participantes Renuentes a Participar en la Encuesta.** Dado que el GLP se utiliza en 98% de los hogares, el número de viviendas que utilizan combustibles de biomasa o residuos son la minoría. Para el método del Micro-Inventario, algunas de estas viviendas se rehusarían a dar información voluntaria con respecto a sus prácticas que quemado de combustible. Incluso si las respuestas fueran dadas, podría haber algunas dudas con respecto a su validez.

Solución

Ahora que el método de Equivalencia del GLP ha sido seleccionado, es posible estimar las emisiones. A continuación se describen los cuatro pasos principales.

1. Determinar el número de viviendas que usan combustibles de biomasa o residuos para calefacción o la cocina. Con base en los datos del censo, el sistema de información geográfica (SIG) y las tendencias recientes del crecimiento, se estimó que en Nogales había aproximadamente 38,018 viviendas (Radian, 1997). Como se mencionó anteriormente, se había identificado que el 98% de las viviendas en Nogales utilizaban GLP. Se hizo el supuesto de que el 2% de las viviendas restantes en esta localidad utilizaban combustibles de biomasa o residuos. A continuación se da el número total de viviendas que utilizan combustibles de biomasa o residuos:

$$\text{Viviendas}_{\text{Bio/Res}} = \%_{\text{Bio/Res}} \times \text{Viviendas}_{\text{Total}} = 2\% \times 38,018 = 760 \text{ viviendas}$$

donde:

$\text{Viviendas}_{\text{Bio/Res}}$	=	Número de viviendas que usan combustibles de biomasa o residuos
$\%_{\text{Bio/Res}}$	=	Porcentaje de viviendas que usan combustibles de biomasa o residuos
$\text{Viviendas}_{\text{Total}}$	=	Número total de viviendas.

2. Determinar el uso de GLP por vivienda. El uso de GLP por vivienda se determina dividiendo el uso de GLP residencial total por el número total de viviendas que usan GLP. Las estadísticas de Pemex indicaron que el uso de GLP en 1994 para Nogales fue de 30,203,870 de kilogramos (Estrada, 1996). Se ha determinado que el 80% del uso total de GLP en México es residencial (Dirección General de Ecología et al., 1995).

El uso en masa de GLP es convertido a uso en volumen mediante la estimación de la densidad del GLP. Desafortunadamente, la composición química exacta y la densidad del GLP en Nogales son desconocidas. Sin embargo, la densidad aproximada puede estimarse utilizando las dimensiones de un cilindro de GLP de 45 kg y su peso reportado. Las mediciones de un cilindro de GLP de 45 kg indicaron que su altura es de 1.04 m y la circunferencia de 1.19 m. Como se muestra a continuación, el volumen del cilindro y, posteriormente, su densidad pueden ser calculados a partir de estas dimensiones. Para un cilindro, el volumen se calcula como se muestra a continuación:

$$V = \pi r^2 h; \quad C = 2\pi r$$

$$V = \pi \left(\frac{C}{2\pi} \right)^2 h = \frac{C^2 h}{4\pi}$$

$$V = \frac{(1.19 \text{ m})^2 \times 1.04 \text{ m}}{4 \times 3.14} = 0.1173 \text{ m}^3$$

donde:

V = volumen del cilindro (m)
 C = circunferencia del cilindro (m)
 r = radio del cilindro (m)
 h = altura del cilindro (m).

Entonces, la densidad aproximada del GLP es:

$$r = \frac{m}{V} = \frac{45 \text{ kg}}{0.1173 \text{ m}^3} = 383.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.384 \frac{\text{kg}}{\text{liter}}$$

donde:

- ρ = Densidad del GLP (kg/litro)
- m = Masa del GLP en un cilindro (kg)
- V = Volumen del cilindro de GLP (m^3).

La conversión de kilogramos a litros de GLP entonces, es:

$$\text{GLP}_v = \frac{\text{GLP}_m}{r} = \frac{30,203,870 \text{ kg}}{0.384 \text{ kg/litro}} = 78,655,911 \text{ litros}$$

donde:

- GLP_v = Volumen total de GLP (litro)
- GLP_m = Masa total de GLP (kg)
- ρ = Densidad del GLP (kg/litro).

Se estima que el uso residencial representa el 80% del uso total del GLP, y el resto es para uso industrial y comercial (Dirección General de Ecología et al., 1995).

$$\text{GLP}_{\text{Res}} = \%_{\text{Res}} \times \text{GLP}_{\text{Total}} = 80\% \times 78,655,911 \text{ Litros} = 62,924,729 \text{ litros}$$

donde:

- GLP_{Res} = Uso residencial del GLP (litros/año)
- $\%_{\text{Res}}$ = Porcentaje del uso total del GLP que es residencial
- $\text{GLP}_{\text{Total}}$ = Uso total de GLP (litros/año).

A continuación se da el número de viviendas que utilizan GLP:

$$\text{Viviendas}_{\text{GLP}} = \%_{\text{GLP}} \times \text{Viviendas}_{\text{Total}} = 98\% \times 38,018 = 37,258$$

donde:

$\text{Viviendas}_{\text{GLP}}$ = Número de viviendas que utilizan GLP

$\%_{\text{GLP}}$ = Porcentaje total de viviendas que usan GLP

$\text{Viviendas}_{\text{Total}}$ = Número total de viviendas.

Finalmente, el uso de GLP por vivienda se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{USO}_{\text{GLP}} = \frac{\text{GLP}_{\text{Res}}}{\text{Viviendas}_{\text{GLP}}} = \frac{62,924,729 \text{ litros}}{37,258 \text{ viviendas}} = 1,689 \text{ litros/vivienda}$$

donde:

USO_{GLP} = Uso anual de GLP por vivienda (litros/año)

GLP_{Res} = Uso residencial de GLP (litros/año)

$\text{Viviendas}_{\text{GLP}}$ = Número de viviendas que usan GLP.

Es necesario revisar la racionalidad de este uso de GLP por vivienda. Un número muy limitado de entrevistas informales conducidas con residentes locales indican que una vivienda típica utiliza un cilindro de GLP grande (45 kg) al mes durante el verano, y dos cilindros grandes mensuales durante el invierno (Monroy, 1996). Suponiendo que hay ocho meses de verano y cuatro de invierno, una vivienda típica usará aproximadamente 16 cilindros grandes al año. Aplicando la densidad del GLP calculada anteriormente y el peso por cilindro, es posible estimar el número de cilindros utilizados por vivienda.

$$\frac{1,689 \text{ litros}}{\text{viviendas}} \times \frac{0.384 \text{ kg}}{\text{litro}} \times \frac{1 \text{ cilindro}}{45 \text{ kg}} = \frac{14.4 \text{ cilindros}}{\text{vivienda}}$$

Dado que estos estimados están dentro de un 10% entre sí, el estimado de 1,689 litros de GLP por vivienda por año parece bastante razonable.

3. Convertir el uso de GLP por vivienda a uso de combustibles de biomasa o

residuos por vivienda. El valor de uso anual de GLP de 1,689 litros/vivienda calculado anteriormente, representa la cantidad de GLP utilizado por una vivienda promedio para todos sus requerimientos de calefacción y cocina. Una cantidad equivalente de combustibles de biomasa o residuos puede ser estimada con base en el contenido energético del combustible.

Si bien los residentes locales de Nogales se refieren al GLP como gas butano, la composición química exacta para el GLP de Nogales es desconocida. Se supone que el GLP local es similar a la composición nacional promedio de 60% de propano y 40% de butano (Pemex, 1996). Si el contenido energético del propano es de 6,090 kcal/litro y el contenido energético del butano es de 6,790 kcal/litro (U.S. EPA, 1995a), entonces, el contenido energético ponderado del GLP se calcula como se muestra a continuación:

$$EC_{GLP} = \%_{prop} \times EC_{prop} + \%_{but} \times EC_{but} = (0.6 \times 6,090) + (0.4 \times 6,790) = 6,370 \text{ kcal/litro}$$

donde:

EC_{GLP}	=	Contenido energético del GLP (kcal/litro)
$\%_{prop}$	=	Porcentaje de propano en el GLP
EC_{prop}	=	Contenido energético del propano (kcal/litro)
$\%_{but}$	=	Porcentaje de butano en el GLP
EC_{but}	=	Contenido energético del butano (kcal/litro).

Suponiendo que el contenido energético de los combustibles de biomasa o residuos es aproximadamente el de una tabla de madera (4,445 kcal/kg) (Summit et al, 1996) y que las eficiencias de combustión del GLP y los combustibles de biomasa o residuos son iguales, entonces es posible estimar el uso de combustibles de biomasa o residuos por vivienda:

$$\text{Bio/ Res}_{\text{Uso}} = \text{GLP}_{\text{Uso}} \times \frac{\text{EC}_{\text{GLP}}}{\text{EC}_{\text{Bio/Res}}} \times \frac{\text{Eff}_{\text{LPG}}}{\text{Eff}_{\text{Bio/Res}}}$$

$$\text{Bio/ Res}_{\text{Uso}} = \frac{1,689 \text{ litros GLP}}{\text{vivienda}} \times \frac{6,370 \text{ kcal/litro GLP}}{4,445 \text{ kcal/kg bio/res}} = \frac{2,420 \text{ kg bio/res}}{\text{vivienda}}$$

donde:

$\text{Bio/Res}_{\text{Uso}}$ = Uso anual de combustibles de biomasa o residuos por vivienda (kg/año);

GLP_{Uso} = Uso anual de GLP por vivienda (litros/año)

EC_{GLP} = Contenido energético del GLP (kcal/litro)

$\text{EC}_{\text{Bio/Res}}$ = Contenido energético de los combustibles de biomasa o residuos (kcal/kg)

Eff_{GLP} = Eficiencia de la combustión del GLP

$\text{Eff}_{\text{Bio/Res}}$ = Eficiencia de la combustión de combustibles de biomasa o residuos.

4. Calcular las emisiones totales de CO. Ahora que el uso anual de combustibles de biomasa o residuos anual por vivienda ha sido estimado, las emisiones de CO pueden calcularse utilizando el número de viviendas y un factor de emisión de CO. El factor de emisión de CO para los combustibles de biomasa o residuos se basa en los datos de prueba en fuente de la tabla de madera mexicana (Summit et al., 1996).

$$\text{Emisiones}_{\text{CO}} = \text{Bio/ Res}_{\text{Uso}} \times \text{Viviendas}_{\text{Bio/Res}} \times \text{EF}_{\text{CO}}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{CO}} = \frac{2,420 \text{ kg bio/res}}{\text{vivienda}} \times 760 \text{ viviendas} \times \frac{31 \text{ g CO}}{\text{kg bio/res}}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{CO}} = 57,015 \text{ kg/año CO} = 57.0 \text{ Mg/año de CO}$$

donde:

E_{CO}	=	Emisiones totales de CO (kg/año ó Mg/año)
Bio/Res_{Uso}	=	Uso anual de combustibles de biomasa o residuos por vivienda (kg/año)
$Vivienda_{Bio/Res}$	=	Número de viviendas que usan combustibles de biomasa o residuos
EF_{CO}	=	Factor de emisión de CO (g CO/kg bio/res).

Discusión de los Resultados

Si bien las emisiones anuales de CO de la combustión residencial de combustibles de biomasa o residuos se estimaron en 57 Mg/año, la calidad de este estimado de emisión y sus supuestos subyacentes deben ser analizados para identificar las áreas de mejora y las fuentes de incertidumbre potenciales. A continuación se discuten algunos aspectos:

1. **Número de viviendas que utilizan combustibles de biomasa o residuos.** Las autoridades locales habían estimado que el 98% de las viviendas utilizaban GLP. Se supuso que el 2% restante de las viviendas utilizaban combustibles de biomasa o residuos. Este supuesto no tomó en cuenta la posibilidad de que alguna fracción del 2% restante de las viviendas utilizara queroseno, combustible destilado u otros tipos de energéticos.
2. **Número de viviendas que utilizan GLP.** Como se mencionó anteriormente, las autoridades locales habían estimado que el 98% de las viviendas utilizaba GLP. Sin embargo, no queda clara cuál es la base de este estimado, ni su precisión. Incluso si el porcentaje de hogares que utiliza GLP fuera ligeramente diferente, podría tener un impacto significativo en el estimado de emisiones para los combustibles. Por ejemplo, si el porcentaje real de viviendas que utilizan GLP fuera del 97% en lugar del 98%, entonces, las emisiones por la combustión de GLP disminuirían ligeramente. Sin embargo, las emisiones de la combustión de combustibles de

biomasa o residuos sería afectada en gran medida; el porcentaje de las vivienda que utilizan combustibles de biomasa o residuos incrementaría del 2% al 3%, lo que representa un incremento del 50%.

3. **Fracción de uso residencial del GLP.** En este problema se supuso que el 80% del GLP general tiene un uso residencial. Este supuesto se basa en las estadísticas nacionales. Sin embargo, los patrones locales de consumo pueden ser diferentes.
4. **Eficiencias de la Combustión.** En este problema se supuso que las eficiencias de combustión de GLP y los combustibles de biomasa o residuos es igual. En realidad, es probable que la combustión del GLP sea más eficiente que la de los combustibles de biomasa o residuos. Esto incrementaría las emisiones de biomasa o residuos.
5. **Patrones del Uso de Combustibles.** Un supuesto implícito al convertir el uso de GLP a uso de combustibles de biomasa o residuos, es que los patrones de uso del combustible son iguales. En la realidad, es probable que esto no suceda. Por ejemplo, si el GLP se utiliza para propósitos de calefacción o cocina, entonces el equipo de combustión puede ser apagado cuando se ha obtenido la cantidad de calor deseada. Sin embargo, la combustión de los combustibles de biomasa o residuos a menudo continuará después de que se ha alcanzado la cantidad deseada de calor, debido a que no es conveniente o práctico el apagar el fuego.

6. **Composición de los combustibles de biomasa o residuos.** En este problema se asumió que el combustible de biomasa o residuo era madera de tarima. En realidad, es probable que los combustibles de biomasa o residuos estén integrados por una amplia variedad de materiales, cada uno de los cuales tendrá su propio contenido energético y su propio factor de emisión.

Dados los limitados datos disponibles para este problema de emisión, fue necesario hacer todos los supuestos descritos anteriormente. De manera ideal, podría recopilarse información adicional que eliminaría la necesidad de algunos de estos supuestos, lo que mejoraría la calidad de los estimados de emisión y reduciría la incertidumbre asociada.

Ejemplo 4

Sistema de Distribución de Gasolina

Introducción

El siguiente ejemplo está dividido en siete partes, que están relacionadas con el sistema de distribución de gasolina. Si bien cada parte se refiere a una categoría de fuente individual, estas categorías de fuente a menudo son agrupadas de manera conceptual. Esto se debe principalmente a que la distribución de gasolina es una fuente potencialmente grande de emisión de gases orgánicos evaporativos totales (GOT). Un sistema de distribución de gasolina típico puede tener cientos o miles de fuentes individuales, y es importante que todas estas fuentes sean contabilizadas en un sistema de inventario. Al tratar el sistema de distribución como un todo, en general es más fácil garantizar que todas las fuentes posibles están incluidas.

La Figura 4-1 presenta un sistema de distribución de gasolina hipotético con un número manejable de elementos. Este sistema simplificado contiene una terminal a granel y cuatro estaciones de gasolina. Las pipas transportan la gasolina entre la terminal y las estaciones de servicio. Este sistema **NO** incluye la refinería de petróleo que distribuye a la terminal a granel, o el transporte desde la refinería hasta dicha terminal por pipa, carro-tanque o buque-tanque. En realidad, un sistema de distribución de gasolina va a ser mucho más complejo que el esquema que aquí se presenta. El sistema de distribución en la Figura 4-1 va a ser utilizado en todo el Ejemplo 4. Los conceptos que se presentan en estos siete problemas no están limitados a la distribución de gasolina; también son aplicables a otros combustibles líquidos (e. g., gas avión, diesel o GLP), y gaseosos (gas natural). Sin embargo, los detalles específicos y los factores de emisión van a ser diferentes.

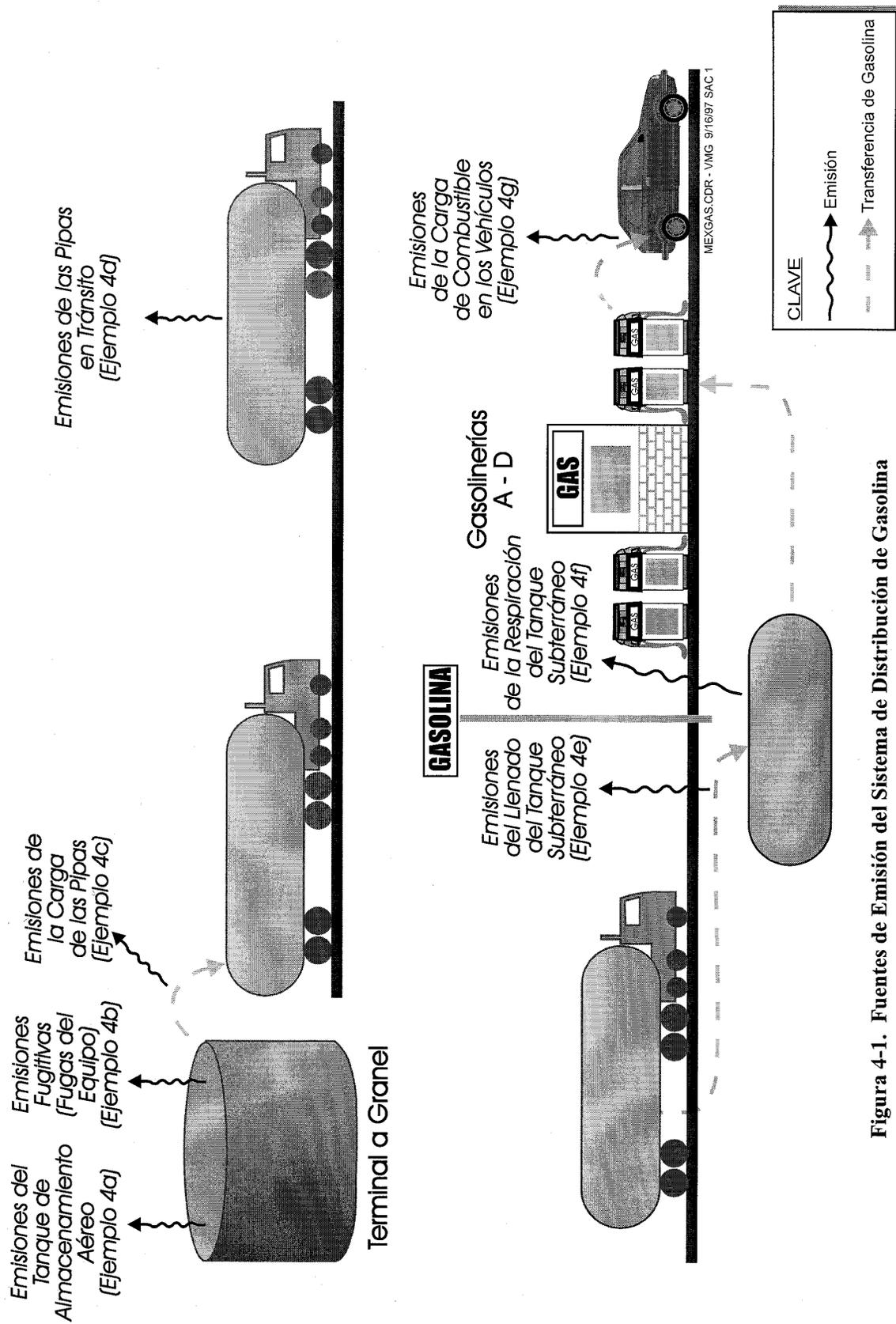


Figura 4-1. Fuentes de Emisión del Sistema de Distribución de Gasolina

Ejemplo 4a

Tanque de Almacenamiento Aéreo para Despacho a Granel

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones de GOTs de las pérdidas en reposo y de trabajo en el tanque de almacenamiento aéreo para despacho a granel.

Información Disponible

Se ha determinado que la cantidad total de gasolina con una presión de vapor Reid de 9 (PVR 9) que es bombeada a través del tanque a granel de la terminal es de 10,000,000 litros al año (2,642,000 galones al año). Este tanque es un tanque de almacenamiento aéreo de techo fijo (TAA) con capacidad de 210,000 galones. El TAA tiene techo cónico. La altura del líquido dentro del tanque es desconocida en un momento dado. Se supone que las condiciones meteorológicas son similares a las de Corpus Christi, Texas.

Se cuenta con la siguiente información sobre el tanque de almacenamiento aéreo para despacho a granel:

- Material almacenado = gasolina (PVR 9)
- Diámetro del tanque (D) = 37.6 pies
- Altura del casco del tanque (H_s) = 24 pies
- Altura promedio del líquido en el tanque = 12 pies (la altura del líquido dentro del tanque se desconoce en un momento determinado; se supone que es la mitad de la altura del casco del tanque)
- Capacidad del tanque (V_{LX}) = 210,000 galones
- Color del tanque = gris claro
- Absorción solar de la pintura del tanque (α) = 0.54 (AP-42, Tabla 7.1-6 para pintura gris claro en buenas condiciones)
- Temperatura ambiente máxima diaria (promedio anual) (T_{AX}) = 81.6°F = 541.27°R (AP-42, Tabla 7.1-7)
- Temperatura ambiente mínima diaria (promedio anual) (T_{AN}) = 62.5°F = 522.17°R (AP-42, Tabla 7.1-7)
- Insolación (I) = 1521 Btu/ft²-día (AP-42, Tabla 7.1-7)

- Punto de ajuste de la presión del venteo del respirador (P_{BP}) = 0.03 psig (AP-42 valor por omisión)
- Punto de ajuste del vacío del venteo del respirador (P_{BV}) = -0.03 psig (AP-42 valor por omisión)
- Peso molecular del vapor (M_V) = 66.7 lb/lb-mol (interpolado del AP-42, Tabla 7.1-2)
- Pendiente de la curva de destilación ASTM a una evaporación del 10% (S) = 3.0 (AP-42, Figura 7.1-14a, Nota 1)

Solución

Las emisiones totales de GOTs de los tanques de almacenamiento de techo fijo son estimadas con base en la metodología descrita en el AP-42 (U.S. EPA, 1995a), Sección 7.1.3.1, *Total Losses from Fixed Roof Tanks* (Pérdidas Totales de los Tanques con Techo Fijo), Febrero 1996. Las metodologías de estimación para otros tipos de tanques de almacenamiento puede encontrarse también en el AP-42, donde se presenta una serie de ecuaciones más que factores de emisión para estimar las emisiones del almacenamiento de líquidos orgánicos. Las emisiones de los tanques de almacenamiento de techo fijo son la suma de las pérdidas en reposo y de trabajo. Las primeras ocurren como consecuencia de los cambios de temperatura que conducen al venteo del vapor del tanque a la atmósfera. Las pérdidas de trabajo resultan de los cambios en el nivel del líquido del tanque, principalmente por las operaciones de llenado y vaciado. Estas ecuaciones tienen el objetivo de dar una estimación más precisa de las emisiones del tanque de almacenamiento. Típicamente, el software TANKS (U.S. EPA, 1996) desarrollado por la EPA será utilizado para estimar las emisiones de los tanques de almacenamiento a granel. este ejemplo muestra las ecuaciones que se utilizan en el TANKS. Debido a que este software utiliza unidades inglesas, el ejemplo se desarrolló en unidades inglesas, y no en unidades métricas. En primer lugar se calcularán las pérdidas en reposo no controladas y, posteriormente, las pérdidas de trabajo no controladas.

