



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

“El diseño de un lavador de gases, neutralizador y adaptación de una torre de enfriamiento para el cumplimiento de la NOM-098-SEMARNAT-2002 en la incineración de desechos de la FES Zaragoza.”

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO.

PRESENTAN:

ALVAREZ HERRERA DULCE NATALY

CARRILLO CASTELÁN OSVALDO

ASESOR:

ORTIZ BAUTIZTA DOMINGA



MÉXICO, D.F. A 27 DE NOVIEMBRE DEL 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



AGRADECIMIENTOS

En primera parte agradezco a **Dios** por permitirme llegar a disfrutar este día tan importante y crucial en mi vida, porque no me hizo perder la fe y siempre me hizo recordar que las cosas difíciles y con mayores obstáculos al final se disfrutaban más.

A mis padres, pero principalmente a mi **madre** por ser un gran pilar en mi vida personal y profesional, ya que sin su esfuerzo paciencia y apoyo incondicional, no lo hubiera logrado fue muy difícil el camino pero lo logre gracias a ti.

A mis hermanas Nadia y Melany, por ser parte de mi vida, mis triunfos y mis fracasos que son primordiales en mi formación como persona y profesionista.

A mis tíos Ramiro y Gema, porque durante mucho tiempo también estuvieron a mi lado en todo momento, que me escucharon y me guiaron para llegar a esto.

A mis abuelos Ernestina y Carlos, por todo su afecto incondicional y sus buenos deseos a lo largo de toda mi carrera profesional.

A mi amigo, compañero y novio Osvaldo, porque me hacías recobrar la cordura cuando más lo necesite, tu apoyo fue incondicional ya que tu compartiste conmigo lo sinuoso del camino como estudiante y en mi vida personal, sé que aprendimos muchas cosas juntos.

A mis amigos con los que compartí en diversas ocasiones un aula, Cesar, Yarenzi, Nayeli, Hugo, Carlos Alberto, Beto, Dorian, Charly, Octavio, Antonio, Miguel, Paulina, Gerardo, Kellen y Ricardo, porque aunque somos de generaciones diferentes con ustedes encontré algo más que amigos, mis mejores recuerdos de la universidad fueron a su lado.

A mis profesores, Eduardo Loyo Arnaud, Cresenciano Echavarrieta Albiter y Rafael Gonzalo Coello García, ya que dedicaron parte de su tiempo y esfuerzo, en hacer que esto fuera una realidad y no un sueño.

A la FES Zaragoza y la UNAM por que fue mi segunda casa durante mi estancia como estudiante.

Dulce Nataly Alvarez Herrera



AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por acompañarme todos los días, haberme permitido llegar hasta este punto, haberme dado salud para lograr mis objetivos, darme fuerzas para nunca rendirme, enseñarme la luz al final del camino y orientar mi vida hacia un camino lleno de éxitos.

A mis padres:

Por ser los pilares en mi vida personal y profesional, por su paciencia, sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor infinito.

A mi familia:

Daniel mi hermano mayor y del cual aprendí aciertos y momentos difíciles; mis tíos y primos que aun que se encuentran lejos me brindaron su apoyo.

Dulce:

Gracias por tu infinita paciencia, tu tierna compañía, tu inagotable apoyo, tu amor infinito por compartir los más agradables momentos de mi vida, mis logros y disgustos. Gracias amor.

A mis amigos:

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional, personal y que ahora forman parte de mi vida, Stephy, Cesar, Fare, Kellen, Uriel, Gerardo, Carlos, Hugo, Ricardo, Beto, Oscar, Eirván, por su confianza, su cariño, sus regaños y por ser parte de la aventura más importante de mi vida.

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Sr. Q. Eduardo Loyo Arnaud, asesor de este proyecto, por la orientación y seguimiento de la misma, por todo su apoyo y motivación recibido a lo largo de estos años.

Especial reconocimiento merece el interés que han mostrado por el trabajo y las sugerencias recibidas del M. en D. Presenciano Echevarrieta Albitar, Sr. Q. Rafael Gonzalo Poello García. También agradecer la ayuda recibida por el M. en C. Cesar Saúl Velasco Hernández y la Sr. Q. Dominga Ortiz Bautista por la confianza y ayuda recibida.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mi segunda casa la UNAM que me acogió, me hizo sufrir y valorar el gran esfuerzo que se requiere para ser una persona de bien.

Oswaldo Carrillo Castelan.



JURADO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/ 437/15

ASUNTO: Asignación de Jurado

Alumno (a): Álvarez Herrera Dulce Nataly

PRESENTE

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I.Q. RAFAEL GONZALO COELLO GARCÍA
VOCAL	I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA
SECRETARIO	M. en I. CRESENCIANO ECHAVARRIETA ALBITER
SUPLENTE	I.Q. EDUARDO LOYO ARNAUD
SUPLENTE	M. en C. CESAR SAÚL VELASCO HERNÁNDEZ

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México D.F. a 28 de Septiembre de 2015

JEFA DE CARRERA

I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA
INGENIERÍA QUÍMICA



INDICE

Agradecimientos	(i)
Jurado	(ii)
Índice	(ii)
Resumen	(1)
Introducción	(2)
Problema	(3)
Hipótesis	(3)
Objetivos	(4)
Objetivo general	(4)
Objetivo específico	(4)
Capítulo 1. Generalidades	(5)
1.1 Definición de residuos	(5)
1.2 Clasificación de residuos	(5)
1.2.1 Residuos sólidos urbanos.....	(5)
1.2.2 Residuos de manejo especial	(5)
1.2.3 Residuos peligrosos	(5)
1.3 Alternativas para el manejo de residuos	(5)
1.3.1 Reciclaje	(5)
1.3.2 Confinamiento	(5)
1.3.3 Incineración	(5)
1.4 Incineradores	(6)
1.4.1 Incineradores de cámara múltiple, solera fija o de pisos	(6)
1.4.2 Incinerador de aire controlado	(7)
1.4.3 Incinerador de horno rotativo	(8)
1.4.4. Incinerador de lecho fluidizado	(9)
1.5 Torres de enfriamiento	(10)
1.5.1 Torres de enfriamiento atmosférico	(10)
1.5.2 Torres de enfriamiento de tiro natural.	(10)
1.5.3 Torres de tiro mecánico	(11)
1.5.4 Torres de enfriamiento tiro forzado	(11)
1.5.5 Torres de enfriamiento de tiro inducido	(12)
1.5.6 Torres de enfriamiento tiro inducido de flujo cruzado	(13)
1.5.7 Torres de enfriamiento de tiro inducido a contraflujo cruzado	(14)
1.6 Lavadores de gases	(14)
1.6.1 Lavador tipo spray	(14)
1.6.2 Lavadores tipo Venturi	(15)
1.7 Separadores	(16)
1.7.1 Tabla de desglose de los separadores	(16)
1.7.2 Separadores bifásicos	(16)
1.7.3 Separadores trifásicos	(16)
1.7.4 Separadores horizontales	(16)
1.7.5 Separadores verticales	(17)
1.7.6 Separadores esféricos	(18)
1.7.7 Tabla de ventajas y desventajas de los separadores.....	(20)



INDICE

1.8 NOM-098-SEMARNAT-2002	(20)
1.8.1 Límites de emisiones de gases	(21)
Capítulo 2. Proceso.	(22)
2.1 Diagrama de bloques del proceso.....	(22)
2.2 Descripción del proceso	(23)
2.3 Criterios clave del proceso.....	(24)
Capítulo 3. Ecuaciones.....	(25)
3.1 Ecuaciones para el incinerador.....	(25)
3.1.1 Eficiencia del incinerador.....	(25)
3.1.2 Poder calorífico	(25)
3.1.2.1 Poder calorífico superior	(25)
3.1.2.2 Poder calorífico inferior	(25)
3.2 Ecuaciones del lavador de gases	(26)
3.2.1 Asentamiento.	(26)
3.2.2 Choque o coalescencia.....	(28)
3.2.3 Factores que pueden afectar el lavado y separación	(36)
3.2.3.1 Viscosidad del gas	(36)
3.2.3.2 Temperatura	(36)
3.2.3.3 Velocidad	(36)
3.2.3.4 Presión	(36)
3.2.3.5 Tiempo de retención.....	(36)
3.2.3.6 Relación longitud/diámetro	(36)
3.2.3.7 Absorción con reacción química	(37)
3.2.3.8 Distribuidores y mamparas	(37)
3.3 Ecuaciones de la torre de enfriamiento	(37)
3.3.1 Transferencia de calor	(39)
3.3.2 Determinación de unidades de difusión	(45)
3.3.3 Corrección para la resistencia de la película.....	(47)
3.3.4 Coeficientes de humidificación	(48)
Capítulo 4 Resultados	(52)
4.1 Incinerador.....	(52)
4.2 lavador.....	(52)
4.3 Torre de enfriamiento	(54)
4.4 Concentraciones de los gases para ser liberados al ambiente y formularios de inscripción para la regulación del proceso.....	(54)
Conclusiones.....	(57)
Recomendaciones	(57)
Bibliografías	(59)
Anexos.....	(61)
Anexo 1. NOM-098-SEMARNAT-2002.....	(61)
Anexo 2. NOM-052-SEMARNAT-2005.....	(78)
Anexo 3. Base de datos	(91)
Anexo 4. Tabla de valores de R para el cálculo del lavador	(103)
Anexo 5. Diámetros para boquillas y diámetros comerciales para recipientes	(104)
Anexo 6. Hojas de datos	(105)
Anexo 7. Nomenclatura	(112)
Anexo 8. DFP	(115)



RESUMEN

Dentro de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, en el laboratorio de desarrollo de procesos, se realiza la captación de desechos urbanos, productos reciclables y residuos biológicos-infecciosos de las clínicas de esta institución, los cuales posteriormente son retirados por el sindicato único de limpia de trabajadores del gobierno del Distrito Federal dedicada al confinamiento de residuos, los clasifican de acuerdo a su composición y grado de peligrosidad.

La Universidad posee un incinerador de doble cámara con aire controlado y una torre de enfriamiento de tiro inducido a contra flujo, los cuales fueron diseñados y adquiridos para un uso docente, ya que son de uso experimental con una incidencia para relacionar a los estudiantes con problemas reales.

En el desarrollo de incineración y conformidad de la Norma, se debe controlar todas las emisiones cumpliendo con los requerimientos mínimos de operación y para lograrlo se propone el diseño de un tren de lavado.

El tren de lavado está conformado por un neutralizador de gases horizontal con mamparas y aspersores en la parte superior, que son alimentados con una disolución ($\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}$) proveniente de la torre de enfriamiento, que fungirá como agente enfriador, lavador y neutralizador de los gases contaminantes; así mismo realizara la reducción de las concentraciones y temperatura cumpliendo con lo establecido por la Norma NOM-098-SEMARNAT-2002.



INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento descontrolado de desechos sólidos urbanos, se han intensificado las actividades de incineración, obteniendo la reducción en volumen hasta en un 95% con respecto a la carga inicial, utilizando altas temperaturas dentro de una cámara de combustión.

El resultado de la incineración genera vapor de agua y gases contaminantes, como son: CO, CO₂, HCl, SO₂, SO₃, óxidos de nitrógeno, dioxinas, furanos, arsénico, selenio, cobalto, níquel magnesio, estaño, cadmio, plomo, cobre, zinc y mercurio; gases que tienen propiedades altamente tóxicas y resistencia a la temperatura; Estos son finalmente expulsados a la atmósfera contaminando el aire, ecosistemas terrestres y acuáticos originando un desequilibrio ecológico.

Los gases contaminantes deben ser tratados para aminorar la concentración y reducir la temperatura antes de ser expulsados a la atmósfera, como lo indica la Norma Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002 (ver anexo 1), que reglamenta técnicas para medidas de prevención y reducción de emisiones. El equipo de tratamiento para gases se ajustará a los lineamientos de la Norma con la finalidad de que los resultados no excedan el nivel máximo establecido.



Problema.

En el Laboratorio de desarrollo de procesos de la FES Zaragoza, se confinan residuos sólidos urbanos, reciclables y biológicos-infecciosos, como se clasifican en la NOM-052-SEMARNAT-2005 (ver anexo 2), que sin duda alguna causan efectos negativos para la salud y el medio ambiente. El tratamiento y reducción de ellos es por el proceso de incineración, sin embargo el resultado, es la producción de gases contaminantes como son: dioxinas, furanos, CO, CO₂, óxidos de nitrógeno y gases secundarios, los cuales deben recibir un tratamiento para aminorar su concentración y temperatura, antes de ser liberados, como lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, de igual manera que los alumnos tengan contacto directo con las operaciones unitarias implementando las normas adecuadas.

Hipótesis.

Conociendo los gases emitidos por la incineración, basado en los fundamentos establecidos en los límites de emisión de contaminantes y especificaciones de operación por la NOM-098-SEMARNAT-2002, se busca diseñar un lavador que permita reducir la temperatura, concentraciones y neutralizar los gases como son dioxinas, furanos, CO, CO₂ óxidos de nitrógeno, gases secundarios, con una solución NaOH, para lograr la conformidad y aplicación de la Norma Oficial Mexicana, generar el prototipo que permita a los alumnos interactuar con las operaciones unitarias relacionadas con la incineración y primordialmente que apliquen la Norma para el desarrollo de la actividad disminuyendo las emisiones al ambiente, así mismo poder familiarizarse con uno de los retos de la vida laboral.