1. Cálculo de las Pérdidas en Reposo No Controladas

$$L_s = 365 * V_v * W_v * K_E * K_S$$

donde:

L_s	=	Pérdidas en reposo (lb/año)
365	=	Constante (días/año)
V_v	=	Volumen del espacio de vapor (ft ³)
W_v	=	Densidad del espacio de vapor (lb/ft ³)
K_E	=	Factor de expansión del espacio de vapor
K_S	=	Factor de saturación del vapor venteado

Cálculo del Volumen del Espacio de Vapor (V_v)

$$V_v = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times H_{VO}$$

donde:

D	=	Diámetro del tanque (ft)
H_{VO}	=	Pérdida por almacenamiento del espacio de vapor (ft).

$$H_{VO} = H_s - H_L + H_{RO}$$

donde:

H_s	=	Altura del casco del tanque (ft)
H_L	=	Altura del líquido (ft) (si este valor se desconoce, puede suponerse que es de $0.5H_s$ [esto significa que el tanque está en promedio, lleno hasta la mitad])
H_{RO}	=	Pérdida por almacenamiento del techo (ft).

$$H_{RO} = \frac{1}{3} \times H_R$$

donde:

H_R = Altura del techo del tanque (ft).

$$H_R = R_S \times S_R$$

donde:

R_S = Radio del casco del tanque (ft)

S_R = Pendiente del cono del techo (ft/ft) (si se desconoce, usar el valor estándar de 0.0625 ft/ft [AP-42, pág. 7.1-12])

Para el Tanque a Granel de la Terminal:

R_S = $0.5 \times D$

= $0.5 \times (37.6 \text{ ft}) = 18.80 \text{ ft}$

S_R = 0.0625 ft/ft

H_R = $(18.80 \text{ ft}) \times (0.0625 \text{ ft/ft}) = 1.175 \text{ ft}$

H_{RO} = $(1/3) \times (1.175 \text{ ft}) = 0.3917 \text{ ft}$

H_L = $(0.5) \times (24 \text{ ft}) = 12 \text{ ft}$

H_{VO} = $24 - 12 + 0.3917 = 12.39 \text{ ft}$

V_V = $(\pi/4) \times (37.6 \text{ ft})^2 \times (12.39 \text{ ft}) = 13,759 \text{ ft}^3$

Cálculo de la Densidad de Vapor (W_V)

$$W_V = \frac{(M_V \times P_{VA})}{(R \times T_{LA})}$$

donde:

M_V = Peso molecular del vapor (lb/lb-mol)

P_{VA} = Presión de vapor a la temperatura superficial promedio del líquido (psia)

R = Constante de los gases ideales (10.731 psia-ft³/lb-mol^oR)

T_{LA} = Temperatura superficial promedio diaria del líquido (°R).

$$T_{LA} = 0.44T_{AA} + 0.56T_B + 0.0079aI$$

donde:

- T_{AA} = Temperatura ambiente promedio diaria ($^{\circ}R$)
 T_B = Temperatura del líquido a granel ($^{\circ}R$)
 α = Absorción solar de la pintura del tanque
 I = Factor de insolación total diario (Btu/ft^2 -día) (el factor de insolación solar está en función de la cobertura de nubes y la latitud. El AP.42, Tabla 7.1-7 muestra algunos valores para EU).

$$T_{AA} = \frac{(T_{AX} + T_{AN})}{2}$$

donde:

- T_{AX} = Temperatura ambiente máxima diaria ($^{\circ}R$)
 T_{AN} = Temperatura ambiente mínima diaria ($^{\circ}R$).

$$T_B = T_{AA} + 6a - 1$$

- T_{AA} = $(T_{AN} + T_{AX})/2 = (522.17 + 541.27)/2 = 531.72^{\circ}R$
 T_B = $531.72^{\circ}R + 6(0.54) - 1 = 533.96^{\circ}R$
 T_{LA} = $(0.44) \times (531.72^{\circ}R) + (0.56) \times (533.96^{\circ}R) + (0.0079) \times (0.54) \times (1521 Btu/ft^2\text{-día}) = 539.47^{\circ}R$

$$P_{AV} = \left\{ \left[0.7553 - \left(\frac{413}{T_{LA}} \right) \right] S^{0.5} \log_{10}(PVR) - \left[1.854 - \left(\frac{1042}{T_{LA}} \right) \right] S^{0.5} + \left[\left(\frac{2416}{T_{LA}} \right) - 2.013 \right] \log_{10}(PVR) - \left(\frac{8742}{T_{LA}} \right) + 15.64 \right\}$$

(Según el AP-42 Figura 7.1-13b)

donde:

T_{LA} = Temperatura promedio de la superficie del líquido (°R)

PVR = Presión de Vapor de Reid (psia).

Entonces, para la gasolina PVR 9:

$$P_{VA} = \exp \left\{ \left[0.7553 - \left(\frac{413}{539.47_a} \right) \right] 3^{0.5} \log_{10}(9) - \left[1.854 - \left(\frac{1042}{539.47} \right) \right] 3^{0.5} + \left[\left(\frac{2416}{539.47} \right) - 2.013 \right] \log_{10}(9) - \left(\frac{8742}{539.47_a} \right) + 15.64 \right\} = 6.72 \text{ psia}$$

Idealmente, los valores de presión de vapor medidos deben ser utilizados en lugar de los valores calculados con la ecuación anterior. Los cálculos de emisiones son muy sensibles a los valores de presión de vapor (P_{VA}). Por lo tanto, es importante obtener el valor más preciso posible.

$$W_v = \frac{\left(\frac{66.7 \text{ lb}}{\text{lb-mol}} \right) (6.72 \text{ psia})}{\left(\frac{10.731 \text{ psia-ft}^3}{\text{lb-mol-}^\circ\text{R}} \right) (539.47^\circ\text{R})} = 0.0774 \text{ lb/ft}^3$$

Cálculo del Factor de Expansión de Vapor (K_E)

$$K_E = \frac{\Delta T_V}{T_{LA}} + \frac{(\Delta P_V - \Delta P_B)}{P_A - P_{VA}}$$

donde:

ΔT_V = Intervalo diario de la temperatura del vapor (°R)

T_{LA} = Temperatura promedio diaria de la superficie del líquido (°R)

ΔP_V = Intervalo diario de la presión de vapor (psi)

ΔP_B = Intervalo de ajuste de la presión de venteo del respirador (psi)

P_A = Presión atmosférica (normalmente 14.7 psia, sin embargo, ésta puede ser ajustada para elevaciones altas, si es necesario)

P_{VA} = Presión de vapor a la temperatura diaria superficial promedio (psia).

$$\Delta P_B = P_{BP} - P_{BV}$$

donde:

P_{BP} = Punto de ajuste de la presión de venteo del respiradero

P_{BV} = Punto de ajuste del vacío del venteo del respiradero

ΔP_B = $(0.03) - (-0.03) = 0.06$ psia

$$\Delta T_V = 0.72\Delta T_A + 0.028\alpha I$$

donde:

ΔT_A = Intervalo diario de la temperatura ambiente promedio ($^{\circ}\text{R}$)

$$\Delta T_A = T_{AX} - T_{AN}$$

donde:

T_{AX} = Temperatura ambiente máxima diaria ($^{\circ}\text{R}$)

T_{AN} = Temperatura ambiente mínima diaria ($^{\circ}\text{R}$).

ΔT_A = $541.27 - 522.17 = 19.1^{\circ}\text{R}$

ΔT_V = $(0.72) \times (19.1^{\circ}\text{R}) + (0.028) \times (0.54) \times (1521 \text{ Btu/ft}^2\text{-día}) = 36.75^{\circ}\text{R}$

T_{LA} = 539.47°R (calculada anteriormente)

ΔP_V = $P_{VX} - P_{VN}$

(P_{VX} y P_{VN} son estimadas utilizando la misma ecuación que P_{VA} excepto que T_{LX} y T_{LV} se utilizan en lugar de T_{LA}).

donde:

P_{VX} = Presión de vapor a la temperatura diaria máxima de la superficie del líquido (psia)

P_{VN} = Presión de vapor a la temperatura diaria mínima de la superficie (psia).

$$P_{VX} = \exp \left\{ \left[0.7553 - \left(\frac{413}{T_{LX}} \right) \right] S^{0.5} \log_{10}(PVR) - \left[1.854 - \left(\frac{1042}{T_{LX}} \right) \right] S^{0.5} + \left[\left(\frac{2416}{T_{LX}} \right) - 2.013 \right] \log_{10}(PVR) - \left(\frac{8742}{T_{LX}} \right) + 15.64 \right\}$$

$$P_{VN} = \exp \left\{ \left[0.7553 - \left(\frac{413}{T_{LN}} \right) \right] S^{0.5} \log_{10}(PVR) - \left[1.854 - \left(\frac{1042}{T_{LN}} \right) \right] S^{0.5} + \left[\left(\frac{2416}{T_{LN}} \right) - 2.013 \right] \log_{10}(PVR) - \left(\frac{8742}{T_{LN}} \right) + 15.64 \right\}$$

$$\begin{aligned} T_{LX} &= \text{Máxima temperatura diaria en la superficie del líquido} \\ &= T_{LA} + 0.25 (\Delta T_V) = 539.47 + 0.25 (36.75) = 548.66^\circ\text{R} \\ T_{LN} &= \text{Mínima temperatura diaria en la superficie del líquido} \\ &= T_{LA} - 0.25 (\Delta T_V) = 539.47 - 0.25 (36.75) = 530.28^\circ\text{R} \end{aligned}$$

Entonces, para la gasolina PVR 9:

$$P_{VX} = \exp \left\{ \left[0.7553 - \left(\frac{413}{548.66_a} \right) \right] 3^{0.5} \log_{10}(9) - \left[1.854 - \left(\frac{1042}{548.66} \right) \right] 3^{0.5} + \left[\left(\frac{2416}{548.66_a} \right) - 2.013 \right] \log_{10}(9) - \left(\frac{8742}{548.66} \right) + 15.64 \right\} = 7.93 \text{ psia}$$

$$P_{VN} = \exp \left\{ \left[0.7553 - \left(\frac{413}{530.28_a} \right) \right] 3^{0.5} \log_{10}(9) - \left[1.854 - \left(\frac{1042}{530.28} \right) \right] 3^{0.5} + \left[\left(\frac{2416}{530.28_a} \right) - 2.013 \right] \log_{10}(9) - \left(\frac{8742}{530.28} \right) + 15.64 \right\} = 5.67 \text{ psia}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_V &= P_{VX} - P_{VN} \\ &= 7.93 - 5.67 \\ &= 2.26 \text{ psia} \end{aligned}$$

$$K_E = \frac{36.75^\circ \text{R}}{539.47^\circ \text{R}} + \frac{(2.26 \text{ psia} - 0.06 \text{ psia})}{(14.7 \text{ psia} - 6.72 \text{ psia})} = 0.3438$$

Cálculo del Factor de Saturación de Vapor (K_S)

$$K_S = \frac{1}{1 + 0.053 P_{VA} H_{VO}}$$

donde:

P_{VA} = Presión de vapor a la temperatura promedio diaria de la superficie del líquido (psia)

H_{VO} = Pérdida por almacenamiento del espacio de vapor (ft).

Para gasolina PVR 9:

$P_{VA}=6.72$ psia (calculado anteriormente)

$H_{VO}=12.39$ ft (calculado anteriormente)

$$K_S = \frac{1}{1 + (0.053)(6.72)(12.39)} = 0.1847$$

Solución para las Pérdidas en Reposo:

$$L_S = 365 \times V_V \times W_V \times K_E \times K_S$$

donde:

$$V_V = 13,759 \text{ ft}^3$$

$$W_V = 0.0774 \text{ lb/ft}^3$$

$$K_E = 0.3187$$

$$K_S = 0.1847$$

$$L_S = (365) \times (13,759) \times (0.0774) \times (0.3438) \times (0.1847)$$

$$= 24,683 \text{ lb/año}$$

2. Cálculo de las Pérdidas de Trabajo No Controladas

$$L_W = 0.0010 \cdot M_V \cdot P_{VA} \cdot Q \cdot K_N \cdot K_P$$

donde:

- M_V = Peso molecular del vapor (lb/mol)
- P_{VA} = Presión de vapor a la temperatura promedio diaria de la superficie del líquido (psia)
- Q = Almacenamiento anual neto (bbl/año)
- K_N = Factor de almacenamiento (para $N > 36$, $K_N = [180 + N]/6N$; para $N \leq 36$, $K_N = 1$) (AP-42, pág. 7.1-18)
- K_P = Factor de pérdida de producto por trabajo (0.75 para petróleos crudos; 1.0 para todos los demás líquidos orgánicos; AP-42, pág. 7.1-18)

$$N = \frac{5.614 Q}{V_{LX}}$$

donde:

- N = Número de veces que se llena el tanque al año
- 5.614 = Factor de conversión de bbl a ft^3
- Q = Almacenamiento anual neto (bbl/año)
- V_{LX} = Máximo volumen de líquido del tanque (ft^3)

Para gasolina PVR 9:

- M_V = 66.7 lb/lb-mol
- P_{VA} = 6.72 psia
- Q = 2.642×10^6 gal/año = 62,905 bbls/año
- V_{LX} = 210,000 galones = 28,066 ft^3

$$N = \frac{5.614 (62,905 \text{ bbl/yr})}{(28,066 \text{ ft}^3)} = 12.58/\text{yr}$$

Por lo tanto,

$$K_N = 1.0$$

$$K_P = 1.0$$

$$\begin{aligned} L_W &= (0.0010) \times (66.7 \text{ lb/lb-mol}) \times (6.72 \text{ psia}) \times (62,905 \text{ bbls/año}) \times (1.0) \times (1.0) \\ &= 28,196 \text{ lb/año} \end{aligned}$$

3. Cálculo de Pérdidas Totales No Controladas

$$\begin{aligned} L_{\text{Total}} &= L_S + L_W = 24,683 \text{ lb/año} + 28,196 \text{ lb/año} = 52,879 \text{ lb/año} \\ &= 23,981 \text{ kg/año} = 24.0 \text{ Mg/año.} \end{aligned}$$

Ejemplo 4a – Información Complementaria

Estimación de Especies Individuales

Introducción

En algunas aplicaciones de calidad del aire, se requiere la estimación de especies químicas individuales. Para algunas categorías, se realiza el muestreo de especies individuales. Sin embargo, cuando este muestreo es impráctico o demasiado costoso, deben utilizarse métodos alternativos. Para las emisiones de tanques, la Ley de Raoult constituye un método útil para estimar las emisiones de especies individuales.

Planteamiento del Problema

Utilizando la Ley de Raoult, estimar las emisiones de ciclohexano de las pérdidas en reposo y de trabajo en el tanque a granel de la terminal debidas al almacenamiento y bombeo de gasolina PVR 9:

Información Disponible

Como se estimó anteriormente, la temperatura del líquido a granel, (T_{LA}), es de 80°F. El tanque de granel de la terminal es un tanque TAA con techo fijo. Después del análisis de la gasolina PVR 9 se determinó que la gasolina líquida es ciclohexano en una proporción de 0.58% en peso ($x_{liq,c} = 0.0058$).

Solución

Para determinar las emisiones especiadas de las pérdidas en reposo y de trabajo del tanque, son necesarios los siguientes pasos:

1. Determinar la especiación de la fase líquida de la gasolina contenida en el tanque.
2. Encontrar la presión de vapor saturado de cada especie de interés a la temperatura del líquido a granel.
3. Determinar la verdadera presión de vapor de la mezcla a la temperatura del líquido a granel.
4. Aplicando la Ley de Raoult, determinar la especiación de la fase de vapor de la gasolina en el tanque.
5. Calcular las emisiones específicas por sustancia química utilizando los pasos anteriores, y los resultados de los cálculos como se presentan en el Problema 4a.

La Ley de Raoult puede ser utilizada para determinar la fracción molar de la fase de vapor para un componente o especie particular en una mezcla basada en la fracción molar de la fase líquida. Se supone que el vapor es un gas ideal y que el líquido es una solución ideal. También se supone que ambos están bien mezclados y en equilibrio entre sí. Planteado simplemente, si la composición de la fase líquida del tanque es conocida, entonces la composición de la fase de vapor en el espacio de vapor del tanque puede ser calculada. Los supuestos sobre la conducta ideal y el equilibrio vapor/líquido con frecuencia no se aplican de manera estricta, dado que raramente se presentan en el mundo real y, a menudo, la Ley de Raoult u otra ecuación de estado es la única forma de determinar las composiciones de la fase de vapor sin tener que muestrear físicamente el tanque para medirlas.

Para una mezcla de N especies, la Ley de Raoult se expresa como:

$$Y_i P = X_i P_i^{\text{sat}}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, N$$

donde:

Y_i	=	Fracción molar de la fase de vapor del componente i
P	=	Vapor de presión real de la mezcla a la temperatura del líquido a granel
X_i	=	Fracción molar de la fase líquida del componente i
$P_i^{\text{saturación}}$	=	Presión de vapor saturado de la especie i a la temperatura del líquido a granel.

También,

$x_{\text{vap,c}}$ = La fracción de masa del ciclohexano en la fase de vapor.

Cabe señalar que es posible que se requieran pasos extra para convertir las fracciones de masa a fracciones molares. La ecuación anterior está escrita en términos de fracciones molares; sin embargo, los datos están comúnmente disponibles sólo como fracciones de masa.

Dadas:

P_g = Presión de vapor real para la gasolina = 6.72 psia a 80°F (valor previamente calculado para P_{VA} ; ver pág. 4-7)

$P_{\text{cyclohexane}}^{\text{sat}}$ = Presión de vapor saturado de ciclohexano = 2.069 psia (AP-42, Tabla 7.1-3)

Reacomodando la Ley de Raoult se tiene:

$$Y_i = \frac{X_i P_i^{\text{Sat}}}{P}$$

Antes de usar esta ecuación, la fracción de masa en la fase líquida debe ser convertida a una fracción molar. Esto se hace como se muestra a continuación, utilizando los pesos moleculares.

MW_g = Peso molecular de la gasolina líquida = 100 lb/lb-mol (esto se obtiene típicamente de los fabricantes o de otros valores publicados)

MW_v = Peso molecular del vapor de gasolina = 66.7 lb/lb-mol (extrapolado del AP-42, Tabla 7.1-2)

MW_c = Peso molecular del ciclohexano = 84.16 lb/lb-mol (AP-42, Tabla 7.1-3)

$$X_c \text{ (fracción molar del ciclohexano en fase líquida)} = \frac{X_{\text{liq,c}} MW_g}{MW_c} = \frac{(0.0058)(100)}{84.16} = 0.0069$$

$$Y_c \text{ (fracción molar del ciclohexano en fase de vapor)} = \frac{X_c P_c^{\text{sat}}}{P_g} = \frac{(0.0069)(2.069)}{6.72} = 0.00212$$

Se necesita el valor de $x_{\text{vap,c}}$, la fracción de masa del ciclohexano en la fase de vapor.

Por lo tanto, convirtiendo como anteriormente:

$$x_{\text{vap,c}} = \frac{Y_c MW_c}{MW_v} = \frac{(0.00212)(84.16)}{66.7}$$

$$= 0.00267 \text{ lb ciclohexano / lb vapor de gasolina}$$

Ahora, calcular las emisiones de ciclohexano de las pérdidas en reposo y de trabajo de los tanques superficiales de almacenamiento.

$$\begin{aligned}L_{\text{Total}} &= \text{Pérdidas totales en reposo y de trabajo} \\ &= 23,164 \text{ kg/año}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}L_{\text{ciclohexano}} &= \left(\frac{23,164 \text{ kg vapor de gasolina}}{\text{año}} \right) \left(\frac{0.00267 \text{ kg ciclohexano}}{1 \text{ kg vapor de gasolina}} \right) \\ &= 62 \text{ kg ciclohexano/año}\end{aligned}$$

Ejemplo 4a – Información Complementaria

Comparación de la Ley de Raoult con Otros Métodos

Planteamiento del Problema

Comparar los resultados obtenidos utilizando la Ley de Raoult para medir la composición del vapor con otras técnicas.

Solución

La Tabla 4-1 (mezcla de gasolina en verano) presenta una selección de los resultados medidos y proyectados para las concentraciones de diversas sustancias químicas en las fases líquida y de vapor de la gasolina. Estos resultados no están relacionados con la información presentada en la sección de Información Complementaria anterior. Como los datos lo presentan claramente, la Ley de Raoult predice con mayor precisión las concentraciones en la fase de vapor que las ecuaciones de estado de Peng-Robinson o Redlich-Kwong-Soave. Las ecuaciones de estado relacionan las intensas propiedades termodinámicas (e. g., temperatura, presión o volumen específico) de cualquier sustancia. La información sobre las ecuaciones de estado de Peng-Robinson o Redlich-Kwong-Soave pueden encontrarse en los libros de texto de termodinámica para ingeniería química (i.e., Smith and Van Ness, 1987). Adicionalmente, la Ley de Raoult es mucho más fácil de usar que las otras ecuaciones de estado. Los errores relativos mostrados en las tablas también están dentro de la razón para los propósitos de la estimación de emisiones.