OBJETIVOS

Objetivo general.

Diseñar un proceso que permita a los alumnos de la FES Zaragoza aplicar la NOM-098-SEMARNAT-2002 y obtener conocimientos en relación con el proceso de en la incineración de desechos, por medio de la reducción de concentración en los gases emitidos así como la temperatura.

Objetivos específicos.

- Identificar la concentración de los gases que son emitidos durante la incineración.
- Realizar el diseño del lavador de gases, que permita reducir las concentraciones y la temperatura en las emisiones, como resultado de la incineración.
- Reducir la concentración de emisiones principalmente el de CO, CO₂, dioxinas, furanos y otros gases secundarios para la protección del medio ambiente y equilibrio ecológico, con una disolución de (NaOH-H₂O).
- Utilizar la torre de enfriamiento como mecanismo para reducir la temperatura en los gases dentro del tren de lavado.
- Lograr que los alumnos interactúen el proceso de incineración y apliquen la normatividad para el desarrollo de la actividad disminuyendo las emisiones contaminantes.



CAPITULO 1. GENERALIDADES.

1.1 Definición de residuos.*

Los residuos como aquellos materiales o productos cuyo propietario desecha y que se encuentran en estado sólido o semisólido, líquido, gaseoso y que se contienen en recipientes o depósitos; pueden ser susceptibles de ser valorizados o requieren sujetarse a tratamiento o disposición final.

1.2 Clasificación de residuos. *

1.2.1 Residuos sólidos urbanos (RSU).

Son aquellos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos, en la vía pública que se genere con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

1.2.2 Residuos de manejo especial (RME).

Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

1.2.3 Residuos peligrosos (RP).

Son aquellos que poseen algunas características CRETIB (corrosivos, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o agentes biológicos-infecciosos) que les confieren peligrosidad, así como envases, recipientes embalajes y suelos que hayan sido contaminados al ser transferidos a otro sitio.

1.3 Alternativas para el manejo de residuos.*

Hay varias alternativas para el manejo de residuos, las principales son las siguientes:

1.3.1 Reciclaje.

Esta es la alternativa más productiva, la que después de un proceso específico convierte a los residuos en materia prima que se puede utilizar después en otro proceso productivo diferente.

1.3.2 Confinamiento.

Los residuos peligroso se destoxifican, separan y concentran los componentes peligrosos en volúmenes reducidos y finalmente se estabilizan para evitar la generación de lixiviados.

1.3.2 Incineración.

Es una de las tecnologías térmicas existentes para el tratamiento de residuos. La incineración es la quema de materiales a alta temperatura, generalmente superior a 900°C, mezclados con una cantidad apropiada de aire durante un tiempo predeterminado.

En el caso de la incineración de los residuos sólidos, los compuestos orgánicos son reducidos a sus constituyentes minerales, principalmente dióxido de carbono gaseoso, vapor de agua y sólidos inorgánicos (cenizas) entre otros. La reducción se lleva a cabo entre un 90 a 95% comparando el volumen final con el inicial, el otro 5 a 10% son cenizas resultantes.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

Es un proceso de disposición última y aplicable a aquellos residuos que por sus características presenten ventajas comparativas frente a otros procesos de disposición final como, los rellenos de seguridad.

Este tipo de tratamiento sirve a determinados propósitos:

- Destrucción de residuos acompañada de una reducción de masa y el volumen de los mismos.
- Generación de energía e incorporación de materiales a productos industriales.

Se destaca que la incineración también produce emisiones gaseosas, conteniendo partículas, gases ácidos y otras sustancias cuya formación dependerá del tipo de residuos que se esté incinerando.

1.4 Incineradores.

1.4.1 Incineradores de Cámara Múltiple, solera fija o de pisos.

Son construidos con varias cámaras, opera por lo general bajo condiciones de aire en exceso. Las emisiones de aire son inaceptablemente altas con estos incineradores, necesariamente debe ser instalado un equipo para controlar la contaminación del aire.

Este tipo de horno se emplea para lodos, depuradoras, sólidos, líquidos y raramente para residuos peligrosos con elevadas proporciones de agua, el material a incinerar pasa a través de un cierto número de gradillas.

En las primeras ($<100^{\circ}\text{C}$) se secan, pasando a las bandejas inferiores donde se produce la combustión $<1000^{\circ}\text{C}$, debido a que muchos componentes de las cenizas se funden a temperaturas próximas y superiores (NaCl , Na_2CO_3 , Na_2SO_4). Algunas cámaras de combustión son utilizadas para generar vapor y producir electricidad.*

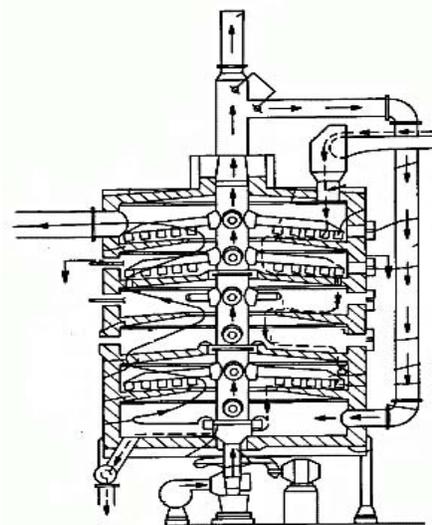


Figura 1. Incinerador de cámara múltiple, solera o de piso.

(Fuente: <http://patentados.com/invento/metodo-para-inyectar-oxigeno-en-un-horno-de-solera-multiple.html>.)

CAPITULO 1. GENERALIDADES.

1.4.2 Incinerador de doble cámara con aire controlado.

Estos incineradores primero queman los desechos, bajo condiciones de aire escaso en una cámara primaria, luego queman los productos resultantes de la combustión y los gases volátiles, bajo condiciones de aire en exceso en una cámara secundaria.

Los incineradores de aire controlado usan dos o más cámaras de combustión separadas, la primera cámara opera en condiciones de aire escaso, para volatilizar la humedad presente en los desechos, vaporizar la fracción volátil del desecho y quemar el carbono fijo en el desperdicio.

El escaso aire de la cámara primaria permite que ocurra una combustión lenta, lo que minimiza la emisión de partículas en los gases de combustión y reduce de este modo las emisiones a la atmosfera. Las temperaturas inferiores a 700°C, evitan las temperaturas de fusión en la mayoría de metales y vidrios, esto reduce la formación de escoria.

Los gases de la combustión son luego pasados a la cámara secundaria (cámara de post- combustión), el aire es regulado para proveer condiciones de aire en exceso y completar la combustión de las sustancias volátiles, provenientes de la cámara primaria. Se genera la turbulencia, por la entrada de aire en la cámara primaria, con esto se arrastra una mezcla de gas/aire, aumentando la temperatura (1000°C a 1500°C), el aire en exceso en la segunda cámara, asegura la combustión completa de gases volátiles y reducen así las emisiones.



Figura 2. Incinerador de aire controlado.

(Fuente: Alvarez Herrera Dulce Nataly, Carrillo Castelán Osvaldo, FES Zaragoza, Laboratorio de desarrollo de procesos).

CAPITULO 1. GENERALIDADES.

1.4.3 Incinerador de horno rotativo.

Se caracterizan por ser refractarias, cilíndricas que rotan sobre un eje de manera horizontal ligeramente inclinado, el desecho se desplaza del extremo de carga hasta el extremo de descarga, el resultado son cenizas

La rotación provee excelente alimentación continua, dando como beneficio que el incinerador no tiene que ser apagado para extraerle las cenizas. La combustión puede tener una duración de 50 a 70 minutos y pueden llegar hasta alcanzar hasta 1700°C.

Se pueden incinerar los siguientes residuos:

- Sustancias líquidas (disolventes): son inyectados por encima con un quemador refrigerado por agua, para un mejor manejo.
- Sustancias bombeables (lodos y pastas fluidas): son inyectados desde el contenedor con una bomba de pistón, pasa por una válvula refrigerada en el extremo inicial.
- Pasta no fluidas: son vertidas en la tolva de alimentación y se encapsula en recipientes cerrados.

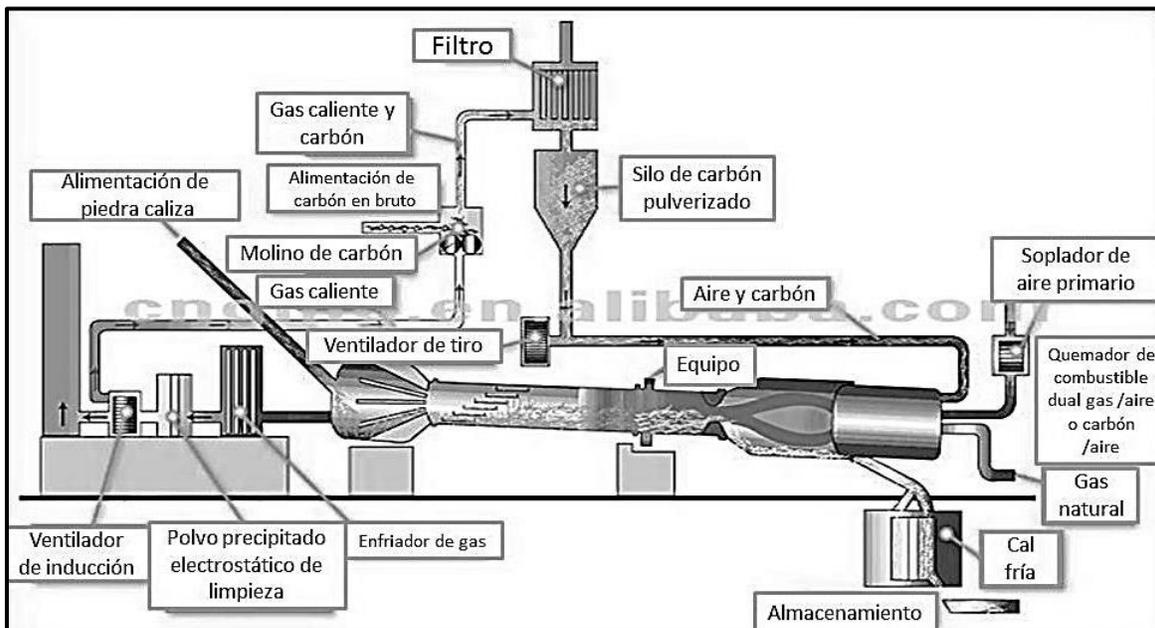


Figura 3. Incinerador rotativo.

(Fuente: <http://www.gogle.com.mx/search?q=horno+incinerador+rotativo&biw=1438&bih=708&source>)

1.4.4 Incinerador lecho fluidizado.

Este incinerador se emplea con residuos homogéneos sólidos, líquidos, pastosos o gaseosos.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

La incineración se realiza alimentando el residuo de forma continua, el lecho está compuesto por material inerte granulado comúnmente cuarzo, se fluidiza por una corriente ascendente de aire. La temperatura se mantiene entre 800°C a 900°C con cuarzo y si es de caliza 700°C a 800°C. (Fuente)

La corriente de aire compensa la tendencia a sedimentar, porque el lecho se expande, los materiales en la cámara se presentan como un líquido en ebullición, donde se favorece la transferencia instantánea de calor por convección.

El residuo alimentado por la alta superficie de contacto, pierde inmediatamente la humedad y otros componentes volátiles. Estos gases son arrastrados hacia la parte superior de la cámara de combustión realizándose allí su oxidación. Las partículas sólidas permanecen en la zona densa del lecho.

Residuos producidos.

- Escoria: sólidos fundidos que se decantan hacia la parte inferior de la parrilla, tamizados del lecho (80% a 95% del total).
- Cenizas: material particulado de 1mm, que fluye con los gases en la cámara de combustión (15 a 35 %).

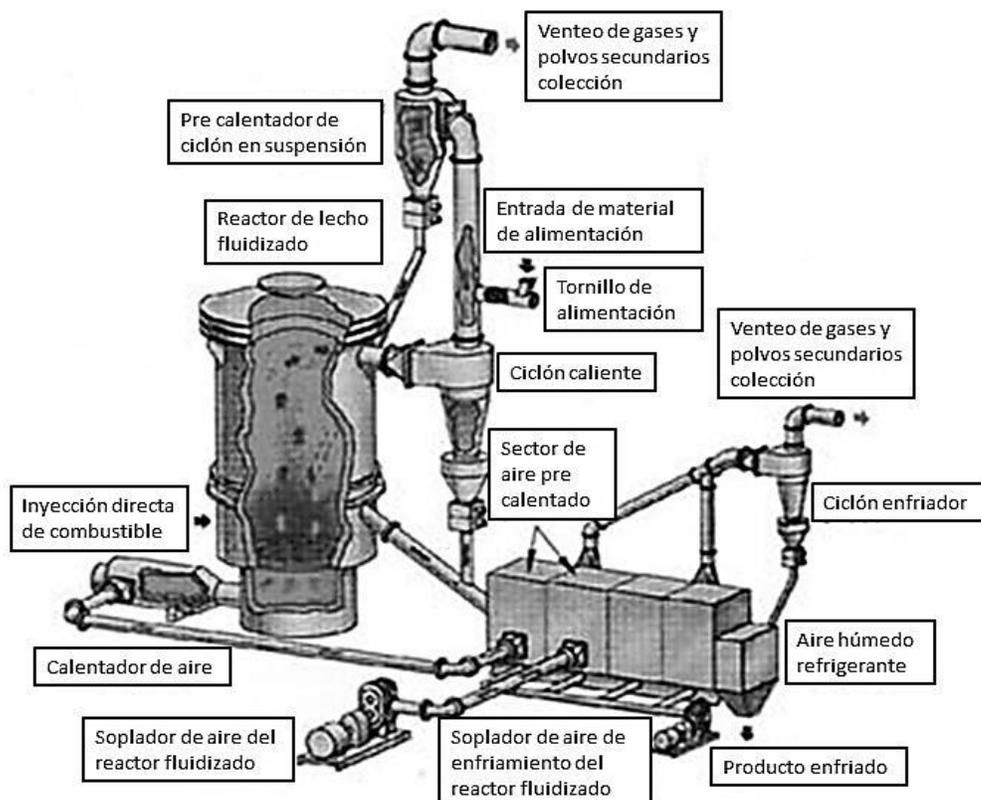


Figura 4. Incinerador de lecho fluidizado.