Tabla 4-1
Resumen de los Resultados para la Mezcla de Gasolina sin Plomo en Verano

Especies Tóxicas	Medidas		Concentración de Vapor Proyectada		
	Líquido wt%	Vapor wt%	Raoult ^a	P-R EOS ^b	R-K-S EOS ^c
Ciclohexano	0.58	0.20	0.25	0.27	0.26
Benceno	1.93	0.73	0.83	1.05	0.99
Tolueno	10.32	0.81	1.29	1.57	1.45
O-xileno	3.39	0.05	0.00	0.00	0.00
Isómeros de xileno	9.16	0.21	0.31	0.33	0.30
Etilbenceno	2.05	0.05	0.00	0.00	0.00
Isopropilbenceno	0.19	—	0.00	0.00	0.00
1,2,4-trimetilbenceno	3.52	0.04	0.00	0.00	0.00
Peso molecular del vapor		67.6	67.0	67.4	67.2
Presión de vapor proyectada			3.92	4.04	4.00
Errores de la concentración relativa:					
Promedio para todas las especies			4.0%	10.4%	7.3%
Promedio para tóxicos			22.7%	36.5%	29.6%
Valor absoluto para todas las especies			16.7%	22.2%	19.5%
Valor absoluto para los tóxicos			22.7%	36.5%	29.6%

Notes: ^aRaoult = Ley de Raoult

^bP-R EOS = Ecuación de estado de Peng-Robinson

^cR-K-S EOS = Ecuación de estado de Redlich-Kwong-Soave

Ejemplo 4b

Emisiones Fugitivas (Fugas del Equipo)

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones fugitivas de GOT de fugas en equipos de la terminal a granel. El Ejemplo 4a se refirió a las pérdidas por venteo y las de trabajo asociadas con el tanque de almacenamiento aéreo (TAA) en la terminal a granel. Este problema se refiere a las pérdidas de vapores de hidrocarburos en diversos tipos de equipo de proceso.

Información Disponible

La terminal hipotética de gasolina a granel contiene los siguientes tipos de equipo: 520 válvulas, 230 sellos de bomba, 180 bridas, 120 conectores, y otros 70 tipos de equipo. En la terminal a granel, no se han instrumentado técnicas de control de emisión de fugas de los equipos.

Solución

Existen cuatro enfoques utilizados para estimar las emisiones fugitivas de GOT, que en orden ascendente de refinamiento son:

- Factor de Emisión Promedio
- Separación de Intervalos
- Correlación de la EPA
- Correlación Unidad-Específico.

Estos enfoques se detallan en el Documento de Protocolo de la EPA (U.S. EPA, 1995b). Para un establecimiento industrial con una cantidad relativamente baja de equipo, tal como una terminal a granel, normalmente se utilizarán sólo los dos primeros enfoques. Para otros establecimientos más complejos, como las refinerías, con frecuencia se utilizan los enfoques de correlación. Tanto el enfoque del Factor de Emisión Promedio como el de Separación de Intervalos requieren el conteo del equipo. Sin embargo, el enfoque de Separación de Intervalos requiere de información adicional. En este problema sólo se utilizarán los enfoques de Factor de Emisión Promedio y el de Separación de Intervalos.

Enfoque del Factor de Emisión Promedio

Utilizando el enfoque del Factor de Emisión Promedio, las emisiones totales para un tipo específico de equipo pueden ser calculadas utilizando la siguiente ecuación:

$$E_e = N_e \times EF_e \times t_e$$

donde:

- E_e = Emisiones fugitivas no controladas (kg/año) para el equipo tipo e
- N_e = Cantidad de equipo tipo e
- EF_e = Factor de emisión no controlada para el equipo tipo e (kg/hr)
- t_e = Tiempo anual de proceso (hr/año) (se supone que es de 8,760 horas/año).

Los factores de emisión promedio presentados en la Tabla 4-2 para la gasolina almacenada en las terminales a granel fueron tomados de la Tabla 2-3 del Documento de Protocolo. Otros factores de emisión promedio existen también para las refinerías, para las operaciones de producción de petróleo y gas, y para las operaciones de manufactura de sustancias orgánicas sintéticas. Estas otras operaciones tendrán factores de emisión promedio para las válvulas de alivio de presión, líneas abiertas y conexiones de muestreo.

Tabla 4-2
Factores de Emisión Promedio

Tipo de Equipo	Factor de Emisión (kg/hr)
Válvulas	0.000043
Sellos de bomba	0.00054
Aditamentos (conectores y bridas)	0.000008
Otro equipo	0.00013

A continuación se calculan las emisiones para cada tipo de equipo:

$$E_{\text{Válvulas}} = 520 \text{ válvulas} * 0.000043 \text{ kg/hr} * 8,760 \text{ hr/año} = 195.9 \text{ kg/año}$$

$$E_{\text{Sellosbomba}} = 230 \text{ sellos de bomba} * 0.00054 \text{ kg/hr} * 8,760 \text{ hr/año} = 1,088 \text{ kg/año}$$

$$E_{\text{Bridas}} = 180 \text{ bridas} * 0.000008 \text{ kg/hr} * 8,760 \text{ hr/año} = 12.6 \text{ kg/año}$$

$$E_{\text{Conectores}} = 120 \text{ conectores} * 0.000008 \text{ kg/hr} * 8,760 \text{ hr/año} = 8.4 \text{ kg/año}$$

$$E_{\text{Otros}} = 70 \text{ equipos varios} * 0.00013 \text{ kg/hr} * 8,760 \text{ hr/año} = 79.7 \text{ kg/año}$$

Entonces, las emisiones fugitivas totales son calculadas como se muestra a continuación:

$$E_{\text{Total}} = 195.9 + 1,088 + 12.6 + 8.4 + 79.7 = 1,385 \text{ kg/año} = 1.4 \text{ Mg/año de GOT}$$

Enfoque de Separación de Intervalos

Si se utiliza el enfoque de Separación de Intervalos, entonces cada componente del equipo es clasificado como “con fuga” o “sin fuga”. Esta clasificación se realiza separando cada componente. La separación se hace midiendo la concentración de GOTs en el aire justo a un lado del componente. Si el valor es $\geq 10,000$ ppmv, entonces, el componente recibe la designación de “con fuga”. En el caso contrario, si el valor de separación es $< 10,000$ ppmv, el componente recibe la designación “sin fuga”. Las emisiones de los componentes “con fugas” se estiman utilizando factores de emisión de “con fuga”; las emisiones de los componentes “sin fugas” se estiman utilizando los factores de emisión “sin fugas”, A pesar de su designación como “sin fugas”, los componentes en realidad tienen fugas – sólo que éstas tienen una tasa de emisión menor que los componentes “con fugas”.

Aplicando el factor de Separación de Intervalos, las emisiones totales para un tipo específico de equipo pueden calcularse con la siguiente ecuación:

Programa del Inventario de Emisiones de México
Versión Final del Cuaderno de Trabajo – Septiembre 1997

$$E_e = ([N_L \times EF_L] + [N_{NL} \times EF_{NL}]) \times t_e$$

donde:

- E_e = Emisiones fugitivas no controladas (kg/año) para el equipo tipo e
 N_L = Número de componentes del equipo “con fugas”
 EF_L = Factor de emisiones no controladas de los componentes del equipo “con fugas” (kg/hr)
 N_{NL} = Número de componentes del equipo “sin fugas”
 EF_{NL} = Factor de emisiones no controladas para los componentes del equipo “sin fugas” (kg/hr)
 t_e = Tiempo anual del proceso (hr/año) (se asume que son 8,760 horas por año).

Los factores de emisión separados en intervalos de emisión que se presentan en la Tabla 4-3 para la gasolina almacenada en terminales a granel son tomados de la Tabla 2-7 del Documento de Protocolo. Al igual que los factores de emisión promedio presentados anteriormente, los factores de emisión separados en intervalos de emisión también existen para refinerías, operaciones de producción de petróleo y gas, y operaciones de manufactura de sustancias químicas orgánicas sintéticas. También hay factores de emisión separados en intervalos para las válvulas de alivio de presión, las líneas abiertas y las conexiones de muestreo.

Tabla 4-3
Factores de Emisión de Separación de Intervalos

Tipo de Equipo	Factor de Emisión “Con Fugas” ($\geq 10,000$ ppmv) (kg/hr)	Factor de Emisión “Sin Fugas” ($<10,000$ ppmv) (kg/hr)
Válvulas	0.023	0.000015
Sellos de bomba	0.077	0.00024
Aditamentos (conectores y bridas)	0.0065	0.0000072
Otro equipo	0.034	0.000024

Después de la separación, se determina si las siguientes partes del equipo pertenecen a la categoría “con fugas” (i. e., valor de separación $\geq 10,000$ ppmv): 1 válvula, 2 bridas, 2 conectores y una pieza de otro equipo. Las emisiones de GOT para cada tipo de equipo se calculan como se

muestra a continuación:

$$E_{\text{Válvulas}} = ([1 \text{ válvula} * 0.023 \text{ kg/hr}] + [159 \text{ válvulas} * 0.000015 \text{ kg/hr}]) * 8,760 \text{ hr/año} = 270 \text{ kg/año}$$

$$E_{\text{Sellosbomba}} = ([0 \text{ sellos de bomba} * 0.077 \text{ kg/hr}] + [230 \text{ sellos de bomba} * 0.00024 \text{ kg/hr}]) * 8,760 \text{ hr/año} = 484 \text{ kg/año}$$

$$E_{\text{Bridas}} = ([2 \text{ bridas} * 0.0065 \text{ kg/hr}] + [178 \text{ bridas} * 0.0000072 \text{ kg/hr}]) * 8,760 \text{ hr/año} = 125 \text{ kg/año}$$

$$E_{\text{Conectores}} = ([2 \text{ conectores} * 0.0065 \text{ kg/hr}] + [118 \text{ conectores} * 0.0000072 \text{ kg/hr}]) * 8,760 \text{ hr/año} = 121 \text{ kg/año}$$

$$E_{\text{Otros}} = ([1 \text{ equipos otros} * 0.034 \text{ kg/hr}] + [69 \text{ equipos otros} * 0.000024 \text{ kg/hr}]) * 8,760 \text{ hr/año} = 312 \text{ kg/año}$$

Entonces, las emisiones fugitivas totales son sumadas:

$$E_{\text{Total}} = 270 + 484 + 125 + 121 + 312 = 1,312 \text{ kg/año} = 1.3 \text{ Mg/año}$$

Si bien el problema de este ejemplo es hipotético, muestra que un enfoque más refinado puede producir resultados significativamente diferentes que un enfoque simplificado. En general, el enfoque de Separación de Intervalos va a arrojar resultados más bajos que el enfoque del Factor de Emisión Promedio. Sin embargo, los mayores requerimientos asociados con la recopilación de datos con los enfoques más elaborados deben ponderarse contra la necesidad de resultados más precisos.

Ejemplo 4c

Emisiones de la Carga de Pipas

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones de GOT de la carga de pipas de gasolina en la terminal de despacho a granel. Las pipas se utilizan para transportar la gasolina de la terminal a granel a las gasolineras individuales. Este problema se refiere a la carga real de las pipas

Información Disponible

La cantidad total de gasolina cargada en la terminal a granel en pipas es de 10,000,000 litros anuales. Todas las pipas de gasolina que transportan el producto a las cuatro gasolineras son abastecidas utilizando una “carga con salpicadura de servicio normal” (*normal service splash loading*). Para la carga con salpicadura, la tubería de llenado que despacha la gasolina es bajada sólo parcialmente dentro del tanque de carga. Las emisiones son ocasionadas por las “salpicaduras” y turbulencia ocasionada. La temperatura de toda la gasolina entregada y la temperatura ambiente es de 80 °F. No existe ningún sistema de control de balance de vapor.

Solución

La cantidad de las emisiones no controladas de la carga de pipas depende de que si la pipa está equipada para un llenado sumergido, por salpicadura o con balance de vapor. Las emisiones no controladas también dependen de la presión de vapor de la gasolina descargada, el peso molecular de los vapores expelidos del tanque de carga, y la temperatura a la que la gasolina es cargada. Adicionalmente, en el llenado con balance de vapor, donde se regresan los vapores desplazados de la pipa a una unidad de recuperación de vapor en la terminal a granel, se tendrá una eficiencia de control que fluctúa entre el 90 y 99 por ciento. La siguiente ecuación puede ser utilizada para estimar las pérdidas de carga no controladas (AP-42, Sección 5.2.2.1.1).

$$EF_{UL} = 12.46 \times \frac{SPM}{T}$$

donde:

EF_{UL} = Factor de emisión de pérdida de carga no controlada (lb/1000 gal)

S = Factor de saturación

P = Presión de vapor real de la gasolina (libras por pulgada cuadrada absoluta [psia])

M = Peso molecular de los vapores (lb/lb-mol)

T = Temperatura de la gasolina cargada (°R).

Los factores de saturación (S) para varios modos de operación, que representan qué tan cerca de la saturación llega el vapor expelido, se presenta en la Tabla 4.4.

Tabla 4-4

Factores de Saturación (S) para Calcular las Pérdidas de Carga de Petróleo Líquido

Tipo de Servicio	Carga por Salpicadura	Carga Sumergida
Tanque de carga limpio	1.45	0.50
Servicio normal	1.45	0.60
Servicio con balance de vapor	1.00	1.00

Las presiones de vapor reales y los pesos moleculares de los vapores de gasolina pueden derivarse de las Figuras 7.1-5 y 7.1-6, y de la Tabla 7.1-2 del AP-42. La Tabla 4-5 presenta información extraída de la Tabla 7.1-2.

Tabla 4-5

Propiedades Físicas de la Gasolina

Presión de Vapor Reid de la Gasolina	Peso Molecular del Vapor a 60°F (lb/lb-mole)	Presión de Vapor real (psi)						
		40 °F	50 °F	60 °F	70 °F	80 °F	90 °F	100 °F
13 psia	62	4.7	5.7	6.9	8.3	9.9	11.7	13.8
10 psia	66	3.4	4.2	5.2	6.2	7.4	8.8	10.5
7 psia	68	2.3	2.9	3.5	4.3	5.2	6.2	7.4

Los valores del peso molecular del vapor y la presión de vapor real para la gasolina PVR 9 deben ser interpolados a partir de los valores presentados en la Tabla anterior, como se muestra a continuación:

$$VMW_i = VMW_x + \left(\frac{PVR_x - PVR_i}{PVR_x - PVR_n} \right) (VMW_n - VMW_x)$$

$$TVP_i = TVP_x - \left(\frac{PVR_x - PVR_i}{PVR_x - PVR_n} \right) (TVP_x - TVP_n)$$

donde:

VMW_i = Peso molecular del vapor interpolado para PVR 9

VMW_x = Peso molecular del vapor a la PVR máxima PVR (10) en el intervalo de interpolación

VMW_n = Peso molecular del vapor a la PVR mínima (7) en el intervalo de interpolación

RVP_i = PVR interpolada (9)

RVP_x = PVR máxima (10)

RVP_n = PVR mínima (7)

TVP_i = Presión de vapor real interpolada para PVR 9

TVP_x = Presión de vapor real a la PVR máxima (10)

TVP_u = Presión de vapor real a la PVR mínima (7).

$$VMW_9 = 66 + \left(\frac{10 - 9}{10 - 7} \right) (68 - 66) = 66.7 \text{ lb/lb- mol}$$

$$TVP_9 = 7.4 - \left(\frac{10 - 9}{10 - 7} \right) (7.4 - 5.2) = 6.7 \text{ psi}$$

El factor de saturación para el servicio de carga por salpicadura es de 1.45. Finalmente, al convertir la temperatura de la gasolina de grados Fahrenheit a grados Rankine se obtiene una temperatura de 540°R.

Entonces, los factores de emisión de carga no controlada se calculan como se muestra

a continuación:

$$EF_{UL(RVP9)} = \frac{12.46 \times 1.45 \times 6.7 \times 66.7}{540} = 14.95 \text{ lb/ 1000 gal}$$

Los factores de emisión de carga controlada se calculan utilizando la siguiente ecuación:

$$EF_{CL} = (1 - CE) \times EF_{UL}$$

donde:

EF_{CL} = Factor de emisión de pérdidas controladas de carga (lb/1000 gal)

CE = Eficiencia de control de vapor

EF_{UL} = Factor de emisión de pérdidas no controladas de carga (lb/1000 gal).

Sin embargo, para este problema, durante la carga de las pipas no se utiliza un control de vapor, por lo tanto, no es necesario calcular los factores de emisión de carga controlada.

Las pérdidas totales de la carga de pipas pueden ser estimadas de la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones} = \sum_{i=1}^n EF_{UL,CL} \times \text{Combustible } e_i$$

donde:

Emisiones = Emisiones totales de la carga de pipas (kg/año)

n = Cantidad de modos de operación y tipos de combustible diferentes

$EF_{UL,CL}$ = Factor de emisión controlada o no controlada de la carga de pipas para el modo de operación o el tipo de combustible i (mg/litro)

Fuel_i = Cantidad anual de combustible entregado por cada modo de operación o tipo de combustible i (litros/año).

Convertir los factores de emisión de carga de unidades de lb/1000 gal a unidades de mg/litro:

$$EF_{UL(RVP9)} = \left(\frac{14.95 \text{ lb}}{1000 \text{ gal}} \right) \left(\frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right) \left(\frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ liter}} \right) = 1,792 \text{ mg litro}$$

$$\text{Emisiones} = \frac{1,792 \text{ mg}}{\text{litro}} \times (1 \times 10^7 \text{ litros}) = 17,920 \text{ kg/año} = 17.9 \text{ Mg/año}$$

Ejemplo 4d

Emisiones de las Pipas en Tránsito

Planteamiento del Problema

Después de que la gasolina es cargada en las pipas, se transporta a las gasolineras. Si bien las pipas tienen tanques cerrados, las emisiones se presentan durante el tránsito. Este problema se enfoca a las emisiones que se presentan mientras la pipa está en tránsito.

Estimar las emisiones de GOT de las pipas de gasolina en tránsito desde la terminal a granel hasta las gasolineras de Pemex A, B, C y D.

Información Disponible

Las siguientes cantidades de gasolina son transportadas a las cuatro gasolineras para su venta:

Gasolinera	Gasolina Despachada (litros/año)
A	4,000,000
B	2,500,000
C	2,000,000
D	1,500,000

Solución

La cantidad de emisiones de las pipas de gasolina depende del grado de venteo que se presente en tránsito que, a su vez, depende de la hermeticidad en el tanque, el ajuste de la presión en la válvula de alivio, la presión en el tanque al principio del recorrido, la presión de vapor del combustible transportado y el grado de saturación de vapor del combustible en el espacio del tanque. Las emisiones **no** son directamente proporcionales a la duración del traslado.

La Tabla 5-2-5 del AP-42 presenta los factores de emisión de pérdida en tránsito para las pipas de gasolina tanto cargadas con producto como para su regreso con vapores para la gasolina

PVR 10. Estos factores de emisión se presentan en la Tabla 4-6 para condiciones de tránsito “típicas” y “extremas”. La referencia a las condiciones extremas se hace para el caso poco probable en que todos los factores determinantes que se mencionan anteriormente se combinen para ocasionar emisiones máximas.

Tabla 4-6
Factores de Emisiones No Controladas para Pipas de Gasolina

Condiciones de Tránsito	Cargada con Producto (mg/litro de gasolina)	Regresando con Vapor (mg/litro de gasolina)
Típicas	0 - 1.0	0 - 13.0
Extremas	0 - 9.0	0 - 44.0

Las emisiones totales por pérdidas en tránsito incluyen tanto el recorrido de la terminal a granel a la gasolinería (cargada con producto), y el viaje de regreso desde las gasolinerías a la terminal a granel (tanques vacíos). Estas emisiones pueden ser estimadas con la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones} = \sum_{i=1}^n ([EF_{1,c} + EF_{r,c}] \times \text{Combustible}_i e_i)$$

donde:

Emisiones = Emisiones totales de recarga (kg/año)

n = Número de gasolinerías

EF_{1,c} = Factor de emisión de pérdida en tránsito “cargada con producto” para la gasolina transportada a la estación i en condiciones de tránsito c (mg/litro)

EF_{r,c} = Factor de emisión de pérdida en tránsito “regreso con vapor” para la gasolina transportada de la estación i en condiciones de tránsito c (mg/litro)

Combustible_i = Cantidad anual de combustible despachado de la gasolinería i (litros/año).

Estimar las emisiones generales en tránsito suponiendo que la gasolina es transportada a las estaciones A, B y C en condiciones “típicas”, y que a la gasolinería D es transportada en condiciones “extremas”. Para cada factor de emisión, suponer que el punto medio del intervalo enlistado en la Tabla anterior constituye una estimación razonable.

$$\begin{aligned}
\text{Emisiones} &= ([0.5 + 6.5] \text{ mg/litro}) \times ([4 \times 10^6] + [2.5 \times 10^6] + [2 \times 10^6] \text{ litros}) \\
&+ ([4.5 + 22] \text{ mg/litro}) \times (1.5 \times 10^6 \text{ litros}) \\
&= 59.5 \text{ kg/año} + 39.75 \text{ kg/año} \\
&= 99 \text{ kg/año}
\end{aligned}$$

Cabe señalar que la cantidad de gasolina vendida a las gasolineras en este problema es igual a la cantidad de gasolina transportada. Esto, sin embargo, no siempre sucede. Si las emisiones en tránsito son estimadas para el transporte de gasolina de una refinería a una terminal de despacho a granel y, posteriormente de ésta a las gasolineras, entonces las emisiones en tránsito serían del doble, debido a que la gasolina es “transportada” dos veces. La gasolina también podría ser transportada a través del dominio de un inventario de emisiones, si bien su origen y/o destino podría encontrarse fuera de éste.

Ejemplo 4e
Emisiones del Llenado de Tanques Subterráneos

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones de GOTs de la descarga de gasolina de las pipas en las gasolineras A, B, C y D. Después que las pipas llegan a la gasolineras, descargan en los tanques de almacenamiento subterráneos. Esta descarga es similar a la carga de las pipas en la terminal de despacho a granel.