(Fuente: <https://www.google.com.mx/search?q=incinerador+de+lecho+fluidizado&biw=1607&bih=792&tbm=isch&imgil=2lZlgy5->)

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.5 Torres de enfriamiento.

1.5.1 Torre de enfriamiento atmosférico.

Las torres atmosféricas utilizan las corrientes de aire de la atmosfera, el aire se mueve de forma horizontal y el agua cae verticalmente (flujo cruzado). La altura es de hasta 220 metros y con una sección transversal de 100 metros, la instalación es en lugares muy despejados, de forma que ningún obstáculo impida la libre circulación de aire a lo ancho de la torre, debe estar expuesta a vientos iguales o superiores a los 8 km/h. *

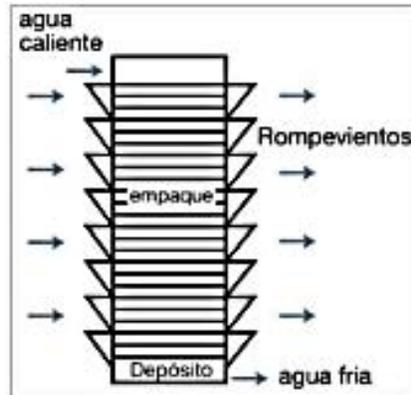


Figura 5. Torre de enfriamiento atmosférica.

(Fuente: <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2009/03/torres-de-enfriamiento/>).

1.5.2 Torre de enfriamiento de tiro natural.

En las torres de tiro natural están fundamentadas, en el hecho de que el aire se calienta por el agua y de esta forma se produce una corriente de convección, los lados de la torre van cerrados desde el fondo hasta la parte superior, teniendo entradas de aire cerca del fondo, cuenta con una rejilla que distribuye el agua se encuentra en la parte inferior de la torre y es de gran importancia para producir el tiro.

En estas torres de enfriamiento la resistencia del flujo de aire debe reducirse al mínimo es necesario el empleo de tablas en zig zag. La diferencia de densidades entre el aire húmedo y el caliente, es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre, la diferencia de velocidades entre el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea mejora los flujos de aire.

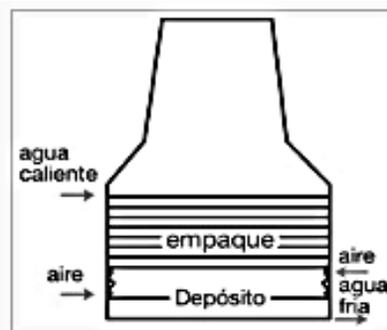


Figura. 6 Torre de enfriamiento de tiro natural.

(Fuente: http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/integracion3/Torres_de_enfriamiento.pdf).

CAPITULO 1. GENERALIDADES.

1.5.3 Torres de enfriamiento de tiro mecánico.

Estas torres proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado, son torres compactas con una sección transversal y una altura de bombeo pequeña, comparadas con las torres de tiro natural, se puede controlar de forma precisa la temperatura del agua a la salida, logrando valores muy pequeños de 3°C o 4°C, si el ventilador está situado en la entrada de aire, el tiro es forzado y si se ubica en la zona de descarga del aire se habla de tiro inducido.

1.5.4 Torres de enfriamiento de tiro forzado.

Constan de un separador de gotas que detiene el agua arrastrada por la corriente de aire al salir, se consigue mediante un cambio brusco en la dirección (60º es la más efectiva), esta variación provoca que el agua arrastrada se deposite sobre la superficie del separador, cayendo posteriormente al relleno su existencia tiene 3 ventajas, la reducción de pérdidas de agua, evitar daños en el entorno de torre sobre todo si el agua de torre es agua salada y limitar la formación de neblinas.

El sistema de distribución de agua a enfriar, tiene la finalidad de repartir uniformemente el flujo de agua por encima del relleno. Existen dos métodos de reparto uno es por gravedad y el otro por presión, el primero el agua caliente cae sobre el relleno por su propio peso, consiste en llevar hasta una balsa colocada sobre el relleno el agua caliente y una vez allí se reparte por unos canales, dejando caer el agua por gravedad, sobre unas piezas en forma de herradura que enlazan los canales y el relleno.

En el segundo, la tubería tiene el agua con cierta presión (suministrada por las bombas de impulso del circuito de refrigeración), se conduce por tuberías hasta unos aspersores, que rocían el relleno con pequeñas gotas.

El relleno es de vital importancia para el intercambio de calor ya que debe proporcionar, una superficie de intercambio lo más grande posible entre el agua que cae y el aire que asciende y retardar el tiempo de caída del agua, asegurando una mayor duración del proceso de intercambio.

Las características del relleno deben ser:

- a) Se debe ser una material de bajo costo comparado con a la cantidad que se emplea y tendrá que ser fácil de colocar.
- b) La superficie del mismo es lo más grande, en relación con su volumen.
- c) Su diseño permitirá fácilmente el paso del aire, teniendo la menor resistencia y perdida de carga.
- d) Sera resistente al deterioro ambiental, químico, térmico y fácil de limpiar.

Existen tres formas distintas de realizar el reparto de agua a través del relleno, por salpicadura, película y de tipo mixto, cada uno tiene sus inconvenientes y sus ventajas por lo que se utiliza cada tipo de relleno, dependiendo de las características de su uso y del diseño.

Los más habituales son los de películas, este relleno distribuye el agua en una película fría que fluye por su superficie y pone una gran cantidad de agua en contacto con la corriente de aire.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

La película de agua desciende adherida a la superficie del relleno, evitando que el aire separe el agua del relleno, esto se logra con grupos de láminas onduladas de policloruro de vinilo o polipropileno, colocadas de forma paralela formando cubos para favorecer su apilado.

Los ventiladores trabajan en condiciones duras, debido a que están continuamente en funcionamiento, en un clima de elevada humedad y temperatura, son los encargados de crear el flujo de aire.

Las aspas son de plástico o aluminio por su ligereza y resistencia a la corrosión, el número de aspas influye directamente sobre la presión que se ejerce en ellas.

Las bombas de impulsión se utilizan para que el agua ya fría alcance la presión suficiente, para llegar a los diferentes elementos que se requieren enfriar y posteriormente subir el agua caliente a la parte superior de la torre, cerrando el circuito. La balsa situada en la parte inferior de la torre, es el depósito de agua fría.

El sistema de agua de aporte tiene la función de recuperar lo que se pierde por evaporación o por un régimen de purgas adecuado para disminuir la concentración de sales, esto hace que sea necesario alimentar más líquido.

Las torres están dotadas de un ventilador de eje horizontal a un lado de la torre, para descargar el aire hacia atrás. El flujo de aire es dirigido después hacia arriba a las mamparas, haciéndolo recorrer de manera descendente al del agua y es descargado por un extremo superior. En su totalidad la parte superior de la torre es usada para la descarga de aire, la velocidad de salida es más baja que las velocidades de descarga en las torres de tiro inducido.

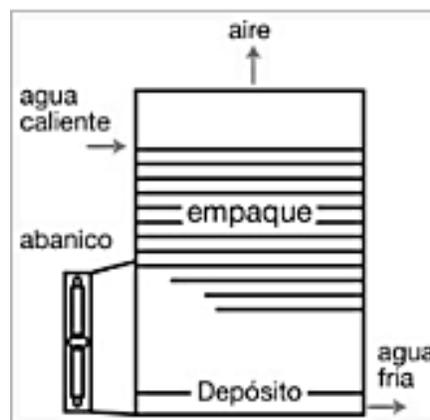


Figura 7. Torre de enfriamiento de tiro forzado.

(Fuente: <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2009/03/torres-de-enfriamiento/>)

1.5.5 Torres de tiro inducido.

El agua caliente procedente de la refrigeración, cae por el interior de la torre mediante un sistema de distribución, permitiendo caer el agua de manera uniforme sobre el relleno, en la parte superior hay ventiladores que hacen al aire circular a contracorriente del agua.

CAPITULO 1. GENERALIDADES.

El fenómeno de cesión de calor se debe a que al entrar en contacto el agua caliente, se evapora, extrae la evaporación del líquido y produce el enfriamiento del mismo.

Por la parte superior sale el aire húmedo, las condiciones ambientales dificultan en ocasiones la dispersión de vapor en el aire por frío intenso o humedad relativa alta. El vapor visible se denomina penacho o pluma, aunque es vapor de agua (más que vapor es niebla, es decir gotas finas de agua), no es un contaminante pero si tiene alto impacto visual.



Figura 8. Torre de enfriamiento de tiro inducido.

(Fuente: <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2009/03/torres-de-enfriamiento/>)

1.5.6 Torres de tiro inducido de flujo cruzado.

El flujo de aire horizontal atraviesa el relleno, mientras cae sobre él una lluvia de pequeñas gotas de agua, en estos casos se emplean separadores de gotas que reducen las pérdidas de agua por arrastre. Los separadores desvían el aire a la parte superior de la torre.

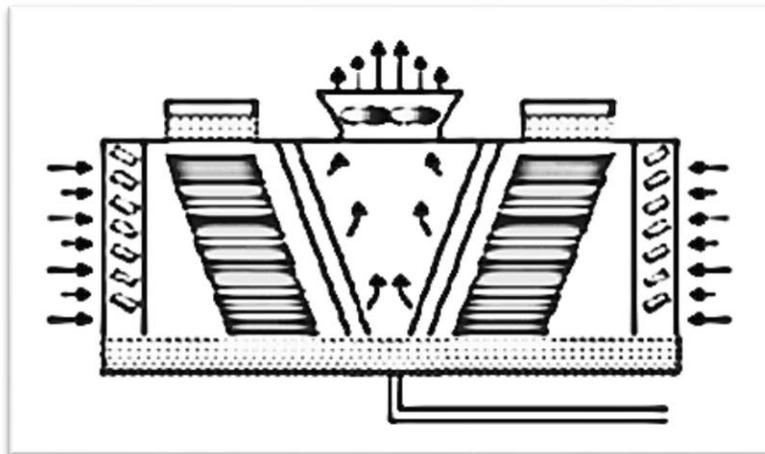


Figura 9. Torre de enfriamiento de tiro inducido de flujo cruzado. (Fuente R. Treybal (1996))

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.5.7 Torre de tiro inducido a contra flujo.

El aire aspirado asciende enfriando las gotas de agua que caen a través del relleno, el agua caliente entra en contacto con el aire húmedo, se minimiza la recirculación de aire en la parte superior de la torre debido a la acción de los ventiladores.



Figura 10. Torre de enfriamiento de tiro forzado a contra flujo. (Fuente: FES Zaragoza, Laboratorio de desarrollo de procesos, Alvarez Herrera Dulce Nataly y Carrillo Castelán Osvaldo).

1.6 Lavador de gases.

1.6.1 Lavadores tipo spray.

Son torres verticales donde se produce una lluvia mediante inyectores, que arrastran las partículas y/o disuelve los gases, las gotas para cumplir su función deben tener un tamaño mínimo (500 a 1000 μm) y puedan hacer contacto con la corriente gaseosa de aproximadamente (0.3-1.2 m/s), consta de un dispositivo antiniebla para eliminar aquellas gotas que hayan podido ser transportadas por dicha corriente.

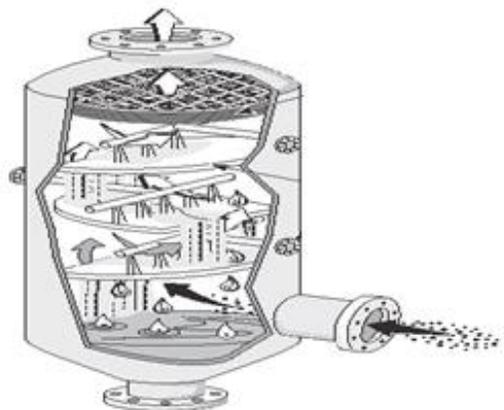


Figura 11. Lavador de gases tipo spray.

(Fuente: "El control de la contaminación atmosférica" autores María de Jesús y José Agustín García fecha de elaboración 24/04/2003 diapositiva 70).