Información Disponible

Las siguientes cantidades de gasolina son transportadas a las cuatro gasolineras para su venta:

Gasolinera	Gasolina (litros/año)
A	4,000,000
B	2,500,000
C	2,000,000
D	1,500,000

Las cuatro gasolineras tienen los siguientes modos de operación:

Gasolinera	Modo de Operación
A	Carga sumergida – servicio normal
B	Carga sumergida – servicio con balance de vapor
C	Carga con salpicadura – servicio normal
D	Carga con salpicadura – servicio normal

Para la carga con salpicadura, la manguera de llenado que despacha la gasolina es bajada sólo parcialmente dentro del tanque de almacenamiento. Las emisiones son ocasionadas por las “salpicaduras” y turbulencia resultantes. Para la carga sumergida, la manguera de llenado se extiende prácticamente hasta el fondo del tanque de almacenamiento. Debido a esto, la turbulencia del líquido y las emisiones resultantes son reducidas, en comparación con la carga por salpicadura. El servicio con balance de vapor recupera los vapores desplazados durante la descarga de gasolina y los lleva de regreso al tanque de la pipa.

Solución

La cantidad de emisiones del llenado de tanques subterráneos depende de que si el tanque de la gasolinería está equipado para un llenado sumergido, por salpicadura o de balance de vapor sumergido. El llenado de balance de vapor, que regresa los vapores desplazados del tanque de la gasolinería al tanque de la pipa, va a tener una eficiencia de control que fluctúa de 93 a 100 por ciento con respecto a las emisiones no controladas. La Tabla 4-7 muestra los factores de emisión para el llenado de tanques subterráneos (AP-42, Tabla 5.2-7).

Tabla 4-7

Factores de Emisión para el Llenado de Tanques Subterráneos en Gasolinerías

Tipo de Operación	Factor de Emisión (rendimiento en mg/litro)
Sumergida	880
Por Salpicadura	1,380
Sumergida con Balance	40

Las emisiones totales del llenado de tanques subterráneos pueden estimarse con la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones} = \sum_{i=1}^n \text{EF}_i \times \text{Combustible}_i$$

donde:

Emisiones = Emisiones totales del llenado de tanques subterráneos (kg/año)

EF_i = Factor de emisión para el llenado de tanques subterráneos para la operación tipo i (mg/litro)

$Combustible_i$ = Cantidad anual de combustible entregado para la operación tipo i (litros/año).

$$\text{Emisiones} = (880 [4 \times 10^6] + 40 [2.5 \times 10^6] + 1,380 [2 \times 10^6] + 1,380 [1.5 \times 10^6])$$

$$\text{Emisiones} = 3,520 + 100 + 2,760 + 2,070 = 8,450 \text{ kg/año}$$

$$= 8.45 \text{ Mg/año}$$

Ejemplo 4f

Emisiones de la Respiración de Tanques Subterráneos

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones de GOT de la respiración del tanque subterráneo en las gasolineras A, B, C y D.

Información Disponible

Las siguientes cantidades de gasolina fueron vendidas en las cuatro gasolineras de la región:

Gasolinera	Gasolina Despachada (litros/año)
A	4,000,000
B	2,500,000
C	2,000,000
D	1,500,000
Total	10,000,000

Solución

La cantidad de emisiones por pérdidas debidas a la respiración de tanques de almacenamiento subterráneos depende principalmente de la evaporación y los cambios en la presión barométrica. Por otro lado, la frecuencia de extracción del tanque también puede afectar las emisiones debido a que el aire fresco que entra va a incrementar la tasa de evaporación. Se ha estimado una tasa de emisión por respiración promedio para gasolineras estadounidenses de 120 mg/litro de gasolina (AP-42, Tabla 5.2-7). Las ecuaciones de tanque presentadas en la Sección 7 del AP-42, pueden utilizarse para estimar las emisiones de los tanques de almacenamiento subterráneos en gasolineras. Sin embargo, el gran número de tanques de gasolinera generalmente impide el uso de estas ecuaciones. Las pérdidas totales por respiración de los tanques de almacenamiento subterráneos pueden estimarse con la siguiente ecuación, con la tasa de emisión promedio por respiración:

$$\text{Emisiones} = \sum_{i=1}^n \text{EF}_{\text{UB}} \times \text{Comustible}_i$$

donde:

Emisiones = Emisiones totales por respiración del tanque subterráneo (kg/año)

n = Número de gasolineras

EF_{UB} = Factor de emisión de pérdida por respiración subterránea para la gasolinera i (mg/litro) [valor estadounidense promedio - 120 mg/litro]

Combustible_i = Cantidad anual de combustible entregada a la gasolinera i (litros/año).

$$\text{Emisiones} = (120[4 \times 10^6] + 120[2.5 \times 10^6] + 120[2 \times 10^6] + 120[1.5 \times 10^6])$$

$$\text{Emisiones} = 480 + 300 + 240 + 180 = 1,200 \text{ kg/año} = 1.2 \text{ Mg/año}$$

Ejemplo 4g
Emisiones de la Carga de Combustible en Vehículos

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones de GOT de la carga de combustible en vehículos en las gasolineras A, B, C y D. Estas emisiones están integradas tanto por los vapores desplazados del tanque del vehículo, como por los derrames de gasolina.

Información Disponible

Las cuatro gasolineras en el sistema de distribución despachan las siguientes cantidades de gasolina PVR 9:

Gasolinera	Gasolina Despachada (litros/año)
A	4,000,000
B	2,500,000
C	2,000,000
D	1,500,000

La temperatura del combustible despachado es de 24°C (75 °F), y la temperatura del combustible en el tanque del vehículo es de aproximadamente 30°C (86 °F). Las gasolineras A y C no cuentan con equipo de control de vapores, mientras que las B y D cuentan con control de vapor que transfiere los vapores desplazados del tanque de combustible del vehículo al espacio de vapor del tanque de almacenamiento subterráneo.

Solución

La cantidad de emisiones de los vapores desplazados dependen de la temperatura de la gasolina, la temperatura del tanque del vehículo, la presión de vapor de Reid de la gasolina (PVR) y de la tasa de despacho. La siguiente ecuación puede ser utilizada para estimar las pérdidas por desplazamiento no controlado basadas en los factores mencionados anteriormente (AP-42, Sección 5.2.2.3).

$$EF_u = 264.2[(-5.909) - 0.0949(\Delta T) + 0.0884(T_D) + 0.485(RVP)]$$

donde:

EF_u = Factor de emisión no controlada de GOTs para recarga de combustible (mg/litro)

ΔT = Diferencia entre la temperatura del combustible en el tanque del vehículo y la temperatura del combustible despachado (°F)

T_D = Temperatura del combustible despachado (°F)

PVR = Presión de Vapor de Reid (psia).

A continuación se calculan los factores de emisión de pérdidas por desplazamiento no controlado para cada gasolinería:

$$EF_u = 264.2[(-5.909) - 0.0949(11^\circ) + 0.0884(75^\circ) + 0.485(9)] = 1,068 \text{ mg/ litro}$$

Las pérdidas por desplazamiento controladas deben ser estimadas para las gasolinerías B y D. El AP-42 indica que las eficiencias típicas estadounidenses de control de vapor fluctúan entre 88 a 92% (AP-42, Sección 5.2.2.3). A continuación se muestra la ecuación para calcular un factor de pérdida por desplazamiento controlado:

$$EF_c = (1 - CE) \times EF_u$$

donde:

EF_c = Factor de emisión controlada de GOT para la recarga vehicular (mg/litro);

CE = Eficiencia del control de vapores

EF_u = Factor de emisión no controlada de GOT para la recarga vehicular (mg/litro).

Suponiendo que la eficiencia del control de vapor de la Etapa II es del 88%, entonces, los factores de emisión de pérdida por desplazamiento controlado para las gasolineras B y D se calculan como se muestra a continuación:

$$EF_{cB,CD} = (1 - 0.88) \times 1,068 \text{ mg/litro} = 128 \text{ mg/litro}$$

Además de las pérdidas por desplazamiento, las pérdidas por derrames también se presentan durante la recarga de combustible. El factor de emisión estadounidense para derrames (EF_s) se ha estimado en 80 mg/litro de combustible despachado. La cantidad real del derrame depende de diversos factores, tales como las características comerciales de la gasolinera, la configuración del tanque, y las técnicas del operador.

Las pérdidas totales de la recarga pueden estimarse con la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones} = \sum_{i=1}^n ([EF_{u,c} + EF_s] \times \text{Combustible}_i)$$

donde:

Emisiones = Emisiones totales por recarga (kg/año)

n = Número de gasolineras

$EF_{u,c}$ = Factor de emisión de pérdida por desplazamiento controlada o no controlada para la gasolinera i (mg/litro)

EF_s = Factor de emisión por derrame para la gasolinera i (mg/litro)

Combustible_i = Cantidad anual de combustible despachado por la gasolinera i (litros/año).

Asumiendo que el factor de emisión de derrame estadounidense de 80 mg/litro sea adecuado para México, estimar las emisiones generales de la recarga de combustible.

$$\text{Emisiones} = ([1,068 + 80][4 \times 10^6] + [128 + 80][2.5 \times 10^6] + [1,068 + 80][2 \times 10^6] + [128 + 80][1.5 \times 10^6])$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones} &= 4,592 + 520 + 2,296 + 312 = 7,720 \text{ kg/año} \\ &= 7.72 \text{ Mg/año} \end{aligned}$$

Ejemplo 4 - Resumen

Los estimados de emisión de las siete fuentes dentro de un sistema de distribución de gasolina típico han sido presentados a través de los ejemplos 4a a 4g, y se presentan en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8

Resumen de las Emisiones del Sistema de Distribución de Gasolina

Fuente de Emisión (Ejemplo)	Estimado de Emisión (kg/año)	Porcentaje de las Emisiones Totales
Tanque Aéreo de Almacenamiento a Granel (4a)	23,981	39.5%
Fugitivas (Fugas de Equipo) [Separación de Intervalos] (4b)	1,312	2.2%
Carga de Pipas (4c)	17,920	29.5%
Pipas en Tránsito (4d)	99	0.2%
Llenado del Tanque Subterráneo (4e)	8,450	13.9%
Respiración del Tanque Subterráneo (4f)	1,200	2.0%
Recarga Vehicular (4g)	7,720	12.7%
Total	60,682	100.0%

En la Tabla anterior se puede observar que las emisiones fugitivas, las de las pipas en tránsito y las de respiración del tanque subterráneo son relativamente pequeñas, comparadas con las otras fuentes de emisión. Los estimados de emisión y la distribución presentados anteriormente son hipotéticos; los estimados de emisión reales serán diferentes. Los esfuerzos para mejorar la precisión del inventario en el futuro deberán enfocarse hacia las mayores fuentes de emisión en el sistema de distribución de gasolina.

Ejemplo 5a

Evaporación de Solventes - Desengrasado

Introducción

El desengrasado con solventes y las operaciones de limpieza de superficies con solventes se llevan a cabo en una amplia variedad de establecimientos industriales, científicos y de reparación. Las operaciones de limpieza de superficies implican en uso de solventes líquidos o vapores para eliminar los contaminantes insolubles en agua tales como grasa, aceites, ceras, depósitos de carbón, resinas y alquitranes de las superficies de metal, plástico, vidrio y otros materiales. Las operaciones de desengrasado con solventes pueden implicar el uso de un gran número de sustancias diferentes, tales como la acetona, metil-etil-cetona (MEK), alcoholes, 1,1,1-tricloroetano o CFC-113.

El equipo típico para la limpieza de solventes puede clasificarse como:

- **Máquinas de limpieza por lotes en frío.** Estas máquinas se cargan con un lote, que se asperja, sumerge o cepilla con el solvente líquido para ser limpiado.
- **Máquinas de limpieza por lotes con vapor.** Estas máquinas se cargan con un lote, y los materiales a ser limpiados se exponen al solvente vaporizado. El solvente condensado arrastra los contaminantes de las superficies a ser limpiadas.
- **Máquinas de limpieza en línea.** Estas máquinas se cargan continuamente utilizando un transportador, y a menudo están fabricadas especialmente para operaciones a gran escala. La máquina de limpieza de solvente en línea puede utilizar solventes líquidos o en vapor.

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones de GOT anuales de una máquina de limpieza por lotes en frío y de una máquina de limpieza por lotes con vapor.

Información Disponible

Máquina de limpieza por lotes en frío

- El solvente utilizado es hidrocarburo alifático (e. g., Stoddard[®], nafta)
- La capacidad del limpiador en frío es de 200 litros.
- La densidad del solvente es de 0.8 g/ml (0.8 kg/litro)
- La bitácora de los datos de uso del solvente se muestran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1

Datos de la Bitácora de Uso de Solventes

Fecha	Solvente Adicionado (litros)	Residuos Líquidos Eliminados (litros)	Lodos Residuales Eliminados (kg)
2 Feb	200	195	--
30 May	200	203	--
15 Ago	200	198	1.3
28 Nov	200	205	--

- El solvente nuevo añadido contiene 100% de GOT
- El residuo líquido es 95 wt% GOT (incluye los contaminantes tales como agua, grasa, aceite, resina, etc.)
- Se supone que el residuo líquido tiene la misma densidad que el solvente nuevo.
- El residuo sólido (lodos) es 10 wt% GOT.

Máquina de limpieza por lotes con vapor

- El solvente utilizado es percloroetileno
- La capacidad es de 200 litros
- La densidad del solvente es de 1.6 g/ml (1.6 kg/litro)
- Los datos de consumo del solvente se muestran en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2
Datos de Consumo de Solvente

Fecha	Solvente Adicionado (litros)	Residuos Líquidos Eliminados (litros)	Lodos Residuales Eliminados (kg)
14 Ene	20	--	--
8 Feb	35	--	--
26 Mar	200	178	--
10 Abr	20	--	--
2 May	25	--	--
18 May	20	--	--
20 Jun	200	160	--
4 Jul	15	--	--
6 Ago	30	--	--
18 Sep	200	167	2
3 Nov	50	--	--
15 Dic	200	185	--

- El solvente nuevo es 100% GOT
- El residuo líquido es 95 wt% GOT (incluye contaminantes tales como agua, grasa, aceite, resina, etc.)
- Se asume que la densidad del residuo líquido es igual la densidad del solvente nuevo
- Los residuos sólidos (lodos) son 10 wt% GOT.

Solución

Las emisiones de la limpieza en frío se presentan a través de la evaporación del solvente residual y de los lodos, el arrastre del solvente, la evaporación del baño de solvente, la evaporación del aspersor y la agitación. Las emisiones del desengrasado con vapor se deben a la difusión y convección, arrastre de solvente, los sistemas de venteo y la evaporación de los solventes y lodos residuales.

Dado que la recopilación de datos para todos estos mecanismos de emisión sería sumamente costosa y requeriría mucho tiempo, generalmente se estiman tasas de emisiones para los datos de consumo de solvente para la operación de desengrasado particular que se está analizando. Si no existen datos de consumo de solventes, los factores de emisión basados en el número de empleados o los datos de población pueden obtenerse de la literatura (e. g., U.S. EPA, 1991b). Para la estimación de emisiones en fuentes puntuales, es sumamente recomendable que se utilice la siguiente ecuación de balance de masas:

$$E = (Q_{in} \times r_{in} \times TOG_{in}) - (Q_{out(liq)} \times r_{out(liq)} \times TOG_{out(liq)}) - (Q_{out(solid)} \times TOG_{out(solid)})$$

donde:

E	=	Emisiones de GOT totales (kg)
Q_{in}	=	Cantidad del solvente añadido al desengrasador (litros)
ρ_{in}	=	Densidad del solvente añadido al desengrasador (kg/litro)
GOT_{in}	=	Contenido de GOTs del solvente añadido al desengrasador (wt%)
$Q_{out(liq)}$	=	Cantidad de residuos líquidos eliminados del desengrasador (litros)
$\rho_{out(liq)}$	=	Densidad de los residuos líquidos retirados del desengrasador (kg/litro)
$GOT_{out(liq)}$	=	Contenido de GOTs de los residuos líquidos retirados del desengrasador (wt%)
$Q_{out(solid)}$	=	Cantidad de residuos sólidos (lodos) eliminados del desengrasador (kg)
$GOT_{out(solid)}$	=	Contenido de GOTs de los residuos sólidos (lodos) eliminados del desengrasador (wt%).

Máquina de limpieza por lotes en frío

Las emisiones de la máquina de limpieza por lotes en frío se calculan utilizando la ecuación de balance de masa anterior. Los datos de la bitácora de solventes se utilizan para calcular la cantidad de solvente añadido (Q_{in}), la cantidad de residuos líquidos retirados ($Q_{out(liq)}$), y la cantidad de lodos eliminados ($Q_{out(solid)}$).

$$Q_{in} = (200 + 200 + 200 + 200) = 800 \text{ litros}$$

$$Q_{out(liq)} = (195 + 203 + 198 + 205) = 801 \text{ litros}$$

$$Q_{\text{out(solid)}}=1.3 \text{ kg}$$

Entonces, las emisiones totales se calculan como se muestra a continuación:

$$E = (800 \times 0.8 \times 100\%) - (801 \times 0.8 \times 95\%) - (1.3 \times 10\%) = 31 \text{ kg GOT/año}$$

Máquina de limpieza por lotes con vapor

Las emisiones de la máquina de limpieza por lotes con vapor se calculan aplicando la misma ecuación de balance de masa anterior. Una vez más, los datos de la bitácora de solventes se utiliza para calcular Q_{in} , $Q_{\text{out(liq)}}$, y $Q_{\text{out(solids)}}$.

Donde:

$$Q_{\text{in}} = (20 + 35 + 200 + 20 + 25 + 20 + 200 + 15 + 30 + 200 + 50 + 200) = 1015 \text{ litros}$$

$$Q_{\text{out(liq)}} = (178 + 160 + 167 + 185) = 690 \text{ litros}$$

$$Q_{\text{out(solid)}} = 2 \text{ kg}$$

Entonces, las emisiones totales se calculan como se muestra a continuación:

$$E = (1015 \times 1.6 \times 100\%) - (690 \times 1.6 \times 95\%) - (2 \times 10\%) = 575 \text{ kg GOT/año}$$

Cuando se estiman las emisiones del desengrasado con solventes, es necesario considerar los siguientes aspectos:

- En general, las bitácoras de consumo de solventes de los limpiadores en frío sólo incluyen los registros de los cambios (i. e., todos los residuos líquidos son eliminados y se añade solvente nuevo para toda la capacidad del limpiador).
- En general, las bitácoras de consumo de los desengrasadores de vapor incluyen los registros de los cambios y rellenados (i. e., se adiciona solvente nuevo para reemplazar el solvente evaporado sin que ningún tipo de residuos líquidos haya sido eliminado al mismo tiempo).

- El contenido de GOT de los residuos líquidos y sólidos debe, preferentemente, ser determinado con el muestreo periódico. Sin embargo, el costo de un muestreo frecuente lo hace prohibitivo, por lo tanto, a menudo el juicio ingenieril es utilizado para estimar el contenido de GOT en los residuos sólidos y líquidos.
- La cantidad de GOTs recuperada en los residuos sólidos (lodos) generalmente es muy pequeña, comparada con la que se recupera en los residuos líquidos. Por lo tanto, con frecuencia se supone, de manera conservadora que los GOTs en los residuos sólidos son emitidos al aire.
- Las emisiones de algunos solventes desengrasantes (e. g., percloroetileno, freones, etc.), no deben ser incluidas en los inventarios de GOR (gases orgánicos reactivos).
- Es posible que el juicio ingenieril sea necesario para reconciliar el periodo de tiempo definido por la bitácora de consumo con el periodo de tiempo necesario para el cálculo de las emisiones. Por ejemplo, la bitácora de consumo del limpiador por lotes en frío no contiene datos después del 28 de noviembre, pero el equipo seguiría teniendo emisiones hasta el final del periodo de emisión anual (i. e., 31 de diciembre). Para los inventarios de emisiones reales, generalmente se supone que estas emisiones adicionales se reflejarán en la entrada del siguiente consumo (i. e., en el siguiente año calendario).

Ejemplo 5b

Evaporación de Solventes – Recubrimiento de Superficies

Introducción

El recubrimiento de superficies incluye todos los procesos en que se aplica materiales líquidos a la superficie de un sustrato sólido. Las emisiones al aire se producen tanto de la evaporación de solventes u otros propelentes orgánicos en los recubrimientos, y del “sobreasperado” de los materiales particulados que no se adhieren a las partes. Las emisiones particuladas pueden reducirse con la utilización de cabinas de pintado y otros equipos de control. Además de los materiales existentes para el recubrimiento de superficies, las emisiones también provienen de los materiales utilizados para la preparación de superficies previa a la aplicación del recubrimiento y para la limpieza posterior.

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones de GOTs, PM y compuestos de zinc de la operación de recubrimiento de superficies que se describe posteriormente. Incluir todos los materiales para el recubrimiento de superficies, adelgazamiento, preparación de superficies y limpieza. No existen registros que indiquen la cantidad de pintura utilizada.

Información Disponible

Se utilizan dos tipos de pintura (poliuretano y primer). La pintura de poliuretano consiste de una base y un endurecedor que deben mezclarse, Además, debe ser rebajada con un adelgazador. La proporción de mezcla del poliuretano es 7:2:1 (base:endurecedor:adelgazante). El primer no tiene componentes y no requiere ser adelgazado. Las características del material de la base, endurecedor, adelgazante, primer y otros solventes para la preparación y limpieza de superficies se presentan en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3**Características de los Materiales para el Recubrimiento de Superficies**

Material	Densidad (gramos/litro)	Contenido de COVs (gramos/litro)	Contenido de Sólidos (%)
Base – poliuretano	700	520	31
Endurecedor – Poliuretano	750	330	35
Adelgazador – Poliuretano	820	820	-
Primer	680	460	40
Solvente para la preparación de superficies	820	820	-
Solvente de limpieza	820	820	-

Por otro lado, 2% de los sólidos de la Pintura 1 (mezclada), y 1.5% de los sólidos en la Pintura 2 son compuestos de zinc.

La mitad del poliuretano se aplica utilizando equipo de aspersión de alto volumen/baja presión (HVLP), mientras que la otra mitad se aplica con equipo de aspersión convencional. El primer se aplica directamente de latas de spray en aerosol. El poliuretano se utiliza en una cabina de pintado equipada con filtros secos de partículas [eficiencia de control (EC) aproximada, 90%], pero el primer se utiliza en un área abierta.

La operación de recubrimiento de superficies consiste en pintar partes de aparatos de cocina. El producto anual de la operación es de 25,000 partes. Los pintores que trabajan en esta operación estiman que cada parte requiere 0.8 litros de poliuretano y 0.2 litros de primer; y que los solventes utilizados para la preparación de superficie constituyen el 40% de la pintura aplicada a cada parte, mientras que los solventes de limpieza son el 15%. Se supone que todos los solventes de preparación y limpieza de la superficie se aplican por frotamiento y que el 100% de los solventes aplicados se evaporan. Sólo el 95% del poliuretano o primer de un contenedor dado puede ser aplicado realmente a las partes que serán pintadas; el 5% restante no puede ser utilizado. Sin embargo, debe asumirse que todos los solventes en la pintura residual se evaporan a la atmósfera.

Solución - GOT

Determinar las cantidades de poliuretano, primer, solvente para preparación de superior y limpieza que se requieren:

La cantidad de la pintura aplicada se calcula multiplicando el número de partes por la cantidad de poliuretano y primer requerida por cada parte.

$$\text{Poliuretano Aplicado} = 25,000 \text{ partes} \times \frac{0.8 \text{ litros}}{\text{parte}} = 20,000 \text{ litros}$$

$$\text{Primer Aplicado} = 25,000 \text{ partes} \times \frac{0.2 \text{ litros}}{\text{parte}} = 5,000 \text{ litros}$$

$$\text{Pintura Aplicada Total} = 20,000 + 5,000 = 25,000 \text{ litros}$$

La cantidad de pintura aplicada en realidad es sólo el 95% de la cantidad de pintura usada. La cantidad de pintura realmente mezclada se calcula a continuación:

$$\text{Poliuretano Mezclado} = \frac{20,000 \text{ litros}}{0.95} = 21,053 \text{ litros}$$

$$\text{Primer Mezclado} = \frac{5,000 \text{ litros}}{0.95} = 5,263 \text{ litros}$$

La cantidad de los solventes de preparación y limpieza se calculan a partir de la cantidad de pintura realmente aplicada:

$$\text{Solvente de Preparación} = \frac{0.40 \text{ litros de solvente}}{\text{litro de pintura}} \times 25,000 \text{ litros} = 10,000 \text{ litros}$$

$$\text{Solvente de Limpieza} = \frac{0.15 \text{ litros de solvente}}{\text{litro de pintura}} \times 25,000 \text{ litros} = 3,750 \text{ litros}$$

El contenido de GOTs del poliuretano se calcula como el promedio ponderado del contenido de GOTs de cada uno de los componentes (base, endurecedor y adelgazador).

$$\text{TOG}_{\text{poly}} = (\%_{\text{base}} \times \text{TOG}_{\text{base}}) + (\%_{\text{hard}} \times \text{TOG}_{\text{hard}}) + (\%_{\text{thin}} \times \text{TOG}_{\text{thin}})$$

$$\text{TOG}_{\text{poly}} = (0.7 \times 520) + (0.2 \times 330) + (0.1 \times 820) = 512 \text{ gramos/litro}$$

Entonces, las emisiones se calculan multiplicando la cantidad de cada pintura o solvente utilizada por su respectivo contenido de GOTs.

$$\text{Emisiones}_{\text{Poly}} = 21,053 \text{ litros} \times \frac{512 \text{ gramos}}{\text{litro}} = 10,779 \text{ kg}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{Primer}} = 5,263 \text{ litros} \times \frac{460 \text{ gramos}}{\text{litro}} = 2,421 \text{ kg}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{Prep}} = 10,000 \text{ litros} \times \frac{820 \text{ gramos}}{\text{litro}} = 8,200 \text{ kg}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{Cleanup}} = 3,750 \text{ litros} \times \frac{820 \text{ gramos}}{\text{litro}} = 3,075 \text{ kg}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{TOG-Total}} = 10,779 + 2,421 + 8,200 + 3,075 = 24,475 \text{ kg} = 24.5 \text{ Mg}$$

Solución - PM

Las emisiones no controladas de PM pueden calcularse con la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones}_i = P_i \times \rho_i \times SC_i \times (1 - \eta)$$

donde:

- Emisiones_i = Emisiones totales no controladas del recubrimiento de superficies, i (kg)
- P_i = Cantidad de pintura aplicada (litro)
- ρ_i = Densidad del recubrimiento de superficies, i (g/litro)
- SC_i = Contenido de sólidos del recubrimiento de superficies, i (fracción)
- η = Eficiencia de transferencia del método de aplicación (fracción).

Primero necesita determinarse la densidad y el contenido de sólidos de la pintura de poliuretano. Esta información se obtiene de la Tabla de características del material.

$$r_{\text{poly}} = (\% \text{ base} \times r_{\text{base}}) + (\% \text{ hard} \times r_{\text{hard}}) + (\% \text{ thin} \times r_{\text{thin}})$$

$$r_{\text{poly}} = 0.7 \times 700 + 0.2 \times 750 + 0.1 \times 820 = 722 \text{ gramos/litro}$$

$$SC_{\text{poly}} = \frac{r_{\text{base}} SC_{\text{base}} \% \text{ base} + r_{\text{hard}} SC_{\text{hard}} \% \text{ hard} + r_{\text{thin}} SC_{\text{thin}} \% \text{ thin}}{r_{\text{poly}}}$$

$$SC_{\text{Tot}} = \frac{(700)(0.31)(0.70) + (750)(0.35)(0.20) + (820)(0.00)(0.10)}{722} = 28.3\%$$

La Tabla 5-4 presenta las eficiencias de transferencia para los diversos métodos de aplicación.

Tabla 5-4
Eficiencias de Transferencia en el Recubrimiento de Superficies

Método de Aplicación	Eficiencia de Transferencia
Aerosol eb kata	0.24
Equipo de aspersión sin aire	0.35
Cepillo o rodillo	0.95
Equipo de aspersión de aire convencional	0.30
Equipo de aspersión de alto volumen/baja presión (HVLP)	0.60

Fuente: SCAQMD, 1996

Las emisiones no controladas de PM se calculan como:

$$\text{Emisiones}_{\text{PolyHVLP}} = \frac{722 \text{ gramos}}{\text{litro}} \times 0.283 \times (1 - 0.60) \times 10,000 \text{ litros} = 817 \text{ kg}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{Polyotros}} = \frac{722 \text{ gramos}}{\text{litro}} \times 0.283 \times (1 - 0.30) \times 10,000 \text{ litros} = 1,430 \text{ kg}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{Primer}} = \frac{680 \text{ gramos}}{\text{litro}} \times 0.4 \times (1 - 0.24) \times 5,000 \text{ litros} = 1,034 \text{ kg}$$

Las emisiones controladas de PM se calculan como:

$$\text{Emisiones}_{\text{Polycont}} = (1 - \text{CE}) (\text{Emisiones}_{\text{PolyHVLP}} + \text{Emisiones}_{\text{Polyother}})$$

donde:

CE = eficiencia de control

$$\text{Emisiones}_{\text{Poly,cont}} = (1 - 0.90) (817 + 1,430) = 225 \text{ kg}$$

Finalmente se calculan las emisiones combinadas de PM totales para el poliuretano y el primer.

$$\text{Emisiones}_{\text{Total}} = 225 + 1,034 = 1,259 \text{ kg} = 1.3 \text{ Mg}$$

Solución – Compuestos de Zinc

Las emisiones de una especie química particular se calcula multiplicando las emisiones generales de PM por el porcentaje de dicha especie. Utilizando este método, a continuación se calculan las emisiones de compuestos de zinc.

$$\text{Emisiones}_{\text{Zn,poly}} = 2\% \times 225 \text{ kg PM}_{10} = 4.5 \text{ kg}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{Zn,primer}} = 1.5\% \times 1,034 \text{ kg PM}_{10} = 15.5 \text{ kg}$$

$$\text{Emisiones}_{\text{Zn,total}} = 4.5 + 15.5 = 20 \text{ kg}$$

Ejemplo 6

Emisiones de Chimenea en Fuente Puntual

Introducción

Entre las diversas técnicas de estimación de emisiones, el muestreo en fuente permite obtener las estimaciones más confiables (aunque el costo también tiende a ser el más elevado). La razón para obtener la alta precisión radica en que los efectos de los parámetros específicos del equipo y del proceso son medidos directamente por el equipo de muestreo. Si bien el muestreo en fuente puede proporcionar estimados de emisión precisos, en algunas ocasiones se requiere demasiado esfuerzo para convertir los datos del muestreo en estimados de emisiones. Este ejemplo muestra el proceso para convertir las mediciones de concentración en tasas de emisión de masa.

Planteamiento del Problema

Determinar las emisiones promedio de NO_x por hora y anuales de una chimenea de proceso dadas las mediciones típicas de la chimenea.

Información Disponible

Las siguientes mediciones promedio han sido recopiladas de la chimenea a partir de métodos de prueba en fuente autorizados:

Tasa de flujo de gas real de la chimenea:	7486 cfm
Temperatura del gas de chimenea:	80.0°C
Diámetro de la chimenea:	0.75 m
Contenido de vapor de agua:	2.1% vol
Contenido de CO ₂ :	9.5% vol
Concentración de NO _x :	48 ppmv

Se supone que el resto del gas de la chimenea es aire. El proceso opera 24 horas al día, 330 días al año.

Solución

Los pasos necesarios para determinar las emisiones de NO_x diarias y anuales de esta chimenea de proceso con la información disponible son:

1. Recopilar los datos necesarios para realizar los cálculos de emisión de la chimenea y definir los términos:

Volumen molar estándar (V _s) (a 20°C):	0.024 m ³ /g-mol
Peso molecular (MW) de NO _x :	46 (los NO _x se expresan como NO ₂ por convención)
Condiciones estándar:	20°C y 760 mmHg

Las condiciones estándar (temperatura y presión) se utilizan con frecuencia, de manera tal que todas las emisiones se reporten en la misma base. Diferentes condiciones estándar pueden ser válidas en diferentes jurisdicciones y para aplicaciones distintas.

2. Determinar la tasa métrica de flujo del gas de la chimenea (volumen/unidad de tiempo) en las condiciones de la chimenea (m³/min):

a. Dadas:

Tasa de flujo real de gas de la chimenea:	7486 cfm
Temperatura de la chimenea:	80.0°C

b. Tasa métrica de flujo del gas de la chimenea en las condiciones de la chimenea:

$$= \left(\frac{7486 \text{ ft}^3}{\text{min}} \right) \left(\frac{0.3048 \text{ m}}{\text{ft}} \right)^3 = 2.12 \times 10^2 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \text{ (a } 80^\circ \text{ C, presión de la chimenea)}$$

3. Determinar la tasa de flujo volumétrico de NO_x en el gas de la chimenea

(volumen/unidad de tiempo):

- a. El gas de la chimenea en este ejemplo está húmedo (2.1% de agua por volumen). La información proporcionada no especifica si la concentración de NO_x fue medida en base seca o húmeda. Sin embargo, a partir del conocimiento de las técnicas analíticas, se sabe que las mediciones de NO_x se hacen y se reportan en base seca; por lo tanto, primero debe calcularse la tasa de flujo de gas seco.
- b. Calcular la tasa de flujo volumétrico de gas seco de la chimenea:

1. Datos:

Contenido de agua del gas de la chimenea: 2.1% por volumen
Tasa de flujo del gas húmedo de la chimenea: $2.12 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{min}$ (a 80°C , presión de la chimenea)

2. Tasa de flujo del gas seco de la chimenea:

$$Q_{\text{dry}} = Q_{\text{wet}} \left(\frac{V_{\text{dry}}}{V_{\text{wet}}} \right)$$

donde:

Q_{dry} = tasa de flujo de gas seco de la chimenea

Q_{wet} = tasa de flujo de gas húmedo de la chimenea

$V_{\text{dry}}/V_{\text{wet}}$ = fracción de aire en el gas húmedo de la chimenea.

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{2.12 \times 10^2 \text{ m}^3 \text{ gas de chimenea (húmedo)}}{\text{min}} \right) \left(\frac{(1 - 0.021) \text{ m}^3 \text{ gas de chimenea (seco)}}{1 \text{ m}^3 \text{ gas de chimenea (húmedo)}} \right) \\ &= \frac{2.08 \times 10^2 \text{ m}^3 \text{ gas de chimenea (seco)}}{\text{min}} \end{aligned}$$

c. Calcular la tasa de flujo de NO_x :

1. Datos:

Concentración de NO_x : 48 ppmv

2. Tasa de flujo de NO_x :

$$Q_{\text{NO}_x} = Q_{\text{dry}} C_{\text{NO}_x}$$

donde:

$$Q_{\text{NO}_x} = \text{tasa de flujo de NO}_x$$

$$Q_{\text{dry}} = \text{tasa de flujo del gas seco de la chimenea}$$

$$C_{\text{NO}_x} = \text{concentración de NO}_x$$

$$\left(2.08 \times 10^2 \frac{\text{m}^3 \text{ gas de chimenea}}{\text{min}} \right) \left(\frac{48 \text{ m}^3 \text{ NO}_x}{10^6 \text{ m}^3 \text{ gas de chimenea}} \right)$$

$$= \frac{9.98 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ NO}_x}{\text{min}} \text{ (a } 80^\circ\text{C, presión de chimea, base seca)}$$

4. Corregir la tasa de flujo volumétrica de NO_x a condiciones estándar (20°C y 760 mmHg) aplicando la ley del gas ideal.
 - a. Para este ejemplo, se supone que la corrección se requiere sólo para la temperatura, debido a que se supone que el gas de la chimenea está a 1 atmósfera (760 mmHg) puesto que la chimenea está abierta a la atmósfera al nivel del mar.
 - b. A partir de la ley del gas ideal ($PV = nRT$), la relación entre el volumen y la temperatura del gas es:

$$V = nRT/P$$

$$V/T = nR/P$$

- c. En este ejemplo, independientemente de la temperatura de la chimenea, se consideran constantes el número de moles (n) del NO_x en el gas de la chimenea, la constante del gas (R) y la presión (P) del gas de la chimenea. Por lo tanto, las relaciones entre el volumen y la temperatura del gas pueden ser desarrolladas como se muestra a continuación para cualquier pareja de temperatura absolutas. (T_1 y T_2):

$$V_1/T_1 = n_1 R_1 / P_1 \quad \text{y} \quad V_2/T_2 = n_2 R_2 / P_2$$

Dado que nR/P es constante, entonces $n_1 R_1 / P_1 = n_2 R_2 / P_2$, por lo tanto:

$$V_1/T_1 = V_2/T_2$$

- d. Al despejar para el volumen desconocido de gas (V_2) a la nueva temperatura (T_2),

$$V_2 = V_1 T_2 / T_1$$

- e. La ecuación para la tasa de flujo volumétrico desconocida (Q_2) a la nueva temperatura (T_2) es similar,

$$Q_2 = Q_1 T_2 / T_1$$

- f. Calcular la tasa de flujo volumétrico de NO_x (Q_2) a la nueva temperatura (20°C) (en este cálculo deben utilizarse temperaturas absolutas):

$$Q_2 = \left(9.96 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \text{NO}_x}{\text{min}} \right) \left(\frac{[20^\circ\text{C} + 273]}{[80^\circ\text{C} + 273]} \right) = 8.27 \times 10^{-3} \frac{\text{Sm}^3 (\text{m}^3 \text{estándar})}{\text{min}} \quad (\text{a } 20^\circ\text{C}, 760 \text{ mmHg})$$

5. Determinar la tasa de flujo másico y las emisiones de NO_x diarias y anuales (masa/día y masa/año):

a. Datos:

$$\text{Tasa de flujo volumétrico de NO}_x = 8.27 \times 10^{-3} \frac{\text{Sm}^3}{\text{min}}$$

$$V_s (\text{volumen molar estándar}) = 0.024 \frac{\text{Sm}^3}{\text{g - mole}} (20^\circ\text{C}, 760 \text{ mmHg})$$

$$\text{MW de NO}_x (\text{como NO}_2) = 46 \frac{\text{g}}{\text{g - mole}}$$

Operación anual de la chimenea = 24 horas diarias, 330 días al año

b. Tasa de flujo másico de NO_x:

$$M_{\text{NO}_x} = \frac{Q_{\text{NO}_x} \text{MW}_{\text{NO}_x}}{V_s}$$

donde:

M_{NO_x} = Tasa de flujo de masa de NO_x

Q_{NO_x} = Tasa de flujo volumétrica de NO_x

MW_{NO_x} = Peso molecular del NO_x

V_s = Volumen molar estándar

$$\left(8.27 \times 10^{-3} \frac{\text{Sm}^3 \text{ NO}_x}{\text{min}} \right) \left(\frac{1 \text{ g-mole NO}_x}{0.024 \text{ Sm}^3 \text{ NO}_x} \right) \left(\frac{46 \text{ g NO}_x}{\text{g-mole NO}_x} \right) = 15.8 \frac{\text{g NO}_x}{\text{min}}$$

c. Emisiones por hora:

$$\left(\frac{15.8 \text{ g NO}_x}{\text{min}} \right) \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} \right) = 0.948 \frac{\text{kg NO}_x}{\text{hr}}$$

d. Emisiones anuales:

$$\left(\frac{0.948 \text{ kg NO}_x}{\text{hr}} \right) \left(\frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \right) \left(\frac{330 \text{ days}}{\text{yr}} \right) = 7.51 \times 10^3 \text{ kg/año}$$
$$= 7.5 \text{ Mg/año}$$

Ejemplo 7

Partículas – Estimación de PM_{10} , $PM_{2.5}$, Carbón Orgánico y Carbón Elemental

Introducción

Las emisiones de partículas están formadas por partículas dentro de una amplia gama de tamaños, que fluctúan desde las dimensiones casi moleculares hasta las 100 micras de diámetro. Las partículas con diámetros superiores a las 100 micras no permanecen suspendidas por un periodo de tiempo significativo y se depositan cerca de su punto de origen. En consecuencia, estas partículas no son consideradas generalmente en las aplicaciones de calidad del aire. Actualmente, la mayoría de los esfuerzos de inventario se enfocan en las PM_{10} (partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micras). Sin embargo, a medida en que el enfoque de la calidad del aire ha crecido para incluir los aspectos de visibilidad, se ha puesto más atención a las emisiones de $PM_{2.5}$ (partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras). La investigación relacionada con la visibilidad también requiere un análisis de la composición de las partículas. La magnitud de la extinción de luz ocasionada por las partículas está en función de su composición química. Las partículas que contienen carbón orgánico (co) o carbón elemental (CE) absorben la luz, mientras que las partículas que contienen otros tipos de compuestos químicos tienden a dispersarla.

Planteamiento del Problema

Estimar las emisiones de PM_{10} , $PM_{2.5}$, oc y CE dadas las emisiones de partículas suspendidas totales (PST) de caminos pavimentados y no pavimentados.

Información Disponible

Utilizando las metodologías de estimación estándar, se ha considerado que las emisiones de PST son de 600 Mg para los caminos pavimentados y de 3,000 Mg para los no pavimentados dentro del dominio de un inventario particular.

Solución - PM_{10} y $PM_{2.5}$

De manera ideal, las fracciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ deberían ser desarrolladas para las emisiones de polvo re-suspendidos en caminos pavimentados y no pavimentados en cada localidad. Sin

embargo, esto no es práctico y, como resultado, las fracciones promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ son utilizadas con frecuencia para estimar las emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente. Existen diversas fuentes para estas fracciones promedio para PM_{10} y $PM_{2.5}$.

La primera fuente de las fracciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ es el AP-42 (U. S. EPA, 1995a). Las ecuaciones utilizadas para estimar las emisiones de polvo re-suspendidas de caminos pavimentados y no pavimentados utilizan los multiplicadores del tamaño de partícula (PSM) (AP-42, Secciones 13.2.1 y 13.2.2), que se presentan en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1
Multiplicadores para el Tamaño de Partícula de Polvo para Caminos Pavimentados y No Pavimentados del AP-42

Diámetro Aerodinámico de la Partícula	Caminos Pavimentados (g/VKT)	Caminos No Pavimentados (adimensional)
PM_{30}^*	24	1
PM_{10}	4.6	0.36
$PM_{2.5}$	2.1	0.095

*Las PM_{30} en algunas ocasiones son denominadas “partículas suspendibles” (SP) y con frecuencia son utilizadas como sustituto de las PST.

Las fracciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (F_{10} y $F_{2.5}$) se obtienen dividiendo los multiplicadores del tamaño de partícula PM_{10} y $PM_{2.5}$ (PSM_{10} y $PSM_{2.5}$) entre el multiplicador del tamaño de partícula PST (PSM_{PST}).

$$F_{2.5\text{-no pavimentado}} = \frac{PSM_{2.5\text{-no pavimentado}}}{PSM_{PST\text{-no pavimentado}}} = \frac{0.095}{1} = 0.095$$

$$F_{2.5\text{-pavimentado}} = \frac{PSM_{2.5\text{-pavimentado}}}{PSM_{PST\text{-pavimentado}}} = \frac{2.1}{24} = 0.088$$

$$F_{10\text{-pavimentado}} = \frac{PSM_{10\text{-pavimentado}}}{PSM_{TSP\text{-pavimentado}}} = \frac{4.6}{24} = 0.192$$

$$F_{10\text{-no pavimentado}} = \frac{PSM_{10\text{-no pavimentado}}}{PSM_{TSP\text{-no pavimentado}}} = \frac{0.36}{1} = 0.360$$

Otra fuente de fracciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ es la base de datos SPECIATE de la EPA (U. S. EPA, 1992). Esta base de datos contiene los perfiles de especiación para una amplia gama de categorías de emisión; muchos de estos perfiles son compuestos. Adicionalmente, se dan las fracciones de masa para diferentes intervalos de tamaño de cada categoría de emisión. Con base en los perfiles compuestos, las fracciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (F_{10} y $F_{2.5}$) para caminos pavimentados y no pavimentados se presentan en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2
Fracciones de Masa de Polvo para Caminos Pavimentados y No Pavimentados
de la Base de Datos SPECIATE

Intervalo del Tamaño de Partícula (mm)	Fracción para Caminos Pavimentados (Perfil 41130 de SPECIATE)	Fracción para Caminos No Pavimentados (Perfil 41220 de SPECIATE)
0-2.5	0.25	0.3
0-10	0.44	0.73

De manea similar, el Consejo de Recursos del Aire de California proporciona sus propias fracciones de masa para diferentes intervalos de tamaño (ARB, 1996), que se presentan en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3
Fracciones de Masa de Polvo para Caminos Pavimentados
y No Pavimentados de la ARB

Intervalo del Tamaño de Partícula (mm)	Fracción para Caminos Pavimentados	Fracción para Caminos No Pavimentados
<1	0.03	0.05
1-2.5	0.05	0.08
2.5-10	0.38	0.49
>10	0.54	0.38

Debido a que las fracciones de masa no son correspondientes con las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5}, ciertas fracciones de masa deben sumarse como se muestra a continuación:

Para caminos pavimentados:

$$F_{2.5} = F_{<1} + F_{1-2.5} = 0.03 + 0.05 = 0.08$$

$$F_{10} = F_{<1} + F_{1-2.5} + F_{2.5-10} = 0.03 + 0.05 + 0.38 = 0.46$$

Para caminos no pavimentados:

$$F_{2.5} = F_{<1} + F_{1-2.5} = 0.05 + 0.08 = 0.13$$

$$F_{10} = F_{<1} + F_{1-2.5} + F_{2.5-10} = 0.05 + 0.08 + 0.49 = 0.62$$

Después de obtener las fracciones PM_{10} y $PM_{2.5}$, las emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ son calculadas aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones}_i = \text{Emisiones}_{PST} \times F_i$$

donde:

Emisiones_i = Emisiones de diámetro menor que i micras

Emisiones_{PST} = Emisiones de PST

F_i = Fracción de PST de diámetro menor que i micras.