CAPITULO 1. GENERALIDADES.

1.6.2 Lavadores tipo Venturi.

Los lavadores usan el efecto venturi, para lograr acelerar la corriente gaseosa utilizando su energía en la atomización de las gotas de líquido, la absorción de los contaminantes se produce en el líquido, logrando una separación de la fase líquida con los contaminantes de la corriente gaseosa, obteniendo a la salida gases limpios que pueden ir a la atmósfera.

Los componentes básicos son garganta venturi, tanque separador de partículas, ventilador centrífugo y chimenea de salida, en conjunto producen un cambio repentino de variables en la corriente gaseosa, para lograr contraer y expandir las gotas obteniendo mayor superficie de contacto, entonces se realiza la separación de la fase líquida y la fase gaseosa, esta última es deshumidificada para ser liberada a la atmósfera.

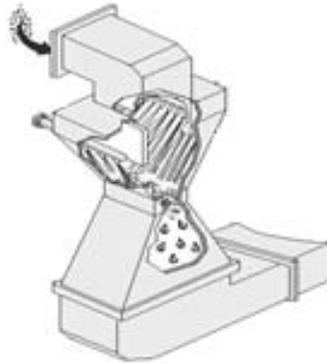
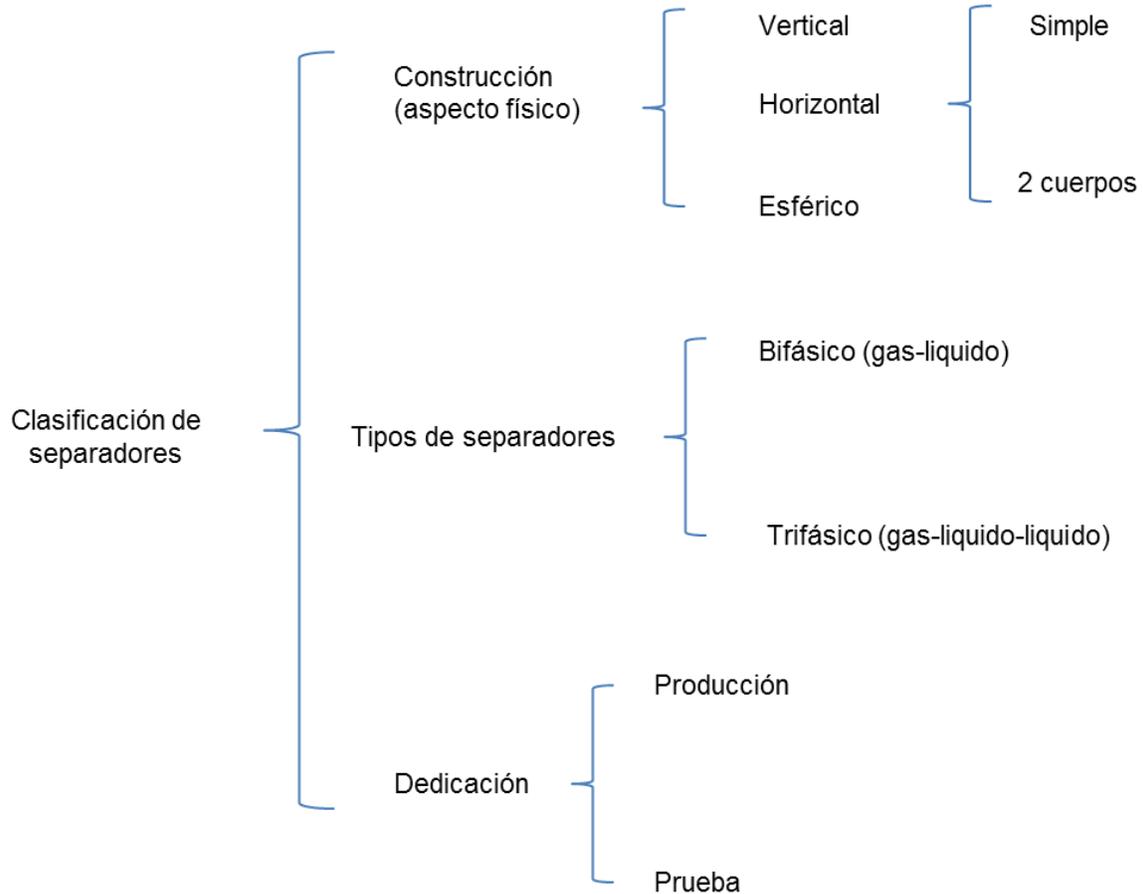


Figura 12. Lavadores de gases tipo Venturi.

(Fuente: "El control de la contaminación atmosférica" autores María de Jesús y José Agustín García fecha de elaboración 24/04/2003 diapositiva 72).

1.7 Separadores.

1.7.1 Tabla de desglose de los separadores.



Esquema 1. Muestra clasificación de separadores (Elaboro Osvaldo Carrillo Castelán.)

1.7.2 Separadores bifásicos.

Son recipientes capaces de separar el gas y líquido inmiscible. Se emplean para dejar lo más libre posible el gas de contaminantes del proceso a presiones y temperaturas definidas.

1.7.3 Separadores trifásicos.

Son recipientes capaces de separar el gas y las dos fases de líquidos inmiscibles. Por lo general resultan muy grandes porque se diseñan para garantizar que ambas fases salgan completamente libres una de la otra.

1.7.4 Separadores Horizontales.

El fluido entra en el separador y se contacta con un desviador de ingreso causando un cambio repentino en el impulso y la separación del líquido y vapor. El gas fluye sobre el desviador, posteriormente de manera horizontal baja a la sección de asentamiento sobre el líquido. Mientras el gas fluye por esta sección, las gotas de líquido que no fueron separadas por el desviador son separadas en la interfaz de gas – líquido.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

Las gotas de líquido caen de la corriente de gas al fondo del recipiente de recolección. Algunas tienen un diámetro tan pequeño que no son fácilmente separadas en la sección de asentamiento.

Antes de que el gas salga del recipiente, pasa por una sección de fundición o un extractor de neblina, esta emplea aletas, malla de alambre, o placas para fundir y remover las gotas muy pequeñas.

La sección de recolección de líquido provee el tiempo de retención necesario para que el gas arrastrado suba al espacio de vapor. También provee volumen de oleada, para manejar los sobrepesos de líquido. El líquido sale del recipiente mediante una válvula de descarga, que es regulada por un controlador de nivel.

El controlador de nivel al detectar cambios abre y cierra la válvula de liberación de presión en la salida para mantener la presión deseada. Los separadores horizontales operan con la mitad de líquido para maximizar el área de interfaz de gas – líquido.

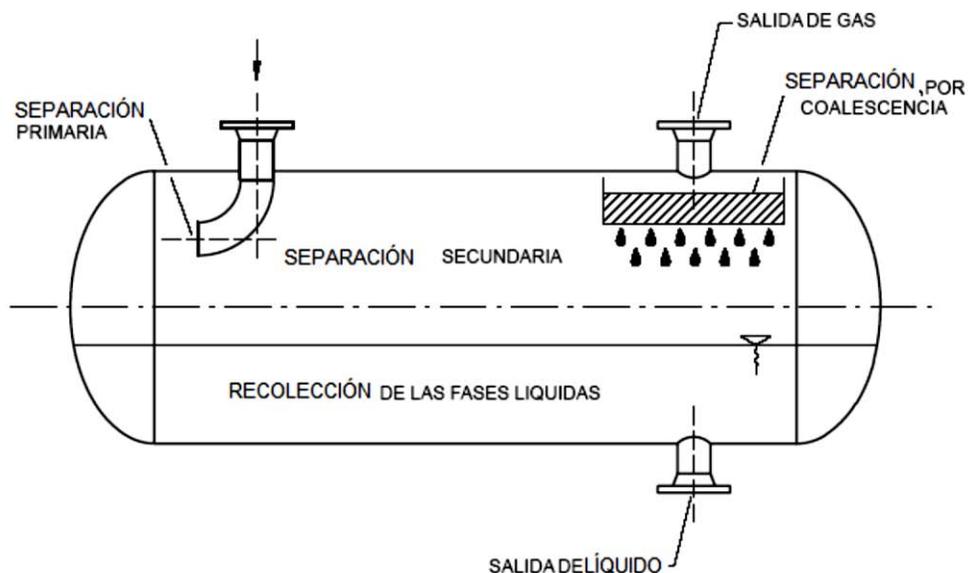


Figura 14. Imagen de un separador horizontal y sus partes principales. (Fuente: “Parámetros requeridos en el diseño de separadores para manejar mezclas gas-líquido”, autor, Helen Tomala, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica Superior, pág. 3, figura 5, elaboración 23 de febrero de 2011.)

1.7.5 Separadores verticales.

En esta distribución el flujo de entra al recipiente por un costado. A igual que con el separador horizontal, el desviador de ingreso hace la separación inicial. El líquido fluye a la sección de recolección en el recipiente y luego a la salida de líquido. Cuando el líquido llega al equilibrio, las burbujas de gas fluyen en sentido contrario a la dirección del flujo de líquido y eventualmente migran al espacio de vapor.

CAPITULO 1. GENERALIDADES.

El controlador de nivel y la válvula de descarga de líquido opera de la misma forma como en el separador horizontal. El gas fluye sobre el desviador de ingreso y luego hacia la salida de gas. En la sección de asentamiento, las gotas de líquido caen, en sentido opuesto a la dirección del flujo de gas.

El gas pasa por la sección de fundición/extractor de neblina antes de salir del recipiente. La presión y el nivel son mantenidos de la misma forma que en el separador horizontal.

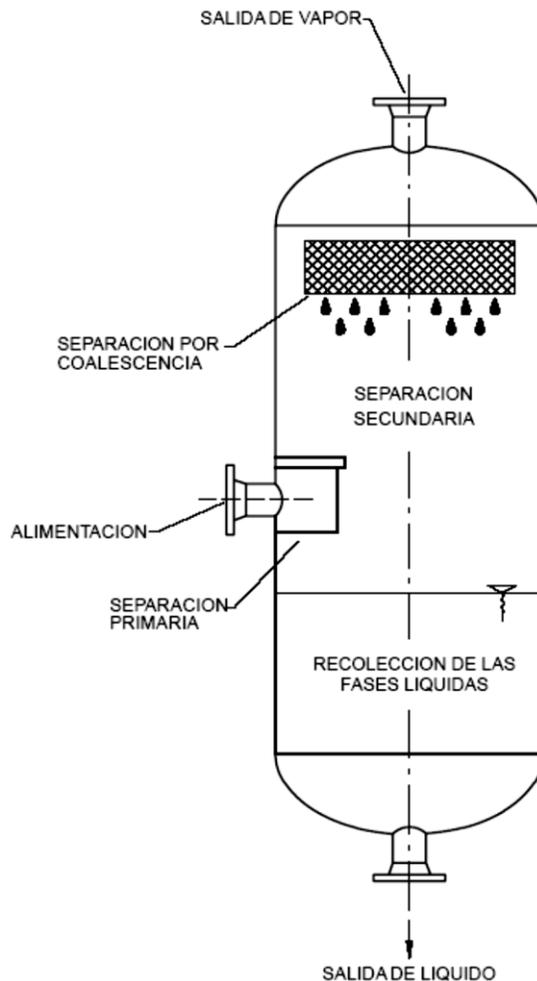


Figura 15. Imagen de un separador vertical y partes principales. (Fuente: "Parámetros requeridos en el diseño de separadores para manejar mezclas gas-líquido", autor Helen Tomala, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica Superior, pág. 3, figura 5, elaboración 23 de febrero de 2011.)

1.7.6 Separadores Esféricos.

En un separador esférico típico cuenta con las mismas cuatro secciones previamente descritas. Los separadores esféricos son considerados como un caso especial de separadores verticales sin un casco cilíndrico entre los dos cabezales.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

Este diseño puede ser muy eficiente desde el punto de vista de contención de presión, pero debido a su capacidad limitada de oleada líquido y dificultades con la fabricación, los separadores esféricos ya no son frecuentemente usados.

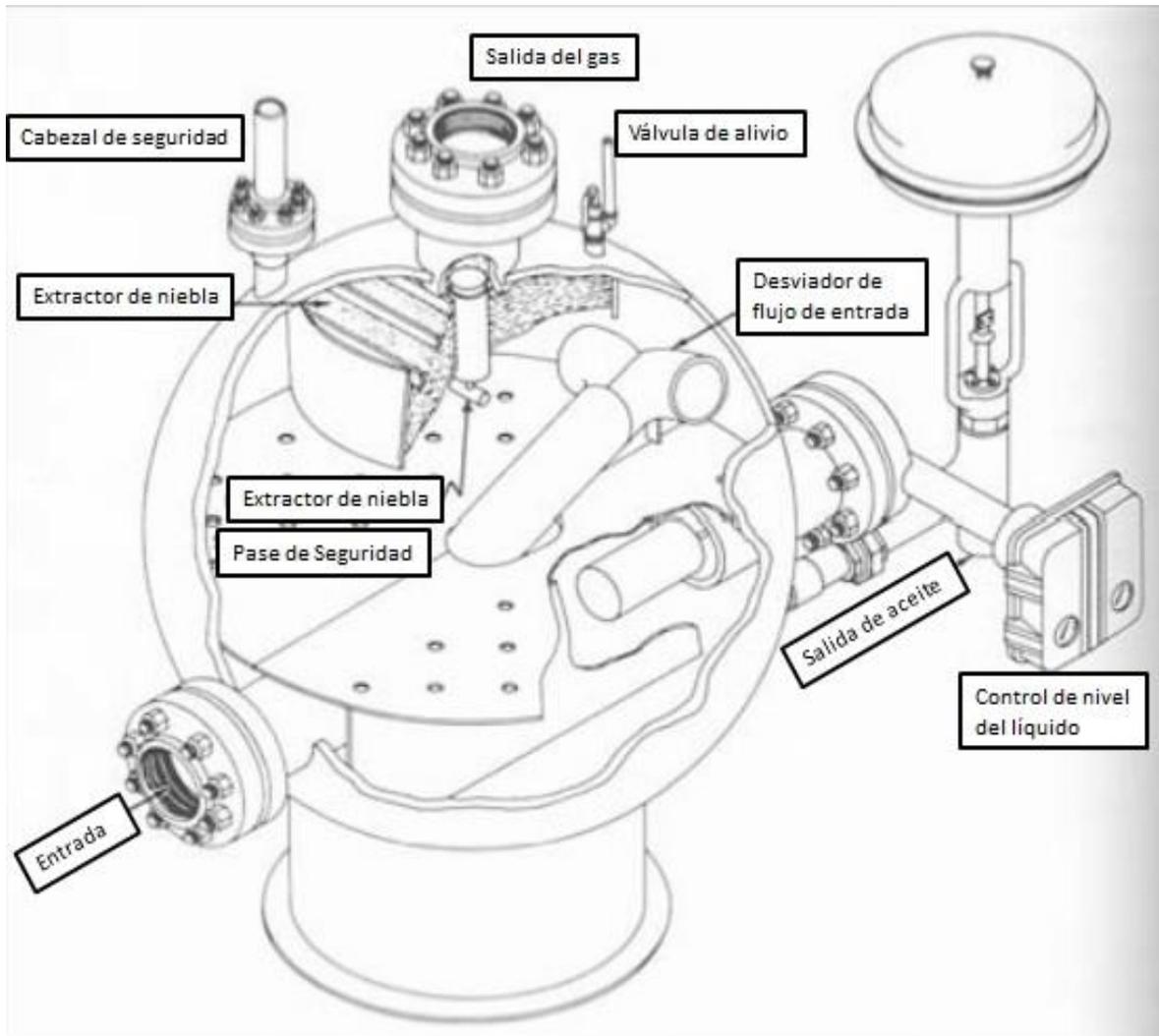


Figura 16. Imagen de un separador esférico y partes principales. (Fuente: <http://instructivoseparador.blogspot.mx/p/tipos-de-separadores.html>).

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.7.7 Ventajas y desventajas de los separadores.

Ventajas y desventajas	
Horizontal	Vertical
Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> • La dirección del flujo no se opone al drenado en la extracción de neblina. • Gran control de turbulencia. • Mejor manejo para la retención de volumen. • Mayor área de superficie líquida. • Fácil mantenimiento y servicio. • Mejor para el manejo de espuma. • Mayor capacidad de líquido con un alto RGP 	Ventajas: <ul style="list-style-type: none"> • Puede manejar grandes cantidades de sedimentos o lodo. • Buena capacidad de oleada. • No requiere de mucho espacio físico. • Puede ser limpiado fácilmente.
Desventajas: <ul style="list-style-type: none"> • Requiere mayor espacio físico. • Los extractores de neblina a veces se tapan y explotan. • No es bueno para el manejo de sedimentos o lodo 	Desventajas: <ul style="list-style-type: none"> • Más costoso para procesar iguales cantidades de gas. • Menor capacidad para el drenado de neblina. • No es bueno para la espuma. • Dificultad para revisar equipos en la parte superior. • Baja capacidad de líquido con un alto RGP.

Tabla 1. Muestra la comparación de separadores. (Elaboro Osvaldo Carrillo Castelán información basada en Robert E. Treybal, Operaciones de Transferencia de masa, MacGrawll Hill, segunda edición, 1988.)

1.8 NOM-098- SEMARNAT -2002. (Ver anexo 1).

Esta norma se expide con la finalidad de obtener un principio regulador de la protección del equilibrio ecológico, debido a que la población y las actividades productivas con el paso del tiempo fueron obteniendo gran auge, así que toda obra o actividad que afecte o pueda afectar el ambiente tienen la obligación, de prevenir o minimizar, reparar los daños que causen y asumir los costos que dicha afectación implique. El tratamiento y la disposición final de los residuos cada vez se ha vuelto más complicado, creando un problema para la sociedad y se plantea una forma de reducción que pueda ser benefactora para la minimización y tratamiento de residuos.*

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.8.1 Límites de emisión de gases.*

CONTAMINANTE	LIMITE DE EMISION	FRECUENCIA DE MEDICION	NORMA QUE APLICA O METODO
CO (mg/m ³)	63	CONTINUO	Infrarrojo No Dispersivo y Celda Electroquímica Anexo 1
HCl (mg/m ³)	15	TRIMESTRAL	NMX-AA-070-1980
NO _x (mg/m ³)	300	SEMESTRAL	Quimiluminiscencia Anexo 2
SO ₂ (mg/m ³)	80	SEMESTRAL	NMX-AA-55-1979
PARTICULAS (mg/m ³)	50	SEMESTRAL	NMX-AA-10-SCFI-2001
ARSENICO SELENIO COBALTO NIQUEL MANGANESO ESTAÑO (mg/m ³)	0.7*	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica. Anexos 3 y 4
CADMIO (mg/m ³)	0.07	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica. Anexos 3 y 4
PLOMO CROMO total COBRE ZINC (mg/m ³)	0.7*	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica. Anexos 3 y 4
MERCURIO (mg/m ³)	0.07	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica con vapor frío Anexos 3 y 4
DIOXINAS Y FURANOS EQT (ng/m ³) Instalaciones de incineración nuevas	0.2	ANUAL	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución Anexo 5A
DIOXINAS Y FURANOS EQT (ng/m ³) Instalaciones de incineración existentes antes de la publicación de esta NOM.	0.5	ANUAL	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de baja resolución Anexo 5B

Tabla 2. Límites y tipos de contaminantes establecidos por la NOM-098-SEMANART-2002

CAPITULO 2. PROCESO

2.1 Diagrama de bloques del proceso.

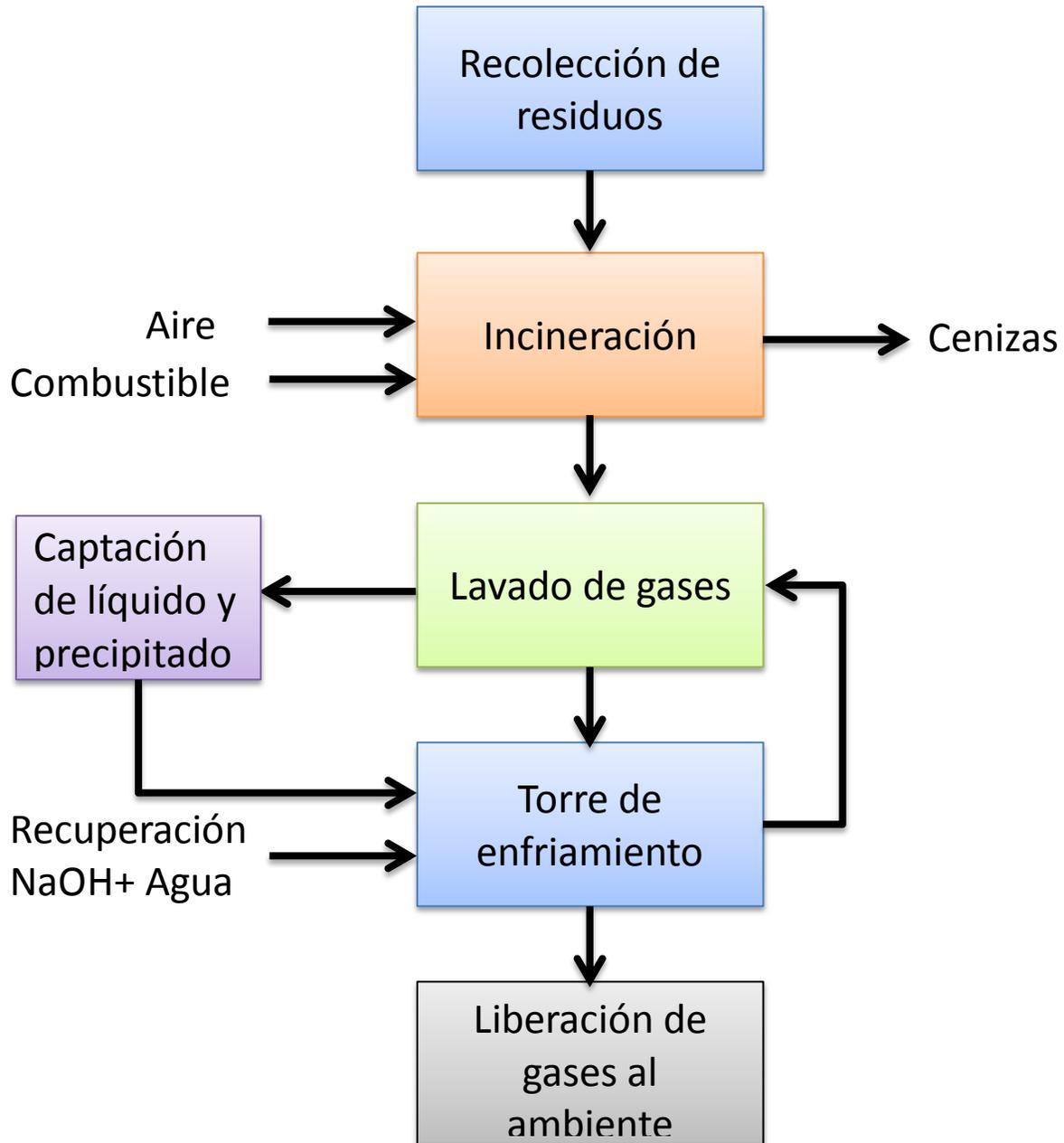


Diagrama 1. Secuencia del proceso de incineración (Elaboro Alvarez Herrera Dulce Nataly).

CAPITULO 2. PROCESO

2.2 Descripción del proceso.

En la incineración se realiza la oxidación rápida de la materia combustible con desprendimiento de calor, el residuo a oxidar tiene al menos uno de los tres únicos elementos susceptibles que al combinarse con el oxígeno y calor se libere: C (carbono), H (hidrogeno) y S (azufre).

En el BA-01 conocido como cámara primaria o pre-incinerador, los sólidos y líquidos cambian a una fase de gasificación, la mezcla íntima y adecuada del combustible proveniente de FA-01 y el comburente siendo el flujo de aire, que debe cubrir el 200% de oxígeno en exceso necesario para la combustión, inyectado por GB-01, esto genera la ruptura de los enlaces entre los átomos de carbono y el hidrogeno presente en el residuo, posteriormente se realiza la recombinación de estos, formando CO, CO₂, H₂O primordialmente, gases secundarios y material particulado, esto ocurre a una temperatura de 600°C a 750°C.

La cámara secundaria o post-incinerador BA-02, tiene un rango de temperaturas desde los 700°C hasta los 1200°C y se considera el rango requerido para el buen funcionamiento, aproximadamente a los 700°C se produce la oxidación de sulfuros y posteriormente la formación de SO_x, al mismo tiempo se realiza la descomposición de materia orgánica, esto provoca que el equilibrio se desplace y forme CO y SO_x hasta elevar la temperatura a los 900°C, en esta temperatura se inicia la formación de NO_x de origen térmico, debido al por el nitrógeno que hay en el aire y por último de 1000°C a 1200°C, se inicia la volatilización de metales (cadmio, níquel, zinc, etc.), continuando el desprendimiento de NO_x y la destrucción de algunos compuestos gaseosos sensibles a los 1200°C.

Los gases provenientes del BA-02, ingresan al FB-01 que por sus características permite el cumplimiento de diversas funciones; por un lado da tratamiento a los gases contaminantes resultantes de la incineración con una disolución de NaOH que proviene del DA-01 a 13°C. La solución es preparada en el FA-01 con una concentración de 10% pp (peso a peso) y luego es transportada por GA-01-A a los rociadores que se localizan en la parte superior del lavador-neutralizador.

El FB-01 consta de 6 aspersores, 9 mamparas y 2 distribuidores de flujo, en conjunto realizaran la retención del gas para que este, entre contacto con la disolución, los aspersores tendrán un flujo constante en forma de lluvia, consiguiendo el lavado-neutralizado por consiguiente y la reducción en la concentración de los gases, además así mismo elimina un alto porcentaje del material particulado presente en los gases de salida del BA-02, la temperatura de los gases a la salida de FB-01 es de 45°C.

Al fondo del FB-01 se realiza la separación de la disolución de lavado, la disolución y precipitados son captados en FA-02, la disolución se envía nuevamente a DA-01 para poder disminuir su temperatura y los precipitados deben ser analizados para su uso posterior en prácticas dirigidas a los alumnos, como la práctica de filtración.