Debido a que se utilizan fracciones PM_{10} y $PM_{2.5}$ genéricas, y no específicas del sitio, las emisiones serán estimadas utilizando las fracciones PM_{10} y $PM_{2.5}$ de cada una de las tres fuentes presentadas anteriormente. Adicionalmente, el promedio de las tres fracciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ será utilizado para estimar las emisiones. Los cuatro estimados se presentan en la Tabla 7-4. Cabe señalar que ninguno de estos estimados ha sido identificado como mejor o más preciso que los otros. Aún existe una incertidumbre considerable asociada con los estimados para caminos pavimentados y no pavimentados. La investigación para mejorar las metodologías existentes para estas categorías de fuentes está en desarrollo. Este ejemplo simplemente muestra la forma de derivar los estimados de PM_{10} y $PM_{2.5}$ a partir de las emisiones de PST.

Tabla 7-4

Emisiones de PM₁₀ y PM_{2.5} Calculadas a Partir de Diferentes Fracciones de Tamaño

Tipo de Camino	Contaminante	Fuente de Fracción	Tamaño de Fracción	PST (Mg/año)	Emisiones (Mg/año)
Pavimentado	PM ₁₀	AP-42	0.192	600	115.2
		SPECIATE	0.44		264
		ARB	0.46		276
		Promedio	0.364		218.4
	PM _{2.5}	AP-42	0.088	600	52.8
		SPECIATE	0.25		150
		ARB	0.08		48
		Promedio	0.139		83.4
No pavimentado	PM ₁₀	AP-42	0.36	3,000	1,080
		SPECIATE	0.73		2,190
		ARB	0.62		1,860
		Promedio	0.57		1,710
	PM _{2.5}	AP-42	0.095	3,000	285
		SPECIATE	0.30		900
		ARB	0.13		390
		Promedio	0.175		525

Carbón Orgánico y Carbón Elemental – Solución

Al igual que con las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5}, las fracciones de carbón orgánico (co) y carbón elemental (CE) específicas para el sitio deben ser desarrolladas siempre que sea posible, con el objetivo de obtener los estimados de emisión más precisos. En algunos casos, sin embargo, un análisis de laboratorio detallado no es posible, entonces, deben utilizarse perfiles de especiación genérica. Una fuente de éstos es la base de datos SPECIATE de la EPA. Estos perfiles de especiación SPECIATE indican el porcentaje de compuestos individuales relativos a las emisiones totales de partículas. Para el polvo de caminos pavimentados y no pavimentados, estos perfiles incluyen varias especies de metales, además de los existentes para co y CE.

Los datos de muestreos hipotéticos dan las siguientes fracciones de co y CE para caminos pavimentados y sin pavimentar. Se tomaron tres muestras para ambos tipos de caminos. Se muestrearon dos fracciones de tamaño – fina (0-2.5 μm) y gruesa (2.5-10 μm). Estos datos se presentan en la Tabla 7-5.

Tabla 7-5
Datos Hipotéticos del Muestreo de co y CE

Tipo de Camino	Muestra	Tamaño de Fracción	Fracción co (wt%)	Fracción CE (wt%)
Pavimentado	#1	Fina	17.27	0.72
		Gruesa	12.35	0.44
	#2	Fina	19.41	0.45
		Gruesa	10.89	0.60
	#3	Fina	18.54	0.63
		Gruesa	11.37	0.53
	Promedio	Fina	18.41	0.60
		Gruesa	11.54	0.52
No pavimentado	#1	Fina	2.46	0.00
		Gruesa	1.50	0.00
	#2	Fina	2.71	0.00
		Gruesa	1.65	0.00
	#3	Fina	2.77	0.00
		Gruesa	1.29	0.00
	Promedio	Fina	2.65	0.00
		Gruesa	1.48	0.00

Las fracciones co y CE (F_{co} y F_{CE}) para $PM_{2.5}$ pueden tomarse directamente de la Tabla anterior debido a que las partículas finas se definen como $PM_{2.5}$. Las fracciones co y CE para PM_{10} deben calcularse aplicando un promedio ponderado de las fracciones fina y gruesa de las co y CE. Los datos adicionales del muestro (no incluidos en la Tabla anterior), indican que las PM_{10} del polvo de los caminos pavimentados están integradas por 54 wt% de partículas gruesas y 46 wt% partículas finas; mientras que las PM_{10} del polvo de caminos no pavimentados consiste de 35 wt% de partículas gruesas y 65 wt% de partículas finas. Las fracciones ponderadas de co y CE para PM_{10} se calculan aplicando la siguiente ecuación:

$$F_i = (F_{i,c} \times \%_c) + (F_{i,f} \times \%_f)$$

donde:

- F_i = Fracción total de la especie i
- $F_{i,c}$ = Fracción de la especie i en la porción gruesa de las partículas
- $\%_c$ = Porcentaje en peso de las partículas gruesas
- $F_{i,f}$ = Fracción de la especie i en la porción fina de las partículas
- $\%_f$ = Porcentaje en peso de las partículas finas.

Las fracciones ponderadas de co y CE de las PM_{10} para caminos pavimentados y no pavimentados se calculan a continuación:

$$F_{co,pavimentado} = (11.54 \times 0.54) + (18.41 \times 0.46) = 14.70$$

$$F_{CE,pavimentado} = (0.52 \times 0.54) + (0.60 \times 0.46) = 0.56$$

$$F_{co,no pavimentado} = (1.48 \times 0.35) + (2.65 \times 0.65) = 2.24$$

$$F_{CE,no pavimentado} = (0.00 \times 0.35) + (0.00 \times 0.65) = 0.00$$

Las emisiones de co y CE son calculadas en la Tabla 7-6. Se supone que las emisiones de PM₁₀ y PM_{2.5} son iguales a los valores promedio calculados anteriormente.

Tabla 7-6
Calculo de Emisiones de co y CE

Tipo de Camino	Contaminante	Emisiones (Mg/año)	Fracción co	Emisiones co (Mg/año)	Fracción CE	Emisiones CE (Mg/año)
Pavimentado	PM ₁₀	218.4	0.1470	32.1	0.0056	1.2
	PM _{2.5}	83.4	0.1841	15.4	0.0060	0.5
No pavimentado	PM ₁₀	1710	0.0224	38.3	0.0000	0.0
	PM _{2.5}	525	0.0265	13.9	0.0000	0.0

Referencias

ARB, 1996. California Air Resources Board PM Size Fractionization provided by Patrick Gaffney (ARB). August 29.

ASHRAE, 1997. *1997 ASHRAE Fundamentals Handbook*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Georgia.

Carrillo, 1996. Estimate of LPG usage provided by Gregorio Carrillo (Hidrogas), vía Gerardo Monroy (Arizona Department of Environmental Quality [ADEQ]). July 2.

Dirección General de Ecología, Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, y Subdirección de Inventario de Emisiones, 1995. *Inventario de Fuentes de Area - Precursores de Ozono y CO para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Pág. 121, Tabla C-4. Enero.

Estrada, 1996. PEMEX LPG sales statistics provided by Marcela Campillo Estrada (PEMEX - Unidad de Información y Relaciones Públicas, Hermosillo, Sonora) vía Bill Powers (Powers Engineering). July 31.

Gastelum, 1996. Estimate of LPG usage provided by Pascual Gastelum (Nogales, Sonora Mayor's Office) vía Gerardo Monroy (ADEQ). July 2.

Guerrero, 1996. Estimate of LPG usage provided by María Guerrero (Grupo Dignidad) vía Gerardo Monroy (ADEQ). July 2.

Harris, N.C., C.E. Miller, and I.E. Thomas, 1985. *Solar Energy Systems Design*. John Wiley & Sons, New York, New York.

INE, 1994. *Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 1993-1994*. Instituto Nacional de Ecología, México, D. F.

Monroy, 1996. Results of informal interviews regarding LPG use provided by Gerardo Monroy (Arizona Department of Environmental Quality - Tucson). July 22.

PEMEX, 1996. Presentación intitulada: *Contribución del Gas Licuado de Petróleo a la Contaminación Ambiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México* (The Contribution of LPG to Air Pollution in the Metropolitan Zone of Mexico City), Gas y Petroquímica Básica, Petróleos Mexicanos. Septiembre.

Radian, 1997. *Development of the Hazardous Air Pollutant Emissions Inventory for Ambos Nogales*. Draft Report. Prepared for Arizona Department of Environmental Quality by Radian International, Sacramento, California. July 11.

Smith, J.M. and H.C. Van Ness, 1987. *Introduction to Chemical Engineering Thermo-dynamics*. Fourth Edition. McGraw-Hill, Inc. New York, New York.

Programa del Inventario de Emisiones de México
Versión Final del Cuaderno de Trabajo - Septiembre 1997

South Coast Air Quality Management District, 1996. *Rules and Regulations*, Volume II, Regulation XI, Source-Specific Standards, Rule 1136, Wood Products Coatings. Amended June 14, 1996.

Summit, G.D., C.S. Lighty, W.H. McClennen, A. Kozinski, and C. Diaz-Quiz, 1996. *Characterization of Pollutant Emissions from Waste Burning in Residential Heaters of the U.S./Mexico Border Region*. Prepared for the Southwest Center for Environmental Research and Policy (SCERP) by researchers of the University of Utah and the Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

U.S. EPA, 1978. *Stack Sampling Technical Information: A Collection of Monographs and Papers, Volume I*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. EPA-450/2-78-042a.

U.S. EPA, 1991a. *Nonroad Engine and Vehicle Emission Study Report*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Mobile Sources, Ann Arbor, Michigan. EPA-21A-2001.

U.S. EPA, 1991b. *Procedures for the Preparation of Emission Inventories for Carbon Monoxide and Precursors of Ozone, Volume I: General Guidance for Stationary Sources*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. EPA-450/4-91-016.

U.S. EPA, 1992. *SPECIATE Database*, Version 1.5. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. October.

U.S. EPA, 1995a. *Compilation of Air Pollution Emission Factors (AP-42) - Volume 1: Stationary Point and Area Sources*, Fifth Edition. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina.

U.S. EPA, 1995b. *Protocol for Equipment Leak Emission Estimates*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. November.

U.S. EPA, 1996. *TANKS Software Program*, Version 3.0. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. January.

APENDICE A

DATOS MISCELANEOS Y FACTORES DE CONVERSION

(La información en este apéndice ha sido tomada del Apéndice A del AP-42. Los parámetros son para combustibles estadounidenses; los combustibles mexicanos pueden ser diferentes y deben analizarse cuidadosamente).

PESOS Y MEDIDAS DE USO FRECUENTE

Unidad de Medida	Equivalente	
gramo	0.04	onzas
grano	0.002	onzas
kilogramo	2.21	libras
libra	0.45	kilogramos
libra (troy)	12	onzas
onza	28.35	gramos
tonelada (corta)	2000	libras
tonelada (de embarque)	40	pies ³
tonelada (larga)	2240	libras
tonelada (métrica)	2200	libras
centímetro	0.39	pulgadas
metro	1.09	yardas
milla	1.61	kilómetros
pie	30.48	centímetros
pulgada	2.54	centímetros
yarda	0.91	metros
centímetro ²	0.16	pulgadas ²
metro ²	1.2	yardas ²
milla ²	2.59	kilómetros ²
pie ²	0.09	metros ²
pulgada ²	6.45	centímetros ²
yarda ²	0.84	metros ²
centímetro ³	0.061	pulgadas ³
pie ³	283.17	centímetros ³
pie ³	1728	pulgadas ³
pulgada ³	16.39	centímetros ³
metro ³	1.31	yardas ³
yarda ³	0.77	metros ³

PESOS Y MEDIDAS DE USO FRECUENTE (Continuación)

Unidad de Medida	Equivalente	
barril	31.5	galones
bushel	2150.4	pulgadas ³
bushel (seco)	4	pecks
cuerda	128	pies ³
cuerda	4	metros ³
galón (EU)	231	pulgadas ³
hectárea	2.5	acres
hogshead	2	barriles
peck	8	cuartos
township	36	millas ²

DATOS MISCELANEOS

- Un pie cúbico de carbón de antracita pesa alrededor de 53 libras.
- Un pie cúbico de carbón bituminoso pesa de 47 a 50 libras.
- Para propósitos de generación de vapor, una tonelada de carbón es equivalente a dos cuerdas de madera.
- Un galón de agua (estándar EU) pesa 8.33 libras y contiene 231 pulgadas cúbicas.
- Cada pie cuadrado de superficie de parrilla tiene 9 pies cuadrados de superficie de calentamiento.
- Un pie cúbico de agua contiene 7.5 galones, 1728 pulgadas cúbicas, y pesa 62.5 lbs.
- Cada caballo de fuerza nominal de una caldera requiere de 30 a 35 libras de agua por hora.
- Un caballo de fuerza equivale a levantar 33,000 libras-pie por minuto, ó 550 libras-pie por segundo.
- Para encontrar la presión en libras por pulgada cuadrada de una columna de agua, multiplicar la altura de la columna en pies por 0.434.

PARAMETROS TÍPICOS DE DIVERSOS COMBUSTIBLES^a

Tipo de Combustible	Valor Calorífico		Azufre % (por peso)	Ceniza % (por peso)
	kcal	Btu		
Combustibles Sólidos				
Carbón bituminoso	7,200/kg	13,000/lb	0.6-5.4	4-20
Carbón de antracita	6,810/kg	12,300/lb	0.5-1.0	7.0-16.0
Lignita (@ 35% humedad)	3,990/kg	7,200/lb	0.7	6.2
Madera (@ 40% humedad)	2,880/kg	5,200/lb	N	1-3
Bagazo (@ 50% humedad)	2,220/kg	4,000/lb	N	1-2
Corteza (@ 50% humedad)	2,492/kg	4,500/lb	N	1-3 ^b
Coque, derivado	7,380/kg	13,300/lb	0.5-1.0	0.5-5.0
Combustibles Líquidos				
Aceite residual	9.98 x 10 ⁶ /m ³	150,000/gal	0.5-4.0	0.05-0.1
Aceite destilado	9.30 x 10 ⁶ /m ³	140,000/gal	0.2-1.0	N
Diesel	9.12 x 10 ⁶ /m ³	137,000/gal	0.4	N
Gasolina	8.62 x 10 ⁶ /m ³	130,000/gal	0.03-0.04	N
Queroseno	8.32 x 10 ⁶ /m ³	135,000/gal	0.02-0.05	N
Gas licuado de petróleo	6.25 x 10 ⁶ /m ³	94,000/gal	N	N
Combustibles gaseosos				
Gas natural	9,341/m ³	1,050/SCF	N	N
Gas de coque para horno	5,249/m ³	590/SCF	0.5-2.0	N
Gas para fundidora	890/m ³	100/SCF	N	N

^a N = despreciable

^b El contenido de cenizas puede ser considerablemente mayor cuando hay presencia de arena, suciedad, etc.

EQUIVALENTES TERMICOS PARA DIVERSOS COMBUSTIBLES

Tipo de Combustible	kcal	Btu (neto)
Combustibles sólidos		
Carbón bituminoso	(5.8 to 7.8) x 10 ⁶ /Mg	(21.0 to 28.0) x 10 ⁶ /tonelada
Carbón de antracita	7.03 x 10 ⁶ /Mg	25.3 x 10 ⁶ /tonelada
Lignita	4.45 x 10 ⁶ /Mg	16.0 x 10 ⁶ /tonelada
Madera	1.47 x 10 ⁶ /m ³	21.0 x 10 ⁶ /cuerda
Combustibles líquidos		
Combustóleo residual	10 x 10 ³ /litro	6.3 x 10 ⁶ /bbl
Combustóleo destilado	9.35 x 10 ³ /litro	5.9 x 10 ⁶ /bbl
Combustibles gaseosos		
Gas natural	9,350/m ³	1,050/ft ³
Gas licuado de petróleo		
Butano	6,480/litro	97,400/gal
Propano	6,030/litro	90,500/gal

PESO DE SUSTANCIAS SELECCIONADAS

Tipo de Sustancia	g/litro	lb/gal
Asfalto	1030	8.57
Butano, líquido a 60°F	579	4.84
Petróleo crudo	850	7.08
Petróleo destilado	845	7.05
Gasolina	739	6.17
Propano, líquido a 60°F	507	4.24
Aceite residual	944	7.88
Agua	1000	8.4

DENSIDADES DE SUSTANCIAS SELECCIONADAS

Sustancia	Densidad	
Combustibles		
Petróleo crudo	874 kg/m ³	7.3 lb/gal
Aceite residual	944 kg/m ³	7.88 lb/gal
Petróleo destilado	845 kg/m ³	7.05 lb/gal
Gasolina	739 kg/m ³	6.17 lb/gal
Gas natural	673 kg/m ³	1 lb/23.8 ft ³
Butano	579 kg/m ³	4.84 lb/gal (líquido)
Propano	507 kg/m ³	4.24 lb/gal (líquido)
Madera (secada al aire)		
Olmo	561 kg/m ³	35 lb/ft ³
Abeto, Douglas	513 kg/m ³	32 lb/ft ³
Abeto, Balsámico	400 kg/m ³	25 lb/ft ³
Pinabeto	465 kg/m ³	29 lb/ft ³
Nogal americano	769 kg/m ³	48 lb/ft ³
Maple, Azucarero	689 kg/m ³	43 lb/ft ³
Maple, Blanco	529 kg/m ³	33 lb/ft ³
Encino, Rojo	673 kg/m ³	42 lb/ft ³
Encino, Blanco	769 kg/m ³	48 lb/ft ³
Pino, Sureño	641 kg/m ³	40 lb/ft ³
Productos agrícolas		
Maíz	25.4 kg/bu	56 lb/bu
Mijo	25.4 kg/bu	56 lb/bu
Avena	14.5 kg/bu	32 lb/bu
Cebada	21.8 kg/bu	48 lb/bu
Trigo	27.2 kg/bu	60 lb/bu
Algodón	226 kg/paca	500 lb/paca

DENSIDADES DE SUSTANCIAS SELECCIONADAS (Continuación)

Sustancia	Densidad	
Productos Minerales		
Ladrillo	2.95 kg/ladrillo	6.5 lb/ladrillo
Cemento	170 kg/bbl	375 lb/bbl
Cemento	1483 kg/m ³	2500 lb/yd ³
Concreto	2373 kg/m ³	4000 lb/yd ³
Vidrio, Común	2595 kg/m ³	162 lb/ft ³
Grava, empacada en seco	1600 - 1920 kg/m ³	100 - 120 lb/ft ³
Grava, húmeda	2020 kg/m ³	126 lb/ft ³
Yeso, calcinado	880 - 960 kg/m ³	55 - 60 lb/ft ³
Cal, trozos	850 - 1025 kg/m ³	53 - 64 lb/ft ³
Arena, grava (seca, suelta)	1440 - 1680 kg/m ³	90 - 105 lb/ft ³

FACTORES DE CONVERSION

La tabla de factores de conversión de las siguientes páginas contienen los factores para convertir unidades inglesas a métricas, y métricas a inglesas, así como los factores para manejar las unidades dentro del mismo sistema. Los factores están organizados alfabéticamente dentro de las siguientes categorías:

- Area
- Densidad
- Energía
- Fuerza
- Longitud
- Masa
- Presión
- Velocidad
- Volumen
- Flujo

Para convertir un número de una unidad a otra:

1. Localice la unidad en la que el número está expresado en la columna izquierda de la tabla.
2. Encuentre la unidad deseada en la columna del centro
3. Multiplique el número por el factor de conversión correspondiente en la columna de la derecha.