Los gases provenientes del FB-01, se dirigen al espejo de DA-01, es succionado por el ventilador para forzar su paso por el empaque empapado de la disolución en DA-01, y por ultimo ser liberado al ambiente con las concentraciones y temperaturas estipuladas por las especificaciones que establece la Norma.

CAPITULO 2. PROCESO

2.3 Criterios claves para el proceso.

- La relación entre el oxígeno en exceso y la concentración de monóxido de carbono, deben ser monitoreados continuamente pues son los factores más importantes, si la combustión se realiza de manera correcta, la concentración de monóxido es cero, esto indica que la incineración se lleva a cabo de manera completa, pues los compuestos orgánicos son destruidos, si el oxígeno no es el suficiente, existirá monóxido a la salida del post-incinerador, indicando que la combustión está incompleta.
- La energía que posee el fluido al entrar al recipiente debe ser controlada.
- En la separación física se realiza por la fuerza de gravedad, la fuerza centrífuga y/o el choque de partículas. Toda separación puede emplear uno o más de estos principios, pero siempre las fases deben tener diferentes densidades para que ocurra la separación.
- La acumulación de líquido debe ser controlado.
- Las regiones del lavador donde se puedan acumular sólidos deben de realizar limpieza mínimo una vez por semana para evitar incrustación.
- La reducción de la temperatura de los gases es primordial ya que de no ser menor a los 60°C, se causa daños al empaque de la torre y al mismo tiempo el funcionamiento del equipo.
- En las torres de enfriamiento el propósito es producir agua de enfriamiento, el aire sea reutilizable y sólo se permiten pequeñas caídas de presión de menos de 2 plg de agua para un buen funcionamiento.
- Un factor que debe considerarse, es el de la inundación del relleno en el que el flujo ordenado a contracorriente de aire y agua se rompe, si esto no sucede la torre no tiene buena transferencia de energía y el enfriamiento no es el requerido.
- El aire que sale de la torre siempre está saturado a su temperatura de salida, la saturación es de 95 a 99%.

3.1 Ecuaciones para el Incinerador.

3.1.1 Eficiencia del incinerador.

El cálculo de la eficiencia de destrucción y remoción está dado por la fórmula:

$$EDR = \frac{A_i - E_i}{A_i} (100\%) \text{ Ecuacion (1)}$$

A_i = Flujo másico del componente contenido en la alimentación al incinerador, calculado por el producto de la concentración del componente de mayor dificultad de destrucción en el residuo alimentado g/h .

E_i = Flujo másico del componente de mayor dificultad de destrucción presente en el residuo alimentado contenido en las emisiones a la atmósfera y las cenizas generadas.

3.1.2 Poder calorífico.

Por definición es la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o un metro cubico de combustible al oxidarse en forma completa. Sus unidades son: (kcal/kg); (kcal/m³); (Btu/lb); (Btu/pie³).

El poder calorífico de un combustible se presenta de dos formas según los requerimientos.

- Poder calorífico superior (PCS).
- Poder calorífico inferior (PCI).

$$PCI = (8.140 * C) + \left(29.00 * \left(H - \frac{O}{8}\right)\right) + (2.220 * S) - (600 * H_2O) \text{ Ecuación (2)}$$

3.1.2.1 El poder calorífico superior (PCS).

Se define que todos los elementos de la combustión, son tomados a 0°C y esos gases son llevados igualmente a 0°C, es decir que el vapor de agua se encontrara totalmente condensado al final, de esta manera al condensar el vapor de agua contenido en los gases de combustión, tendremos un aporte de calor de 597 kcal/kg vapor de agua condensado.

3.1.2.2 El poder calorífico inferior (PCI).

En este se considera que el vapor de agua contenida en los gases de la combustión no condensa, por lo tanto no hay aporte adicional de calor por condensación de agua, solo se dispondrá del calor de oxidación del combustible, el cual se le denomina: Poder calorífico inferior del combustible. *

3.2 Ecuaciones para el lavador.

3.2.1 Asentamiento.

El asentamiento se debe a que se reduce la velocidad del flujo dentro del equipo, si el flujo es vertical las partículas de líquido que se van a separar caen a contraflujo del gas. Estas partículas de líquido que descienden por gravedad, se aceleran hasta que la fuerza de arrastre se balancea con la fuerza gravitacional. Las partículas caen a una velocidad constante, conocida como velocidad de asentamiento o velocidad final.

La velocidad de asentamiento viene dada por el balance de fuerza de las siguientes ecuaciones:

$$F_D = C_D * A * \rho * \left[\frac{V_t^2}{2 * g} \right] \quad \text{Ecuación (3)}$$

Dónde:

F_D = Fuerza de arrastre (lb)

C_D = Coeficiente de arrastre (adimensional)

A = Área de la gota (pie²)

ρ = Densidad de la fase continua (lb/pie³)

V_t = Velocidad de asentamiento de la gota (pie/seg)

g = Constante de gravedad 32.2 pie/seg²

Si el flujo de las gotas es laminar por la ley de Stokes, se dice que:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad \text{Ecuación(4)}$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds.

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y viscosas. Se expresa de forma general por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho * D_t * V_t}{\mu'} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Dónde:

D_t = diámetro interno de la tubería (pie)

μ' = Viscosidad (lb/pie-seg²)

Considerando las gotas de líquido como, partículas esféricas y rígidas su volumen es

CAPITULO 3. ECUACIONES

$$V_{esfera} = \frac{\pi * D^3}{6} \quad Ecuación (6)$$

Dónde:

D= diámetro de las esfera (pie)

π = Constante adimensional 3.1416

El área está dada por:

$$A_{esfera} = \frac{\pi * D^2}{4} \quad Ecuación (7)$$

$$F_D = \frac{24}{\rho * D * V_t} * \left[\pi * \frac{D^2}{4} \right] * \rho * \frac{V_t^2}{2 * g} \quad Ecuación (8)$$

Sustituyendo las ecuaciones nos queda:

$$F_D = 3 * \pi * \mu * D * V_t \quad Ley de Stokes \quad Ecuación (9)$$

La fuerza de flotabilidad sobre una esfera por el principio de Arquímedes es:

$$F_B = (\rho_l - \rho_g) * \frac{\pi * D^3}{6} \quad Ecuación (10)$$

Dónde:

ρ_l = densidad de líquido (gr/cc)

ρ_g = Densidad del gas (gr/cc)

Cuando la fuerza de arrastre es igual a la fuerza de flotabilidad, la aceleración de las gotas es cero, debido a que la velocidad es constante, por lo tanto:

$$F_B = F_D$$

Dónde:

F_B = fuerza de flotabilidad.

F_d = fuerza de arrastre.

Igualando las ecuaciones (9) y (10) genera la siguiente igualdad:

CAPITULO 3. ECUACIONES

$$3 * \pi * \mu' * D * V_t = (\rho_l - \rho_g) * \frac{\pi * D^3}{6} \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$V_t = \frac{(\rho_l - \rho_g)}{18 * \mu'} * D^2 \quad \text{Ecuación (12)}$$

Dónde:

$$\mu' = \mu * 2.088 * 10^{-5}$$

μ = Viscosidad (Cp)

$$D = (d_m) * (3.281 * 10^{-6})$$

D_m = Relación entre el diámetro de la tubería y el diámetro de las gotas (micras).

$$\rho_l = 62.4 * G_e$$

$$PM_g = 28.97 * G_e$$

G_e = Gravedad específica, relativa al agua

Por lo tanto la ecuación (13) resulta:

$$V_t = \frac{62.4 * (\Delta G_e) * (3.281 * 10^{-6} * d_m)^2}{18 * \mu * 2.088 * 10^{-5}} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Finalmente:

$$V_t = \frac{1.78 * 10^{-6} * (\Delta G_e) * d_m^2}{\mu} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Cuando el flujo de gas que entra, la velocidad de asentamiento es aquella a la cual las partículas suspendidas viajan a través de la corriente de gas. Esta velocidad se puede utilizar para determinar el tiempo de retención requerido para que una partícula de un tamaño dado, se deposite desde la parte superior al fondo.

Tanto en los equipos verticales como en los horizontales, las velocidades altas inducen turbulencia a la corriente de gas, ocasionando que algunas partículas de líquido sean arrastradas en el flujo de gas.

3.2.2 Choque de partículas o coalescencia.

Este mecanismo de separación se emplea para la eliminación de las partículas pequeñas de un gas suspendidas en una corriente, las partículas viajan de manera vertical y chocan con el flujo de gas con.

El choque de partículas ocurre cuando dos gotas de fluidos diferentes chocan entre sí, las gotas están expuestas a un ambiente de presión y turbulencia determinada, la energía cinética, induce a que las mismas se agrupen de tal manera que se convierta en una sola es decir, existe una energía de adhesión:

CAPITULO 3. ECUACIONES

$$t = \frac{\pi}{6} * \left(\frac{d^j - (d_o)^j}{\emptyset * K_s} \right) \quad \text{Ecuación (15)}$$

Dónde:

t= Tiempo de separación (seg)

d= Tamaño final de la gota (micrón)

d_o= Tamaño inicial de la gota (micrón)

\emptyset = Fracción del volumen de la fase dispersada (adimensional)

K_s= Parámetro empírico particular del sistema

j= Parámetro empírico que siempre debe ser mayor que tres (3) y dependiente de la probabilidad de que exista un rebote entre el par de gotas antes de ocurrir la coalescencia.

Cuando la energía de oscilación es muy baja, las gotas están rebotando entre sí y el parámetro empírico “j” es cero. Como este valor debe ser estrictamente mayor que tres, asumimos el valor de cuatro (4), tomando en cuenta así el mínimo tiempo requerido, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$t = \frac{\pi}{6} * \left(\frac{d^4 - (d_o)^4}{\emptyset * K_s} \right) \quad \text{Ecuación (16)}$$

Asumiendo que d_o es el tamaño de las gotas en el rebote, la ecuación puede ser aproximada:

$$t = \frac{d^4}{2 * \emptyset * K_s} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Para la velocidad real del gas en el recipiente se toma en cuenta que el valor k es igual a k_v el valor de F_v debe ser de un 85% ya que es el factor de seguridad establecido por ASME. (Fuente)

$$j = \frac{wl}{wg} * \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho l}} \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$k_v = 0.45942 - (0.54293 * j) + [17.00791 * (j - 0.04)^2] - [237.42702 * (j - 0 - 04)^3] \quad \text{Ecuación (19)}$$

$$Vg' = k_v * \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}} \quad \text{Ecuación (20)}$$

$$v_g = F_v * Vg' \quad \text{Ecuación (21)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

Área mínima de sección transversal requerida para el flujo de gas, para satisfacer los criterios de velocidad permisible y de la misma manera se realiza para el líquido. El factor de seguridad (F_a) es de 1.2.

$$A_g' = \frac{Q_g}{v_g} \quad \text{Ecuación (22)}$$

$$a_g = F_a * A_g' \quad \text{Ecuación (23)}$$

Diámetro del recipiente se ajusta el diámetro al comercial más cercano, ($F_{20}=1000$ mm/m).

$$D' = F_{20} * \sqrt{\frac{4 * a_g}{\pi}} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Se recalcula la velocidad del gas en el recipiente con el diámetro comercial obtenido.

$$A_{g2} = \left(\frac{D'}{F_{20}}\right)^2 * \frac{\pi}{4} \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$V_g' = \frac{Q_g}{A_{g2}} \quad \text{Ecuación (26)}$$

Se calcula el diámetro de la boquilla para la entrada al equipo ($F_{20}=1000$ mm/m)

$$Ve_{min} = \frac{54.9}{\rho} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$Ve_{min} = \frac{73.2}{\rho} \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$de_{min} = F_{20} * \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * Ve_{max}}} \quad \text{Ecuación (29)}$$

$$de_{max} = F_{20} * \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * Ve_{min}}} \quad \text{Ecuación (30)}$$

El promedio entre de_{min} y de_{max} será el diámetro de la boquilla de entrada, adecuando el diámetro comercial y con el diámetro estandarizado se calcula la velocidad nuevamente de entrada.

CAPITULO 3. ECUACIONES

$$ve = \frac{4 * Q}{\pi * \left(\frac{de}{F_{20}}\right)^2} \quad \text{Ecuación (31)}$$

Se para el cálculo de los valores para las boquillas de salida máximos y mínimos, se realiza el método del paso anterior y se estandariza el diámetro con los comerciales, posteriormente se calcula la velocidad de salida.

$$V_{Sgmin} = \frac{54.9}{\sqrt{\rho_g}} \quad \text{Ecuación (32)}$$

$$V_{Sgmax} = \frac{73.2}{\sqrt{\rho_g}} \quad \text{Ecuación (33)}$$

$$d_{Sgmin} = F_{20} * \sqrt{\frac{4 * Q_g}{\pi * V_{Sgmax}}} \quad \text{Ecuación (34)}$$

$$d_{Sgmax} = F_{20} * \sqrt{\frac{4 * Q_g}{\pi * V_{Sgmin}}} \quad \text{Ecuación (35)}$$

$$V_{Sg} = \frac{4 * Q_g}{\pi * \left(\frac{d_{Sg}}{F_{20}}\right)^2} \quad \text{Ecuación (36)}$$

Este es un diámetro aproximado ya que depende del número de mamparas que tendrá el tanque, pues en cada mampara tendrá una salida del líquido hacia otro tanque. Se busca el diámetro estandarizado para la boquilla y se recalcula la velocidad.

$$V_{Slmin} = \frac{54.9}{\sqrt{\rho_l}} \quad \text{Ecuación (37)}$$

$$V_{Slmax} = \frac{73.2}{\sqrt{\rho_l}} \quad \text{Ecuación (38)}$$

$$d_{Slmin} = F_{20} * \sqrt{\frac{4 * Q_l}{\pi * V_{Slmax}}} \quad \text{Ecuación (39)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

$$d_{slmax} = F_{20} * \sqrt{\frac{4 * Q_l}{\pi * V_{slmin}}} \quad \text{Ecuación (40)}$$

$$vsl = \frac{4 * Q_l}{\pi * \left(\frac{d_{sl}}{F_{20}}\right)^2} \quad \text{Ecuación (41)}$$

Altura de retención del líquido contemplando alarmas con el diámetro estandarizado.

$$h_2 = \frac{de}{2} + 610 \quad \text{Ecuación (42)}$$

$$h_4 = (f_{20})^3 * \frac{vr}{\left(\frac{\pi}{4} * D^2\right)} \quad \text{Ecuación (43)}$$

Longitud mínima efectiva se debe analizar, según proceso para el que se va utilizar, esto influirá en la longitud mínima. ($F_{25}=1000$ mm/m), en algunos casos algunos de los datos son establecido por la norma ANSI.

$$leff = \frac{h_5 + h_4 + h_3 + de + h_2}{F_{25}} \quad \text{Ecuación (44)}$$

La relación $leff/D$ debe encontrarse en el rango de 2.5 a 5 ya que es el rango aceptado como criterio óptimo de funcionalidad operacional.

- Si el valor esta entre 2.5 y 5 la longitud encontrada es la correcta.
- Si el valor es superior a los 5 es conveniente emplear un tanque horizontal.
- Si el valor es menor a 2,5 se incrementan algunas distancias como son h_2 y h_3 hasta obtener una relación deseada.

$$f_{25} * \frac{leff}{D} \quad \text{Ecuación (45)}$$

Se recalcula la velocidad permisible pero para un tanque horizontal (K_h) el factor de seguridad es de ($F_v=85\%$).

$$K_h = 1.25 * K_v \quad \text{Ecuación (46)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

$$VG = K_h * \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}} \quad \text{Ecuación (47)}$$

$$V_g = F_v * VG \quad \text{Ecuación (48)}$$

Área de la sección transversal requerida para el flujo de gas (factor de seguridad $F_a=1.2$).

$$A_g' = \frac{Q_g}{V_g} \quad \text{Ecuación (49)}$$

$$A_g = F_a * A_g' \quad \text{Ecuación (50)}$$

Volumen de retención máximo del líquido.

$$R_h = F_{25} * \left(\frac{leff'}{D}\right) \quad \text{Ecuación (51)}$$

Diámetro del equipo se ajusta al diámetro comercial más cercano.

$$A_{Total} = 3 * A_g \quad \text{Ecuación (52)}$$

$$D' = F_{20} * \sqrt{\frac{4 * A_{tot}}{\pi}} \quad \text{Ecuación (53)}$$

$$leff = R_h * \frac{D}{F_{25}} \quad \text{Ecuación (54)}$$

Con lo que se obtenga de resultados se calcula el volumen del líquido que se va a retener dentro del tanque. Estas opciones se presentan debido a que en la mayoría de ocasiones se instalan medidores de nivel para evitar inundamiento dentro de los equipos, (F_{24} es 1 mm/m).

$$a_{nbb1-naal} = F_{24} * \frac{vr}{leff'} \quad \text{Ecuación (55)}$$

$$a_{nal-nbl} = F_{24} * \frac{Vr1}{leff'} \quad \text{Ecuación (56)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

Como una cantidad del líquido será arrastrado con el gas y otro tanto será separado, es necesario calcular el área de separación con el paso anterior, esto ayuda a conocer si el diámetro es el correcto y si es así se ajustan los datos de los niveles.

$$a_{sep} = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{D}{F_{20}}\right)^2 \quad \text{Ecuación (57)}$$

$$a_{fon-nbbl} = A_1 * a_{sep} \quad \text{Ecuación (58)}$$

(A_{vd}) está relacionado con el diámetro donde el gas va a fluir y es necesario calcularlo para poder realizar la comparación con (A_g) y determinar si el diámetro que se propuso es el correcto o hay que realizar más iteraciones.

$$A_{sep} = a_{sep} - (a_{fon-nbbl} + A_{nbbl-naal}) \quad \text{Ecuación (59)}$$

Comparación.

- Si (A_g) es igual o próximo a (A_{vd}) , el diámetro asumido en pasos anteriores es el correcto.
- Si (A_{vd}) es significativamente mayor que (A_g) el tamaño que se supuso es demasiado grande para el servicio requerido.
- Si (A_{vd}) es significativamente menor que (A_g) el tamaño del equipo que se supuso es demasiado pequeño.

$$A_g = A_{vd}$$

$$A_g \ll A_{vd}$$

$$A_g \gg A_{vd}$$

Una vez analizadas las relaciones anteriores, si se tiene cualquiera de las dos últimas, es necesario realizar iteraciones cambiando el diámetro para encontrar aquel que cumpla con lo requerido.

Las formulas siguientes nos permiten realizar el cálculo para el próximo diámetro propuesto, tomando como referencia los diámetros comerciales para facilitar los cálculos.

$$D' = \text{supuesto}$$

$$leff' = R_h * \frac{D}{F_{25}} \quad \text{Ecuación (60)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

$$a_{nbbl-naal} = F_{24} * \frac{vr}{leff'} \quad \text{Ecuación (61)}$$

$$a_{nal-nbla} = F_{24} * \frac{Vr_1}{leff'} \quad \text{Ecuación (62)}$$

$$a_{sep} = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{D}{F_{20}} \right)^2 \quad \text{Ecuación (63)}$$

$$a_{fon-nbbl} = A_1 * a_{sep} \quad \text{Ecuación (64)}$$

$$A_{vd} = a_{sep} - (a_{fon-nbbl} + A_{nbbl-naal}) \quad \text{Ecuación (65)}$$

Se vuelve a comparar con el diámetro supuesto.

$$A_g < A_{vd}$$

Se realizan la cantidad de iteraciones que sean necesarias para lograr encontrar el diámetro correcto. Una vez encontrado el diámetro se calculan las boquillas de entrada, de salida etc.

$D = \text{diametro encontrado}$

$$A_2 = \frac{a_{fon-naal}}{A_{sep}} \quad \text{Ecuación (66)}$$

$$A_{2'} = 1 - A_2$$

$R_2 = \text{tablas anexo 6}$

$$R_{2'} = 1 - R_2$$

$$h_6 = R_2 * D \quad \text{Ecuación (67)}$$

Por último se calcula la longitud total del equipo con la que se va a trabajar.

$$L = leff + \left(\frac{de + d_{sg}}{F_{25}} \right) \quad \text{Ecuación (68)}$$

3.2.3 Factores que pueden afectar el lavado y separación.

Existen muchos factores que afectan una separación en un proceso, es necesario conocer cuáles son los que se consideran más importantes y relevantes al momento de realizar un diseño eficaz del separador.

3.2.3.1 Viscosidad del gas.

El efecto de la viscosidad del gas en la separación, se puede observar en las fórmulas para determinar la velocidad de asentamiento de las partículas de líquido.

La viscosidad del gas se utiliza en el parámetro NRE, con el cual se determina el valor del coeficiente de arrastre de la Ley de Stokes, utilizada para determinar la velocidad de asentamiento de partículas de cierto diámetro. Se deduce que a medida que aumente la viscosidad del gas, disminuye la velocidad de asentamiento y por lo tanto, la capacidad de manejo de líquido del separador.*

3.2.3.2 Temperatura.

Adicionar un calentamiento al flujo entrante gas residual/ $\text{NaOH}+\text{H}_2\text{O}$ es el método opcional de separación. El aumento de la temperatura reduce la viscosidad de la fase de $\text{NaOH}+\text{H}_2\text{O}$ se debe tener presente cómo afecta la variación de la misma a la ecuación velocidad de asentamiento. Y por lo tanto, neutralizan su efecto como posible emulsificante. *

3.2.3.3 Velocidad.

Generalmente los lavadores deben tener determinado tamaño de partículas de líquido, las partículas deben permitir el flujo de gas y la separación del líquido.

Cuando se aumenta la velocidad del gas hay un incremento en el volumen manejado, porque no se separan totalmente las partículas de líquido y suelen ser arrastradas por el gas.

3.2.3.4 Presión.

En ocasiones, al disminuir la presión principalmente la de gas y condensado, la recuperación de líquidos aumenta. Sin embargo, es necesario considerar el volumen del líquido, contra la compresión extra que puede necesitarse para transportar el gas.

3.2.3.5 Tiempo de retención.

La capacidad depende principalmente del tiempo de retención del gas en el recipiente, para un buen lavado se requiere del tiempo suficiente para lograr el equilibrio entre la fase líquida y la fase gaseosa a la temperatura y presión de operación.

3.2.3.6 Relación longitud/diámetro.

Existe una constante adimensional llamada (R), que permite determinar la relación entre la longitud de costura a costura (Lss) con el diámetro. Este parámetro permite determinar el diseño más adecuado, se toma el valor de R entre valores de 3 y 4. Aunque para algunos casos específicos en diseño verticales la altura de líquido ocasiona restricciones y permite que existan valores de relación longitud/diámetro por debajo del 3.

* <http://www.gea-wiegand.com/GEAWiegand/cmsresources.nsf/filenames/P03es-GJP->

CAPITULO 3. ECUACIONES

3.2.3.7 Absorción con reacción química.

La mayor parte de procesos industriales van acompañados de una reacción química, es especialmente común la reacción en el líquido del componente absorbido y de un reactivo en el líquido absorbente, algunas veces, tanto el reactivo como el producto de la reacción son solubles.

La reacción entre el soluto absorbido y un reactivo produce dos hechos favorables a la rapidez de absorción:

- La destrucción del soluto absorbido al formar un compuesto reduce la presión parcial en el equilibrio del soluto y en consecuencia, aumenta la diferencia de concentración entre el gas y la interfase; aumenta también la rapidez de absorción.
- El coeficiente de transferencia de masa de la fase líquida aumenta en magnitud, lo cual también contribuye a incrementar la rapidez de absorción.*

3.2.3.8 Distribuidores y mamparas.

Los distribuidores o mamparas, su función primordial es retardan el flujo del gas, para lograr que el líquido entre en contacto el tiempo suficiente, obteniendo un buen lavado y la disminución de concentración en este caso.

3.3 Ecuaciones de la torre de enfriamiento.**

Las torres de enfriamiento se analizan en la base de 1 pie² de área interna. La carga de aire se toma como la velocidad del gas seco por unidad de área (G) lb/ (h) (pie²). La carga de agua en la parte superior de la torre es la velocidad del agua por unidad de superficie (L) lb/ (h) (pie²), y el agua de compensación es (L), lb/ (h) (pie²).

La carga total de calor por hora por pie cuadrado (q) es la cantidad (Q) por hora dividida por las dimensiones internas de la torre. Usando el suscrito (1) para la entrada y (2) para la salida, el balance en la torre en función de gas para un plano de referencia de 0°F es:

$$q + L_0CT_0 = G(H_2 - H_1) \quad \text{Ecuación (69)}$$

Donde (C) es el calor específico del agua y (H) es su entalpía por libra de aire seco e incluye el calor de vapor asociado con la libra de aire seco. En función de la carga de agua el balance total de calor es:

$$q = LC(T_1 - T_2) + L_0C(T_2 - T_0) \quad \text{Ecuación (70)}$$

Combinando ambas ecuaciones:

* <http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2696.pdf>

** Donald Q. Kern. 1999. Procesos de Transferencia de Calor, Mc Graw-Hill, 1ª edición 1965, 31ª impresión, México 1999, 645-813 pp

CAPITULO 3. ECUACIONES

$$G(H_2 - H_1) = LC(T_1 - T_2) + L_0CT_2 \quad \text{Ecuación (71)}$$

La cantidad de agua de compensación requerida por evaporación es:

$$L_0 = G(X_2 - X_1) \quad \text{Ecuación (72)}$$

Dividiendo la *Ecuación (70)* entre *Ecuación (71)*

$$\frac{G(H_2 - H_1)}{G(X_2 - X_1)} = \frac{LC(T_1 - T_2) + L_0CT_2}{L_0} \quad \text{Ecuación (73)}$$

$$L_0 \frac{H_2 - H_1}{(X_2 - X_1)} = LC(T_1 - T_2) + L_0CT_2 \quad \text{Ecuación (74)}$$

Combinando la *Ecuación (73)* con la *Ecuación (71)*

$$LC(T_1 + T_2) + L_0CT_2 = q + L_0CT_0 \quad \text{Ecuación (75)}$$

$$L_0 = \frac{q}{(H_2 - H_1)/(X_2 - X_1) - CT_0} \quad \text{Ecuación (76)}$$

La *Ecuación (76)* da la cantidad de agua de compensación correspondiente a cualquiera de las condiciones terminales fijas. La entalpía para el aire saturado aparece en las cartas psicométricas ordinarias. Se sugiere cautela en el uso de estas cartas, ya que invariablemente tienen diferentes planos de referencia.