FACTORES DE CONVERSION^a

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Area		
Acres	Kilómetros cuadrados	4.0469×10^{-3}
Acres	Metros cuadrados	4.0469×10^3
Acres	Millas cuadradas (estatuto)	1.5625×10^{-3}
Acres	Pies cuadrados	4.356×10^4
Acres	Yardas cuadradas	4.84×10^3
Kilómetros cuadrados	Acres	247.1
Kilómetros cuadrados	Metros cuadrados	1.0×10^6
Kilómetros cuadrados	Millas cuadradas	0.386102
Kilómetros cuadrados	Pies cuadrados	1.0764×10^7
Kilómetros cuadrados	Yardas cuadradas	1.196×10^6
Metros cuadrados	Centímetros cuadrados	1.0×10^4
Metros cuadrados	Kilómetros cuadrados	1.0×10^{-6}
Metros cuadrados	Millas cuadradas	3.861×10^{-7}
Metros cuadrados	Milímetros cuadrados	1.0×10^6
Metros cuadrados	Pies cuadrados	10.764
Metros cuadrados	Pulgadas cuadradas	1.55×10^3
Metros cuadrados	Yardas cuadradas	1.196
Millas cuadradas	Acres	640.0
Millas cuadradas	Kilómetros cuadrados	2.590
Millas cuadradas	Pies cuadrados	2.7878×10^7
Millas cuadradas	Metros cuadrados	2.59×10^6
Millas cuadradas	Yardas cuadradas	3.0976×10^6
Pies cuadrados	Acres	2.2957×10^{-5}
Pies cuadrados	Centímetros cuadrados	929.03
Pies cuadrados	Pulgadas cuadradas	144.0
Pies cuadrados	Metros cuadrados	0.092903
Pies cuadrados	Millas cuadradas	3.587×10^{-8}
Pies cuadrados	Yardas cuadradas	0.111111
Pulgadas cuadradas	Metros cuadrados	6.4516×10^{-4}
Pulgadas cuadradas	Milímetros cuadrados	645.16
Pulgadas cuadradas	Pies cuadrados	6.9444×10^{-3}

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Yardas cuadradas	Acres	2.0661×10^{-4}
Yardas cuadradas	Centímetros cuadrados	8.3613×10^3
Yardas cuadradas	Metros cuadrados	0.83613
Yardas cuadradas	Millas cuadradas	3.2283×10^{-7}
Yardas cuadradas	Pies cuadrados	9.0
Yardas cuadradas	Pulgadas cuadradas	1.296×10^3
Densidad		
Dinas/centímetro cúbico	Gramos/centímetro cúbico	1.0197×10^{-3}
Gramos/centímetro cúbico	Dinas/centímetro cúbico	980.665
Gramos/centímetro cúbico	Granos/mililitro	15.433
Gramos/centímetro cúbico	Gramos/mililitro	1.0
Gramos/centímetro cúbico	Libras/pie cúbico	62.428
Gramos/centímetro cúbico	Libras/pulgada cúbica	0.036127
Gramos/centímetro cúbico	Libras/gal (Brit.)	10.022
Gramos/centímetro cúbico	Libras/gal (EU, secos)	9.7111
Gramos/centímetro cúbico	Libras/gal (EU, líquidos)	8.3454
Gramos/litro	Libras/gal (EU)	8.345×10^{-3}
Gramos/metro cúbico	Granos/pie cúbico	0.4370
Granos/pie cúbico	Gramos/metro cúbico	2.28835
Kilogramos/metro cúbico	Gramos/centímetro cúbico	0.001
Kilogramos/metro cúbico	Libras/pie cúbico	0.0624
Kilogramos/metro cúbico	Libras/pulgada cúbica	3.613×10^{-5}
Libras/pie cúbico	Gramos/centímetro cúbico	0.016018
Libras/pie cúbico	kg/metro cúbico	16.018
Libras/pulgada cúbica	Gramos/centímetro cúbico	27.68
Libras/pulgada cúbica	Gramos/litro	27.681
Libras/pulgada cúbica	kg/metro cúbico	2.768×10^4
Libras/gal (EU, líq.)	Gramos/centímetro cúbico	0.1198
Libras/gal (EU, líq.)	Libras/Pie cúbico	7.4805
Energía		
Btu	Caloría-gramo (IST.)	251.83
Btu	Ergs	1.05435×10^{10}
Btu	Hp-horas	3.9275×10^{-4}

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Btu	Joules (Int.)	1054.2
Btu	kg-metros	107.51
Btu	kW-horas (Int.)	2.9283×10^{-4}
Btu	Libras-pie	777.65
Btu/hr	Caballo de fuerza (caldera)	2.9856×10^{-5}
Btu/hr	Caballo de fuerza (eléctrico)	3.926×10^{-4}
Btu/hr	Caballo de fuerza (mecánico)	3.9275×10^{-4}
Btu/hr	Caballo de fuerza (métrico)	3.982×10^{-4}
Btu/hr	Cal. kg/hr	0.252
Btu/hr	Ergs/seg	2.929×10^6
Btu/hr	Kilowatts	2.929×10^{-4}
Btu/hr	Libras-pie/hr	777.65
Btu/lb	Hp-hr/lb	3.9275×10^{-4}
Btu/lb	Joules/gramo	2.3244
Btu/lb	Libras-pie/lb	777.65
Caballo de fuerza (caldera)	Btu (promedio)/hr	3.3446×10^4
Caballo de fuerza (eléctrico)	Btu (promedio)/hr	2.5435×10^3
Caballo de fuerza (mecánico)	Btu (promedio)/hr	2.5425×10^3
Caballo de fuerza (eléctrico)	Caballo de fuerza (caldera)	0.07605
Caballo de fuerza (mecánico)	Caballo de fuerza (caldera)	0.07602
Caballo de fuerza (caldera)	Caballo de fuerza (eléctrico)	13.15
Caballo de fuerza (mecánico)	Caballo de fuerza (eléctrico)	0.9996
Caballo de fuerza (caldera)	Caballo de fuerza (mecánico)	13.155
Caballo de fuerza (caldera)	Caballo de fuerza (métrico)	13.337
Caballo de fuerza (eléctrico)	Caballo de fuerza (métrico)	1.0143
Caballo de fuerza (mecánico)	Caballo de fuerza (métrico)	1.0139
Caballo de fuerza (eléctrico)	Cal. kg/hr	641.87
Caballo de fuerza (caldera)	Ergs/seg	9.8095×10^{10}
Caballo de fuerza (eléctrico)	Ergs/seg	7.46×10^9
Caballo de fuerza (mecánico)	Ergs/seg	7.457×10^9
Caballo de fuerza (caldera)	Joules/seg	9.8095×10^3
Caballo de fuerza (eléctrico)	Joules/seg	746.0
Caballo de fuerza (mecánico)	Joules/seg	745.70

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Caballo de fuerza (caldera)	Kilowatts	9.8095
Caballo de fuerza (eléctrico)	Kilowatts	0.746
Caballo de fuerza (mecánico)	Kilowatts (Int.)	0.74558
Caballo de fuerza (mecánico)	Libras-pie/hr	1.980×10^6
Caballo de fuerza (caldera)	Libras-pie/min	4.341×10^5
Caballo de fuerza (eléctrico)	Libras-pie/min	3.3013×10^4
Caballo de fuerza (métrico)	Btu (promedio)/hr	2.5077×10^3
Caballo de fuerza (métrico)	Caballo de fuerza (caldera)	0.07498
Caballo de fuerza (métrico)	Caballo de fuerza (eléctrico)	0.9859
Caballo de fuerza (métrico)	Caballo de fuerza (mecánico)	0.98632
Caballo de fuerza (métrico)	Ergs/seg	7.355×10^9
Caballo de fuerza (métrico)	kg-metros/seg	75.0
Caballo de fuerza (métrico)	Kilowatts	0.7355
Caballo de fuerza (métrico)	Libras-pie/min	3.255×10^4
Caballo de fuerza-horas	Btu (promedio)	2.5425×10^3
Caballo de fuerza-horas	Joules	2.6845×10^6
Caballo de fuerza-horas	kg-metros	2.73745×10^5
Caballo de fuerza-horas	kW-horas	0.7457
Caballo de fuerza-horas	Libras-pie	1.98×10^6
Caloría, kg (promedio)	Btu (IST.)	3.9714
Caloría, kg (promedio)	Ergs	4.190×10^{10}
Caloría, kg (promedio)	Hp-horas	1.561×10^{-3}
Caloría, kg (promedio)	Joules	4.190×10^3
Caloría, kg (promedio)	kg-metros	427.26
Caloría, kg (promedio)	kW-horas (Int.)	1.1637×10^{-3}
Caloría, kg (promedio)	Libras-pie	3.0904×10^3
Ergs	Btu	9.4845×10^{-11}
Ergs	Joules (Int.)	9.99835×10^{-8}
Ergs	kg-metros	1.0197×10^{-8}
Ergs	kW-horas	2.7778×10^{-14}
Ergs	Libras-pie	7.3756×10^{-8}
Ergs	Poundal-pie	2.373×10^{-6}
Joules (Int.)	Btu (IST.)	9.4799×10^{-4}

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Joules (Int.)	Ergs	1.0002×10^7
Joules (Int.)	kW-horas	2.778×10^{-7}
Joules (Int.)	Libras-pie	0.73768
Joules (Int.)	Poundales-pie	12.734
Joules (Int.)/seg	Btu (promedio)/min	0.05683
Joules (Int.)/seg	Caballo de fuerza	1.341×10^{-3}
Joules (Int.)/seg	Cal. kg/min	0.01434
Kilogramo-metros	Btu (promedio)	9.2878×10^{-3}
Kilogramo-metros	Cal. kg (promedio)	2.3405×10^{-3}
Kilogramo-metros	Ergs	9.80665×10^7
Kilogramo-metros	Hp-horas	3.653×10^{-6}
Kilogramo-metros	Joules (Int.)	9.805
Kilogramo-metros	kW-horas	2.724×10^{-6}
Kilogramo-metros	Libras-pie	7.233
Kilogramo-metros	Poundales-pie	232.715
Kilogramo-metros/seg	Watts	9.80665
Kilowatt-horas (Int.)	Btu (promedio)	3.41×10^3
Kilowatt-horas (Int.)	Hp-horas	1.341
Kilowatt-horas (Int.)	Joules (Int.)	3.6×10^6
Kilowatt-horas (Int.)	kg-metros	3.6716×10^5
Kilowatt-horas (Int.)	Libras-pie	2.6557×10^6
Kilowatts (Int.)	Btu (IST.)/hr	3.413×10^3
Kilowatts (Int.)	Caballo de fuerza (caldera)	0.10196
Kilowatts (Int.)	Caballo de fuerza (eléctrico)	1.3407
Kilowatts (Int.)	Caballo de fuerza (mecánico)	1.341
Kilowatts (Int.)	Caballo de fuerza (métrico)	1.3599
Kilowatts (Int.)	Cal. kg (IST.)/hr	860.0
Kilowatts (Int.)	Ergs/seg	1.0002×10^{10}
Kilowatts (Int.)	Joules (Int.)/hr	3.6×10^6
Kilowatts (Int.)	kg-metros/hr	3.6716×10^5
Kilowatts (Int.)	Libras-pie/min	4.4261×10^4
Kilowatts (Int.)	Poundales-pie/min	1.424×10^6
Newton-metros	Gramo-cm	1.01972×10^4

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Newton-metros	kg-metros	0.101972
Newton-metros	Libra-pies	0.73756
Libras-pie	Btu (IST.)	1.2851×10^{-3}
Libras-pie	Cal. kg (IST.)	3.2384×10^{-4}
Libras-pie	Ergs	1.3558×10^7
Libras-pie	Hp-horas	5.0505×10^{-7}
Libras-pie	Joules	1.3558
Libras-pie	kg-metros	0.138255
Libras-pie	kW-horas (Int.)	3.76554×10^{-7}
Libras-pie	Newton-metros	1.3558
Libras-pie	Poundales-pie	32.174
Libras-pie/hr	Btu/min	2.1432×10^{-5}
Libras-pie/hr	Caballo de fuerza (mecánico)	5.0505×10^{-7}
Libras-pie/hr	Caballo de fuerza (métrico)	5.121×10^{-7}
Libras-pie/hr	Ergs/min	2.2597×10^5
Libras-pie/hr	Kilowatts	3.766×10^{-7}
Fuerza		
Dinas	Libras	2.248×10^{-6}
Dinas	Newtons	1.0×10^{-5}
Dinas	Poundales	7.233×10^{-5}
Libras (avdp.)	Dinas	4.448×10^5
Libras (avdp.)	Newtons	4.448
Libras (avdp.)	Poundales	32.174
Newtons	Dinas	1.0×10^{-5}
Newtons	Libras (avdp.)	0.22481
Poundales	Dinas	1.383×10^4
Poundales	Libras (avdp.)	0.03108
Poundales	Newtons	0.1383
Longitud		
Kilómetros	Metros	1000
Kilómetros	Millas (estatuto)	0.62137
Kilómetros	Pies	3.2808×10^3
Kilómetros	Yardas	1.0936×10^3

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Metros	Pies	3.2808
Metros	Pulgadas	39.370
Micrómetros	Centímetros	1.0×10^{-3}
Micrómetros	Metros	1.0×10^{-6}
Micrómetros	Milímetros	0.001
Micrómetros	Nanómetros	1000
Micrómetros	Pies	3.2808×10^{-6}
Micrómetros	Pulgadas	3.9370×10^{-5}
Micrómetros	Unidades Angstrom	1.0×10^4
Milímetros	Centímetros	0.1
Milímetros	Metros	0.001
Milímetros	Micrómetros	1000
Milímetros	Mils	39.37
Milímetros	Pulgadas	0.03937
Milímetros	Unidades Angstrom	1.0×10^7
Millas (estatuto)	Kilómetros	1.6093
Millas (estatuto)	Metros	1.6093×10^3
Millas (estatuto)	Pies	5280
Millas (estatuto)	Yardas	1760
Nanómetros	Centímetros	1.0×10^{-7}
Nanómetros	Micrómetros	0.001
Nanómetros	Milímetros	1.0×10^{-6}
Nanómetros	Pulgadas	3.937×10^{-8}
Nanómetros	Unidades Angstrom	10
Pies	Centímetros	30.48
Pies	Kilómetros	3.048×10^{-4}
Pies	Metros	0.3048
Pies	Millas (estatuto)	1.894×10^{-4}
Pies	Pulgadas	12
Pulgadas	Centímetros	2.540
Pulgadas	Kilómetros	2.54×10^{-5}
Pulgadas	Metros	0.0254
Pulgadas	Pies	0.08333
Yardas	Centímetros	91.44
Yardas	Metros	0.9144

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Masa		
Gramos	Dinas	980.67
Gramos	Granos	15.432
Gramos	Kilogramos	0.001
Gramos	Libras (avdp.)	2.205×10^{-3}
Gramos	Microgramos	1×10^6
Gramos	Toneladas, métricas (megagramos)	1×10^{-6}
Granos	Gramos	0.064799
Granos	Libras (apoth. o troy)	1.7361×10^{-4}
Granos	Libras (avdp.)	1.4286×10^{-4}
Granos	Miligramos	64.799
Granos	Toneladas (métricas)	6.4799×10^{-8}
Kilogramos	Granos	1.5432×10^4
Kilogramos	Libras (apoth. o troy)	2.679
Kilogramos	Libras (avdp.)	2.2046
Kilogramos	Poundals	70.932
Kilogramos	Toneladas (corta)	1.1023×10^{-3}
Kilogramos	Toneladas (larga)	9.842×10^{-4}
Kilogramos	Toneladas (métrica)	0.001
Libras (avdp.)	Gramos	453.59
Libras (avdp.)	Granos	7000
Libras (avdp.)	Libras (apoth. o troy)	1.2153
Libras (avdp.)	Onzas (apoth. o troy)	14.583
Libras (avdp.)	Onzas (avdp.)	16
Libras (avdp.)	Poundales	32.174
Libras (avdp.)	Toneladas (corta)	5.0×10^{-4}
Libras (avdp.)	Toneladas (corta)	5.0×10^{-4}
Libras (avdp.)	Toneladas (larga)	4.4643×10^{-4}
Libras (avdp.)	Toneladas (métrica)	4.5359×10^{-4}
Megagramos	Toneladas (métrica)	1.0
Miligramos	Gramos	1.0×10^{-3}

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Miligramos	Granos	0.01543
Miligramos	Libras (apoth. o troy)	2.679×10^{-6}
Miligramos	Libras (avdp.)	2.2046×10^{-6}
Miligramos	Onzas (apoth. o troy)	3.215×10^{-5}
Miligramos	Onzas (avdp.)	3.527×10^{-5}
Onzas (apoth. o troy)	Gramos	31.103
Onzas (apoth. o troy)	Granos	480
Onzas (avdp.)	Gramos	28.350
Onzas (avdp.)	Granos	437.5
Onzas (avdp.)	Libras (apoth. o troy)	0.075955
Onzas (avdp.)	Libras (avdp.)	0.0625
Onzas (avdp.)	Onzas (apoth. o troy)	0.9115
Onzas (apoth. o troy)	Onzas (avdp.)	1.097
Toneladas (corta)	Kilogramos	907.18
Toneladas (corta)	Libras (apoth. o troy)	2.4301×10^3
Toneladas (corta)	Libras (avdp.)	2000
Toneladas (corta)	Toneladas (larga)	0.8929
Toneladas (corta)	Toneladas (métrica)	0.9072
Toneladas (larga)	Kilogramos	1.016×10^3
Toneladas (larga)	Libras (avdp.)	2.240×10^3
Toneladas (larga)	Toneladas (corta)	1.12
Toneladas (larga)	Toneladas (métrica)	1.016
Toneladas (métrica)	Gramos	1.0×10^6
Toneladas (métrica)	Libras (apoth. o troy)	2.6792×10^3
Toneladas (métrica)	Libras (avdp.)	2.2046×10^3
Toneladas (métrica)	Megagramos	1.0
Toneladas (métrica)	Toneladas (corta)	1.1023
Toneladas (métrica)	Toneladas (larga)	0.9842

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Presión		
Atmósferas	cm de H ₂ O (4°C)	1.033 x 10 ³
Atmósferas	Pie de H ₂ O (39.2°F)	33.8995
Atmósferas	Pulgada de Hg (32°F)	29.9213
Atmósferas	kg/Centímetros cuadrados	1.033
Atmósferas	Libras/ pulgada cuadrada	14.696
Atmósferas	mm de Hg (0°C)	760
Kilogramos/Centímetros cuadrados	Atmósferas	0.96784
Kilogramos/Centímetros cuadrados	cm de Hg (0°C)	73.556
Kilogramos/Centímetros cuadrados	Pie de H ₂ O (39.2°F)	32.809
Kilogramos/Centímetros cuadrados	Pulgada de Hg (32°F)	28.959
Kilogramos/Centímetros cuadrados	Libras/pulgada cuadrada	14.223
Libras/pulgada cuadrada	Atmósferas	0.06805
Libras/pulgada cuadrada	cm de H ₂ O (4°C)	70.309
Libras/pulgada cuadrada	cm de Hg (0°C)	5.1715
Libras/pulgada cuadrada	Pulgadas de H ₂ O (39.2°F)	27.681
Libras/pulgada cuadrada	Pulgadas de Hg (32°F)	2.036
Libras/pulgada cuadrada	kg/Centímetros cuadrados	0.07031
Libras/pulgada cuadrada	milímetros de Hg (0°C)	51.715
Milímetros de Hg (0°C)	Atmósferas	1.3158 x 10 ⁻³
Milímetros de Hg (0°C)	Gramos/Centímetros cuadrados	1.3595
Milímetros de Hg (0°C)	Libras/pulgada cuadrada	0.019337
Pulgadas de H ₂ O (4°C)	Atmósferas	2.458 x 10 ⁻³
Pulgadas de Hg (60°F)	Atmósferas	0.03333
Pulgadas de Hg (60°F)	Gramos/Centímetros cuadrados	34.434
Pulgadas de H ₂ O (4°C)	In. de Hg (32°F)	0.07355
Pulgadas de H ₂ O (4°C)	kg/metro cuadrado	25.399
Pulgadas de H ₂ O (4°C)	Libras/Pies cuadrados	5.2022
Pulgadas de Hg (60°F)	Libras/Pies cuadrados	70.527
Pulgadas de H ₂ O (4°C)	Libras/pulgada cuadrada	0.036126
Pulgadas de Hg (60°F)	mm de Hg (60°F)	25.4

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Velocidad		
Centímetros/seg	Kilómetros/hr	0.036
Centímetros/seg	Metros/min	0.6
Centímetros/seg	Millas/hr	0.02237
Centímetros/seg	Pies/min	1.9685
Centímetros/seg	Pies/seg	0.0328
Kilómetros/hr	cm/seg	27.778
Kilómetros/hr	Metros/seg	0.27778
Kilómetros/hr	Millas (estatuto)/hr	0.62137
Kilómetros/hr	Pies/hr	3.2808×10^3
Kilómetros/hr	Pies/min	54.681
Metros/min	cm/seg	1.6667
Metros/min	Kilómetros/hr	0.06
Metros/min	Pies/min	3.2808
Metros/min	Pies/seg	0.05468
Millas/hr	cm/seg	44.704
Millas/hr	Kilómetros/hr	1.6093
Millas/hr	Metros/min	26.822
Millas/hr	Pies/hr	5280
Millas/hr	Pies/min	88
Millas/hr	Pies/seg	1.4667
Pies/minuto	cm/seg	0.508
Pies/minuto	Kilómetros/hr	0.01829
Pies/minuto	Metros/min	0.3048
Pies/minuto	Metros/seg	5.08×10^{-3}
Pies/minuto	Millas/hr	0.01136
Pies/seg	cm/seg	30.48
Pies/seg	Kilómetros/hr	1.0973
Pies/seg	Metros/min	18.288
Pies/seg	Millas/hr	0.6818

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Volumen		
Barriles (EU, líq.)	Galones (EU, líq.)	31.5
Barriles (EU, líq.)	Litros	119.24
Barriles (EU, líq.)	Métro cúbico	0.1192
Barriles (EU, líq.)	Pie cúbico	4.2109
Barriles (EU, líq.)	Pulgada cúbica	7.2765×10^3
Barriles (petróleo, EU)	Galones (EU)	42
Barriles (petróleo, EU)	Litros	158.98
Barriles (petróleo, EU)	Pie cúbico	5.6146
Centímetros cúbicos	Yardas cúbicas	1.308×10^{-6}
Centímetros cúbicos	Galones (EU, líq.)	2.642×10^{-4}
Centímetros cúbicos	Métro cúbico	1.0×10^{-6}
Centímetros cúbicos	Pie cúbico	3.5315×10^{-5}
Centímetros cúbicos	Pulgada cúbica	0.06102
Centímetros cúbicos	Cuartos (EU, líq.)	1.0567×10^{-3}
Galones (EU, líq.)	Barriles (EU, líq.)	0.03175
Galones (EU, líq.)	Barriles (petróleo, EU)	0.02381
Galones (EU, líq.)	Bushels (EU)	0.10742
Galones (EU, líq.)	Centímetros cúbicos	3.7854×10^3
Galones (EU, líq.)	Yardas cúbicas	4.951×10^{-3}
Galones (EU, líq.)	Cuartos (EU, líq.)	4.0
Galones (EU, líq.)	Galones (vino)	1.0
Galones (EU, líq.)	Litros	3.7854
Galones (EU, líq.)	Métro cúbico	3.7854×10^{-3}
Galones (EU, líq.)	Onzas (EU, fluídas)	128.0
Galones (EU, líq.)	Pie cúbico	0.13368
Galones (EU, líq.)	Pintas (EU, líq.)	8.0
Galones (EU, líq.)	Pulgada cúbica	231
Litros	Centímetros cúbicos	1000
Litros	Galones (EU, líq.)	0.2642
Litros	Métro cúbico	0.001

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Litros	Onzas (EU, fluid)	33.814
Litros	Pie cúbico	0.035315
Litros	Pulgada cúbica	61.024
Metros cúbicos	Barriles (EU, líq.)	8.3864
Metros cúbicos	Centímetro cúbico	1.0×10^6
Metros cúbicos	Yardas cúbicas	1.308
Metros cúbicos	Galones (EU, líq.)	264.17
Metros cúbicos	Litros	1000
Metros cúbicos	Pie cúbico	35.315
Metros cúbicos	Pulgada cúbica	6.1024×10^4
Pies cúbicos	Centímetros cúbicos	2.8317×10^4
Pies cúbicos	Galones (EU, líq.)	7.4805
Pies cúbicos	Litros	28.317
Pies cúbicos	Métro cúbico	0.028317
Pulgadas cúbicas	Centímetro cúbico	16.387
Pulgadas cúbicas	Yardas cúbicas	2.1433×10^{-5}
Pulgadas cúbicas	Cuartos (EU, líq.)	0.01732
Pulgadas cúbicas	Galones (EU, líq.)	4.329×10^{-3}
Pulgadas cúbicas	Litros	0.01639
Pulgadas cúbicas	Métro cúbico	1.6387×10^{-5}
Pulgadas cúbicas	Pie cúbico	5.787×10^{-4}
Yardas cúbicas	Bushels (Brit.)	21.022
Yardas cúbicas	Bushels (EU)	21.696
Yardas cúbicas	Centímetro cúbico	7.6455×10^5
Yardas cúbicas	Cuartos	672.71
Yardas cúbicas	Cuartos	694.28
Yardas cúbicas	Cuartos	807.90
Yardas cúbicas	Galones	168.18
Yardas cúbicas	Galones	173.57
Yardas cúbicas	Galones	201.97
Yardas cúbicas	Litros	764.55
Yardas cúbicas	Métro cúbico	0.76455
Yardas cúbicas	Pie cúbico	27
Yardas cúbicas	Pulgada cúbica	4.6656×10^4

FACTORES DE CONVERSION (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Flujo		
Galones (U. S.)/hr	Litros/hr	3.7854
Galones (U. S.)/hr	Metros cúbicos/min	6.309×10^{-5}
Galones (U. S.)/hr	Pie cúbico/hr	0.13368
Galones (U. S.)/hr	Yardas cúbicas/min	8.2519×10^{-5}
Litros/min	Galón (U. S., liq.)/min	0.2642
Litros/min	Pie cúbico/min	0.0353
Metros cúbicos/min	Galón (U. S.)/min	264.17
Metros cúbicos/min	Litros/min	999.97
Pie cúbico/min	Centímetro cúbico/seg	471.95
Pie cúbico/min	Galón (U. S.)/min	7.4805
Pie cúbico/min	Litros/sec	0.47193
Pie cúbico/min	Pie cúbico /hr	60. 0

^a En donde ha sido conveniente, los factores de conversión de esta tabla han sido redondeados de seis a cuatro cifras significativas para facilitar su uso. La precisión de estos números se considera adecuada para su aplicación en datos de emisiones. Si se requiere una cifra más precisa, será necesario consultar los factores exactos.

**FACTORES DE CONVERSION MAS COMUNES PARA LAS MEDICIONES
DE LA CONTAMINACION DEL AIRE**

PARTICULAS SUSPENDIDAS

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Gramos/metro cúbico	Gramos/pie cúbico	0.02832
	Libras/1000 pie cúbico	0.06243
	Microgramos/metro cúbico	1.0×10^6
	Microgramos/pie cúbico	28.317×10^3
	Miligramos/metro cúbico	1000.0
Gramos/pie cúbico	Gramos/metro cúbico	35.314
	Libras/1000 pie cúbico	2.2046
	Microgramos/metro cúbico	35.314×10^6
	Microgramos/pie cúbico	1.0×10^6
	Miligramos/metro cúbico	35.3145×10^3
Libras/1000 pie cúbico	Gramos/metro cúbico	16.018
	Gramos/pie cúbico	0.35314
	Microgramos/metro cúbico	16.018×10^6
	Microgramos/pie cúbico	353.14×10^3
	Miligramos/metro cúbico	16.018×10^3
Microgramos/metro cúbico	Gramos/metro cúbico	1.0×10^{-6}
	Gramos/pie cúbico	28.317×10^{-9}
	Libras/1000 pie cúbico	62.43×10^{-9}
	Microgramos/pie cúbico	0.02832
	Miligramos/metro cúbico	0.001
Microgramos/pie cúbico	Gramos/metro cúbico	35.314×10^{-6}
	Gramos/pie cúbico	1.0×10^{-6}
	Libras/1000 pie cúbico	2.2046×10^{-6}
	Microgramos/metro cúbico	35.314
	Miligramos/metro cúbico	35.314×10^{-3}
Miligramos/metro cúbico	Gramos/metro cúbico	0.001
	Gramos/pie cúbico	283.2×10^{-6}
	Libras/1000 pie cúbico	62.43×10^{-6}
	Microgramos/metro cúbico	1000.0
	Microgramos/pie cúbico	28.32

**FACTORES DE CONVERSION MAS COMUNES PARA LAS MEDICIONES
DE LA CONTAMINACION DEL AIRE (Continuación)**

PRESION DE MUESTREO

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Milímetros de mercurio (0°C)	Pulgadas de agua (60°F)	0.5358
Pulgadas de agua (60°F)	Pulgadas de mercurio (0°C)	73.48 x 10 ⁻³
Pulgadas de mercurio (0°C)	Pulgadas de agua (60°F)	13.609
	Milímetros de mercurio (0°C)	1.8663

GASES ATMOSFERICOS

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Libras/pie cúbico	Miligramos/metro cúbico	16.018 x 10 ⁶
	Microgramos/metro cúbico	16.018x 10 ⁹
	Microgramos/litro	16.018x 10 ⁶
	ppm por volumen (20°C)	385.1 x 10 ⁶ /M
	ppm por peso	133.7 x 10 ³
Microgramos/litro	Miligramos/metro cúbico	1.0
	Microgramos/metro cúbico	1000.0
	ppm por volumen (20°C)	24.04/M
	ppm por peso	0.8347
	Libras/pie cúbico	62.43 x 10 ⁻⁹
Microgramos/metro cúbico	Miligramos/metro cúbico	0.001
	Microgramos/litro	0.001
	ppm por volumen (20°C)	0.02404/M
	ppm por peso	834.7 x 10 ⁻⁶
	Libras/pie cúbico	62.43 x 10 ⁻¹²
Miligramos/metro cúbico	Microgramos/metro cúbico	1000.0
	Microgramos/litro	1.0
	ppm por volumen (20°C)	24.04/M
	ppm por peso	0.8347
	Libras/pie cúbico	62.43 x 10 ⁻⁹
ppm por peso	Miligramos/metro cúbico	1.198
	Microgramos/metro cúbico	1.198 x 10 ⁻³
	Microgramos/litro	1.198
	ppm por volumen (20°C)	28.8/M
	Libras/pie cúbico	7.48 x 10 ⁻⁶

GASES ATMOSFERICOS (Continuación)

Para Convertir de	A	Multiplicar por
ppm por volumen (20°C)	Miligramos/metro cúbico	M/24.04
	Microgramos/metro cúbico	M/0.02404
	Microgramos/litro	M/24.04
	ppm por peso	M/28.8
	Libras/pie cúbico	M/385.1 x 10 ⁶

M = Peso molecular del gas.

VELOCIDAD

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Kilómetros/hr	Metros/seg	0.2778
	Millas/hr	0.6214
	Pies/seg	0.9113
Metros/seg	Kilómetros/hr	3.6
	Millas/hr	2.237
	Pies/seg	3.281
Millas/hr	Kilómetros/hr	1.6093
	Metros/seg	0.4470
	Pies/seg	1.4667
Pies/seg	Kilómetros/hr	1.09728
	Metros/seg	0.3048
	Millas/hr	0.6818

PRESION ATMOSFERICA

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Atmósferas	Milibares	1013.2
	Milímetros de mercurio	760.0
	Pulgadas de mercurio	29.92
Milibares	Atmósferas	0.00987
	Milímetros de mercurio	0.75
	Pulgadas de mercurio	0.30
Milímetros de mercurio	Atmósferas	1.316×10^{-3}
	Milibares	1.333
	Pulgadas de mercurio	39.37×10^{-3}
Pulgadas de mercurio	Atmósferas	0.03333
	Milibares	33.35
	Milímetros de mercurio	25.4005

EMISIONES DE VOLUMEN

Para Convertir de	A	Multiplicar por
Metro cúbico/min	Pie cúbico/min	35.314
Pie cúbico/min	Metro cúbico/min	0.0283

FACTORES DE CONVERSIÓN DE CALDERA

1 Megawatt	=	10.5 x 10 ⁶ Btu/hr (8 to 14 x 10 ⁶ Btu/hr)	NOTAS: En las relaciones,
1 Megawatt	=	8 x 10 ³ lb vapor/hr (6 to 11 x 10 ³ lb vapor/hr)	Megawatt es la producción eléctrica neta de una planta termoeléctrica de vapor.
1 BHP	=	34.5 lb vapor/hr	BHP es un caballo de fuerza de caldera.
1 BHP	=	45 x 10 ³ Btu/hr (40 to 50 x 10 ³ Btu/hr)	lb vapor/hr es la tasa de producción de vapor de la caldera.
1 lb vapor /hr	=	1.4 x 10 ³ Btu/hr (1.2 to 1.7 x 10 ³ Btu/hr)	Btu/hr es la tasa de entrada de calor a la caldera (basada en el valor calorífico neto o alto del combustible quemado).

Para operaciones de caldera (generalmente más antiguas y/o pequeñas) menos eficientes, usar los mayores valores expresados. Para operaciones más eficientes (generalmente más nuevas y/o grandes), usar el menor valor).

Volumen	In ³	ml	litros	onzas (EU fl.)	galones (EU)	barriles (EU)	pie cúbico
Pulgadas cuadradas		16.3868	0.0163868	0.5541	4.3290x10 ⁻³	1.37429x10 ⁻⁴	5.78704x10 ⁻⁴
Mililitros	0.061024		0.001	0.03381	2.6418x10 ⁻⁴	8.387x10 ⁻⁶	3.5316x10 ⁻⁵
Litros	61.024	1000		33.8147	0.26418	8.387x10 ⁻³	0.035316
Onzas (EU fl.)	1.80469	29.5729	0.029573		7.8125x10 ⁻³	2.48x10 ⁻⁴	1.0443x10 ⁻³
Galones (EU) ^a	231	3785.3	3.7853	128		0.031746	0.13368
Barriles (EU)	7276.5	1.1924x10 ⁵	119.2369	4032.0	31.5		4.2109
Pies cúbicos	1728	2.8316x10 ⁴	28.316	957.568	7.481	0.23743	

^a Galón EU de agua a 16.7°C (62°F) pesa 3.780 kg ó 8.337 libras (avoir.)

Masa	gramos	kilogramos	onzas (avoir.)	libras (avoir.)	granos	toneladas (EU)	miligramos
Gramos		0.001	3.527×10^{-2}	2.205×10^{-3}	15.432	1.102×10^{-6}	1000
Kilogramos	1000		35.274	2.2046	15432	1.102×10^{-3}	1×10^6
Onzas (avoir.)	28.350	0.028350		0.0625	437.5	3.125×10^{-5}	2.8350×10^4
Libras (avoir.) ^a	453.59	0.45359	16.0		7000	5.0×10^{-4}	4.5359×10^5
Granos	0.06480	6.480×10^{-5}	2.286×10^{-3}	1.429×10^{-4}		7.142×10^{-8}	64.799
Toneladas (EU)	9.072×10^5	907.19	3.200×10^4	2000	1.4×10^7		9.0718×10^8
Miligramos	0.001	1×10^{-6}	3.527×10^{-5}	2.205×10^{-6}	0.015432	1.102×10^{-9}	

^a Masa de 27.692 pulgadas cúbicas de agua pesadas en aire a 4.0°C, y presión de 760 mm de mercurio.

Trabajo y Energía	g cal.	kg cal.	ergs	joules	Btu	ft lb	kg metros	L-Atm	HP horas	ft poundales	kWh	Wh
Gramo caloría (promedio)		0.001	4.186×10^7	4.186	3.9680×10^{-3}	3.0874	0.42685	0.041311	1.5593×10^{-6}	99.334	1.1628×10^{-6}	1.1628×10^{-3}
Kilogramo caloría	1000		4.186×10^{10}	4186	3.9680	3087.4	426.85	41.311	1.5593×10^{-3}	99334	1.1628×10^{-3}	1.1628
Ergs	2.3889×10^{-8}	2.3889×10^{-11}		1×10^{-7}	9.4805×10^{-11}	7.3756×10^{-8}	1.0197×10^{-8}	9.8689×10^{-10}	3.7251×10^{-14}	2.3730×10^{-6}	2.7778×10^{-14}	2.7778×10^{-11}
Joules	0.23889	2.3889×10^{-4}	1×10^7		9.4805×10^{-4}	0.73756	0.10197	9.8689×10^{-3}	3.7251×10^{-7}	23.730	2.7778×10^{-7}	2.7778×10^{-4}
Btu (promedio)	251.98	0.25198	1.0548×10^{10}	1054.8		777.98	107.56	10.409	3.9292×10^{-4}	2.5030×10^4	2.930×10^{-4}	0.2930
Libras-pie	0.32389	3.2389×10^{-4}	1.35582×10^7	1.3558	1.2854×10^{-3}		0.13825	0.013381	5.0505×10^{-7}	32.174	3.7662×10^{-7}	3.7662×10^{-4}
Kilogramo metros	2.3427	2.3427×10^{-3}	9.8066×10^7	9.8066	9.2967×10^{-3}	7.2330		0.096781	3.6529×10^{-6}	232.71	2.7241×10^{-6}	2.7241×10^{-3}
Litro Atmósferas (normal)	24.206	2.4206×10^{-2}	1.0133×10^9	101.328	0.09606	74.735	10.333		3.7745×10^{-5}	2404.5	2.8164×10^{-5}	2.8164×10^{-2}
Caballo de fuerza horas	6.4130×10^5	641.30	2.6845×10^{13}	2.6845×10^6	2454.0	1.9800×10^6	2.7374×10^5	26494		6.3705×10^7	0.7457	745.7
Poundales-pie	0.010067	10.067×10^{-6}	4.21402×10^5	0.04214	3.9952×10^{-5}	0.031081	4.2972×10^{-3}	4.1558×10^{-4}	1.5697×10^{-8}		1.17055×10^{-8}	1.17055×10^{-5}
Kilowatt horas	8.6001×10^5	860.01	3.6000×10^{13}	3.6000×10^6	3413.0	2.6552×10^6	3.6709×10^5	3.5529×10^6	1.3440	8.5430×10^7		1000
Watt horas	860.01	0.86001	3.6000×10^{10}	3600	3.4130	2655.3	367.09	3.5529×10^3	1.3410×10^{-3}	8.5430×10^1	0.001	

Potencia	watts	kW	ft lb/seg	erg/seg	Btu/min	g cm/seg	kg cal/min	HP	lumens	joules/seg	Btu/hr
Watts		0.001	0.73756	1×10^7	0.056884	1.0197×10^4	0.01433	1.341×10^{-3}	668	1	3.41304
Kilowatts	1000		737.56	1×10^{10}	56.884	1.0197×10^7	14.3334	1.3410	6.68×10^5	1000	3413.04
Libras-pie por segundo	1.35582	1.3558×10^{-3}		1.3558×10^7	0.077124	1.3826×10^4	0.019433	1.8182×10^{-3}	906.28	1.3558	4.6274
Ergs por segundo	1×10^{-7}	1×10^{-10}	7.3756×10^{-8}		5.688×10^{-9}	1.0197×10^{-3}	1.4333×10^{-9}	1.3410×10^{-10}	6.6845×10^{-5}	1×10^{-7}	3.4130×10^{-7}
Btu ^a por minuto	17.580	0.017580	12.9600	1.7580×10^8		1.7926×10^5	0.2520	0.023575	11751	17.580	60
Gramo centímetros por segundo	9.8067×10^{-5}	9.8067×10^{-8}	7.2330×10^{-5}	980.665	5.5783×10^{-6}		1.4056×10^{-6}	1.3151×10^{-7}	0.065552	9.8067×10^{-5}	3.3470×10^{-4}
Kilogramo caloría por minuto	69.767	0.069767	51.457	6.9770×10^8	3.9685	7.1146×10^5		0.093557	46636	69.769	238.11
Caballo de fuerza (EU)	745.7	0.7457	550	7.457×10^9	42.4176	7.6042×10^6	10.688		498129	745.7	2545.1
Lumens	1.496×10^{-3}	1.496×10^{-6}	1.0034×10^{-3}	1.496×10^4	8.5096×10^{-5}	15.254	2.1437×10^{-5}	2.0061×10^{-6}		1.496×10^{-3}	5.1069×10^{-3}
Joules por segundo	1	0.001	0.73756	1×10^7	0.056884	1.0197×10^4	0.01433	1.341×10^{-3}	668		3.41304
Btu ^a por hora	0.29299	2.9299×10^{-4}	0.21610	2.9299×10^6	0.01667	2.9878×10^3	4.1997×10^{-3}	3.9291×10^{-4}	195.80	0.29299	

^a Unidades térmicas británicas (promedio)

FACTORES DE CONVERSION PARA DIVERSAS SUSTANCIAS^a

Tipo de Sustancia	Factores de Conversión
Combustible	
Petróleo	1 bbl = 159 litros (42 gal)
Gas natural	1 therm = 100,000 Btu (aprox.25000 kcal)
Contaminantes Gaseosos	
O ₃	1 ppm, volumen = 1960µg/m ³
NO ₂	1 ppm, volumen = 1880µg/m ³
SO ₂	1 ppm, volumen = 2610µg/m ³
H ₂ S	1 ppm, volumen = 1390 µg/m ³
CO	1 ppm, volumen = 1.14 mg/m ³
HC (como metano)	1 ppm, volumen = 0.654 mg/m ³
Productos Agrícolas	
Maíz	1 bushel = 25.4 kg = 56 lb
Mijo	1 bushel = 25.4 kg = 56 lb
Avenas	1 bushel = 14.5 kg = 32 lb
Cebada	1 bushel = 21.8 kg = 48 lb
Trigo	1 bushel = 27.2 kg = 60 lb
Algodón	1 paca = 226 kg = 500 lb
Productos Minerales	
Ladrillo	1 ladrillo = 2.95 kg = 6.5 lb
Cemento	1 bbl = 170 kg = 375 lb
Cemento	1 yd ³ = 1130 kg = 2500 lb
Concreto	1 yd ³ = 1820 kg = 4000 lb
Fuentes móviles, eficiencia del combustible	
Vehículos automotores	1.0 milla/gal = 0.426 km/litro
Embarcaciones	1.0 gal/milla náutica= 2.05 litros/km
Líquidos Misceláneos	
Cerveza	1 bbl = 31.5 gal
Pintura	1 gal = 4.5 a 6.82 kg = 10 a 15 lb
Barniz	1 gal = 3.18 kg = 7 lb
Whiskey	1 bbl = 190 litros = 50.2 gal
Agua	1 gal = 3.81 kg = 8.3 lb

^a Muchos de los factores de conversión de esta tabla representan valores promedio y aproximaciones, y algunos valores pueden cambiar con la temperatura y presión. Sin embargo, estos valores de conversión deben tener la precisión necesaria para el uso general en campo.

APENDICE B

**INDICE DE LOS EJEMPLOS EN LOS MANUALES DEL
INVENTARIO DE EMISIONES DE MEXICO**

Ejemplo de los Problemas en los Manuales del Programa del Inventario de Emisiones de México

Volumen III – Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones

Sección 3.2	Datos de Muestreo en Fuente
Sección 3.3	Datos del Monitoreo Continuo de Emisiones
Sección 4.2.2	Modelo Multivariado
Sección 5.10	Resultado de Encuestas
Sección 6.1	Factores de Emisión Basados en el Proceso
Sección 6.2	Factores de Emisión Basados en el Censo
Sección 7.0	Balance de Materiales
Sección 8.0	Extrapolación
Apéndice III-A	Modelos de Emisiones (polvos fugitivos, rellenos sanitarios, tanques de almacenamiento, carga de derivados del petróleo, residuos y aguas residuales)

Volumen IV – Desarrollo del Inventario de Fuentes Puntuales

Sección 3.1	Factores de Emisión
Sección 3.2	Datos de Prueba en Fuente
Sección 3.3	Balance de Materiales
Sección 4.1	Análisis de Combustibles
Sección 5.1	Efectividad de Control
Sección 7.3	Estimación del Error

Volumen V – Desarrollo del Inventario de Fuentes de Area

Sección 4.0	Combustión de Fuente Estacionaria
Sección 5.0	Fuentes Móviles que no Circulan por Carretera
Sección 6.0	Uso de Solventes
Sección 7.0	Almacenamiento y transporte de Derivados del Petróleo
Sección 8.0	Fuentes Industriales Ligeras y Comerciales
Sección 9.0	Agricultura
Sección 10.0	Manejo de Residuos
Sección 11.0	Fuentes de Area Misceláneas

Volumen VI – Desarrollo del Inventario de Vehículos Automotores

Sección 3.4.1	Efectos de la Temperatura, Altitud, PVR del Combustible, Combustibles Oxigenados, Programas de Inspección y Mantenimiento y Programas Anti-Alteraciones (PAA)
Sección 3.4.2	Efectos de la Velocidad del Vehículo

670017 5202
Septiembre 25, 1997

John T. Leary
Gerente de Proyecto
Asociación de Gobernadores del Oeste
600 17th Street
Suite 1705, Torre Sur
Denver, CO 80202

Asunto: Entrega del “Cuaderno de Trabajo para la Capacitación Avanzada en la Metodología del Proyecto del Inventario de Emisiones de México”.

Estimado John:

Anexa se encuentra una copia de la versión final del “Cuaderno de Trabajo para la Capacitación Avanzada en la Metodología del Proyecto del Inventario de Emisiones de México”. Este cuaderno contiene diversos ejemplos relacionados con el inventario de emisiones que complementarán y fortalecerán el curso de extensión a nivel universitario que hemos desarrollado, así como otras actividades de capacitación en México. Nosotros anticipamos que este cuaderno de trabajo también será un valioso recurso durante la próxima prueba de la metodología en Mexicali.

En caso de tener cualesquier preguntas con respecto al material anexo, por favor comuníquese conmigo al (916) 857-7451 o con Marty Wolf al (916) 857-7468.

Atentamente

William R. Oliver
Gerente de Proyecto

Anexos

c: Victor Hugo Páramo, INE (cinco copias)
Comité Asesor Binacional
José Ortega, Corporación Radian
Jim Yarbrough, U.S. EPA Región VI
Archivo del Proyecto