Algunas emplean 0 °F y 32 °F para vapor de agua para permitir el uso de las tablas de vapor de Keenan y Keyes. Cuando se usa una sola carta, las diferencias de entalpía son lo suficientemente precisas para los cálculos de transferencia de calor.

Para la solución de todas las mezclas aire-vapor, la entalpía del aire saturado arriba de 0°F puede ser:

$$H' = X't + X'\lambda + 0.24t \quad \text{Ecuación (77)}$$

Donde 0.24 es el calor específico del aire, para aire no saturado:

$$H = Xt_{DF} + X\lambda_{DP} + 0.45X(t - t_{DP}) + 0.24t \quad \text{Ecuación (78)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

Donde 0.45 es el calor específico del vapor de agua de 0 a 120°F y el suscrito (*DP*) se refiere al punto de rocío.

Cálculo de la entalpía de aire saturado. A 75°F la presión parcial de saturación de agua es 0.4298 lb/plg²

$$\text{Humedad, } X' = \frac{p_w}{p_t - p_w} \frac{M_w}{M_a} = \frac{0.4298}{14.696 - 0.4298} X \frac{18}{29} = 0.0187 \text{ lb}_{\text{agua}}/\text{lb}_{\text{aire}}$$

Entalpía sobre °F:

$$H' = 0.0187 \times 75 + 0.0187 \times 1051.5 + 0.24 \times 75 = 39.1 \text{ Btu}/\text{bl}_{\text{aire seco}}$$

3.3.1 Transferencia de calor.

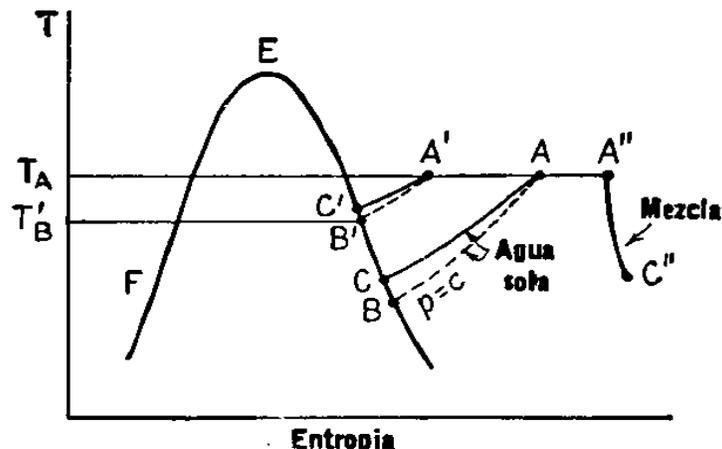


Figura 17. Relación entre las temperaturas de bulbo húmedo y punto de rocío. (Fuente: Donald Q. Kern 1999)

Refiriéndonos simplemente a la Fig.17, se puede ver el equilibrio representado por la temperatura de bulbo húmedo es influenciado por la cantidad absoluta de vapor en el aire.

La derivación del comportamiento de una torre de enfriamiento que se da en seguida es esencialmente la de Merkel. Puesto que la transferencia total de calor en una torre de enfriamiento es el paso de calor por difusión y convección del agua al aire:

$$q = qd + qc \quad \text{Ecuación (79)}$$

Donde (*qd*) Btu/(h) (pie²) es la porción transferida por difusión y (*qc*) Btu/(h) (pie²) es la que se transfiere por convección. En la definición de (*q*) debe recordarse que el área considerada por esta dimensión es el área transversal de la torre y no la superficie de transferencia de calor.

CAPITULO 3. ECUACIONES

Si (λ) es el calor latente promedio de vaporización de toda el agua que se vaporiza en la torre:

$$qd = L_0\lambda \text{ (cercanamente) } \quad \text{Ecuación (80)}$$

Combinando con la *Ecuación (70)*

$$qc = LC(T_1 - T_2) + LC(T_2 - T_0) - L_0\lambda \quad \text{Ecuación (81)}$$

Y:

$$\frac{qc}{qd} = \frac{LC(T_1 - T_2) + L_0C(T_2 - T_0) - L_0\lambda}{L_0\lambda} = \frac{LC(T_1 - T_2) + L_0C(T_2 - T_0)}{L_0\lambda} - 1 \quad \text{Ecuación (82)}$$

Pero:

$$L_0 = G(X_2 - X_1) \quad \text{Ecuación (83)}$$

Y:

$$G(H_2 - H_1) = LC(T_1 - T_2) + L_0C(T_2 - T_0) \quad \text{Ecuación (84)}$$

De lo que:

$$\frac{qc}{qd} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{H_2 - H_1}{X_2 - X_1} \right) - 1 \quad \text{Ecuación (85)}$$

Esto establece que la razón del calor transferido por convección al que se transfiere por difusión, ambos en la misma dirección, se determina por las condiciones de entrada y salida del aire, las que pueden ser conocidas o calculadas.

Mientras que *Ecuación (83)* establece las cantidades de transferencia de calor por convección y difusión, la razón de la transferencia de masa y calor ha sido fijada por el número de Lewis.

Basado en los coeficientes totales en lugar de las películas individuales, la transferencia de calor sensible del agua a una temperatura T al aire a una temperatura t está dado por:

$$dq_c = h(T - t)a dV \quad \text{Ecuación (86)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

Donde a es la superficie del agua por pie cúbico de torre, tanto de gotas como de película, y (dV) es el volumen diferencial de la torre en el que existe la superficie. De esto $a (dV = dA)$ donde A es la superficie de transferencia de calor. Si (c) es el calor húmedo del aire definido por $(c = 0.24 + 0.45X)$

$$dq_c = Gc dt \quad \text{Ecuación (87)}$$

$$dq_d = \lambda dL \quad \text{Ecuación (88)}$$

Ya que (dL) es la razón a la que el material que se difunde, el peso del flujo es:

$$\frac{1}{18}dL = K_G(p' - p)a dV \quad \text{Ecuación (89)}$$

Donde (p') es la presión parcial que corresponde a una temperatura del agua, (T) y (p) es la presión de vapor en el aire. Para todos los propósitos la humedad puede ser considerada proporcional a la presión parcial, al menos en los rangos encontrados en las aplicaciones de la torre de enfriamiento. La *Ecuación (88)* se transforma:

$$dL = K_X(X' - X)a dV \quad \text{Ecuación (90)}$$

Donde X' es la humedad a la temperatura T del agua y X es la humedad del aire. Sustituyendo en la *Ecuación (87)*

$$dq_d = K_X\lambda(X' - X)a dV \quad \text{Ecuación (91)}$$

El agua evaporada (dL) aumenta la humedad del aire por sobre el valor a la entrada por:

$$dL = GdX \quad \text{Ecuación (92)}$$

El (dq) combinado para transferencia de calor es entonces la suma de los dos modos de transferencia:

$$dq = dq_c + dq_d = h(T - t)a dV + K_X\lambda(X' - X)a dV \quad \text{Ecuación (93)}$$

Y:

$$dq = GdH \quad \text{Ecuación (94)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

La *Ecuación* (94) puede combinarse en la *Ecuación* (93), ya que expresa el total de transferencia de calor en el sistema en unidades de calor solamente.

Usando un valor promedio para el calor húmedo (c) y el calor latente (λ), despreciando el sobrecalentamiento, todo lo cual es permitido en los rangos relativamente cortos en los que las torres de enfriamiento operan para una mezcla de aire-agua consistiendo en 1 lb de aire y (X) lb de vapor de agua:

$$H = 1ct + \lambda X \quad \text{Ecuación (95)}$$

$$GdH = G(cdt + XdX) \quad \text{Ecuación (96)}$$

Reagrupando *Ecuación* (93):

$$dq = K_x \left[\left(\frac{hT}{K_x} + \lambda X' \right) - \left(\frac{ht}{K_x} + \lambda X \right) \right] \quad \text{Ecuación (97)}$$

Sustituyendo el siguiente termino $c(T - t)$ en *Ecuación* (97)

$$dq = K_x a dV \left[(cT + XX') - (ct + \lambda X) + c(T - t) \left(\frac{h}{K_x c} - 1 \right) \right] \quad \text{Ecuación (98)}$$

Sustituya la *Ecuación* (95) en la *Ecuación* (98)

$$dq = K_x a dV \left[(H' - H) + c(T - t) \left(\frac{h}{K_x c} - 1 \right) \right] \quad \text{Ecuación (99)}$$

(dq) puede expresarse en términos de la disminución de la entalpía de la cantidad total de agua o el aumento de entalpía de la mezcla total de aire, ambas son iguales:

$$dq = d(LCT) = G dH \quad \text{Ecuación (100)}$$

La carga de gas (G) permanece constante a través de la torre, debido a que está basada únicamente en el gas seco. La carga líquida no es constante, debido a la evaporación de agua en el aire seco. Las pérdidas de saturación del agua al aire ascienden a menos de 2% del agua circulada a la torre y pueden ser consideradas constantes:

$$d(LCT) = LC dT \quad \text{Ecuación (101)}$$

$$LC dT = G dH \quad \text{Ecuación (102)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

VAPOR	$\frac{h}{K_X}$	Calculo de la analogía de chilton-colbum $\frac{h}{K_X c} = \frac{(\mu/pk_d)^{2/3}}{(c\mu/k)^{2/3}} = \left(\frac{k}{c_p k_d}\right)^{2/3} = 1$
1. Benceno	0.41	0.44
2. Tetracloruro de carbono	0.44	0.49
3. Clorobenceno	0.44	0.48
4. Acetato de etilo	0.42	0.46
5. Tetracloruro de etilo	0.50	0.51
6. Tolueno	0.44	0.47
7. Agua	0.26	0.21

Tabla 3. Valores promedio DE h/K_X cálculos de temperatura de bulbo húmedo. (Elaboro Osvaldo Carrillo Castelán con datos obtenidos James R. Welty 2ª edición).

En la tabla 3 para el agua que se difunde en el aire, el número de Lewis es aproximadamente $\left(\frac{h}{K_X c}\right) = 1$, y el último término de la *Ecuación* (98) se desvanece, así:

$$LC dT = G dH = K_X(H' - H)a dV \quad \text{Ecuación (103)}$$

Introduciendo el equivalente de la tasa de transferencia de masa ($K_X = h/c$), ambos modos de transferencia de calor pueden combinarse, por el uso de cualquiera de los coeficientes, dependiendo del que sea más fácil obtener.

En realidad $\left(\frac{h}{K_X c}\right)$ para el sistema aire-agua no es 1.0 como lo predice el número de Lewis, en otras literaturas el número de Lewis está cerca de 0.9. La *Ecuación* (103) se evalúa siempre de los potenciales de difusión, lo que significa que únicamente los coeficientes de transferencia de calor por convección presentan error si se usan los valores teóricos del número de Lewis.

La transferencia de calor por convección sólo representa menos de 20% de la carga térmica total. La derivación de ecuaciones sin la conveniente simplificación de que el número de Lewis es igual a 1.0.

La *Ecuación* (102) es la clave para el cálculo del diseño y el análisis del comportamiento de las torres de enfriamiento, (K_X) es el término de la tasa de transferencia total análogo a (U_c) en los intercambiadores y debe recordarse que no hay factor de obstrucción para transferencia de calor por contacto directo.

CAPITULO 3. ECUACIONES

En los intercambiadores tubulares la superficie de transferencia de calor usualmente se conoce o puede calcularse. En las torres de enfriamiento de agua el valor de (a) no puede determinarse directamente, ya que está compuesto de disposiciones al azar de gotas y superficie de película.

La superficie de la película es casi independiente del espesor de la misma, mientras que la superficie de las gotas depende tanto de la porción del líquido que forman las gotas como del tamaño promedio.

En una torre de caída interrumpida hay otros factores que considerar, el cálculo es determinado por producto de $(K_x a)$ como factor para un tipo particular de empaque a flujos específicos o para el tipo de fluidos que componen el sistema.

En el desarrollo de la teoría de difusión, el número de unidades de transferencia (n_t) se obtiene de la Ecuación: $n_t = \int \frac{dy}{y-y'} = K_G a \frac{V}{G_m}$, esta provee un medio útil de determinar el trabajo que debe efectuarse para lograr transferir una cantidad requerida de masa mediante difusión.

Para un tipo particular de empaque, si se conoce la altura de la unidad de transferencia (HTU) , siendo la altura total de la torre requerida para esta área por pie cuadrado de sección transversal, se obtiene por el producto de $n_t (HTU)$. Para los cálculos de absorción las unidades de moles y atmósferas son convenientes, pero para la transferencia de calor por difusión es más conveniente usar la libra.

La Ecuación (103) es análoga a la Ecuación: $G_m dy = K_G \rho_t (y - y') dA$, excepto que la porción de los (Btu) totales transferidos por calor sensible, tiene primero que convertirse por el número de Lewis, a una cantidad equivalente de (Btu) de transferencia de masa y luego combinarse con la transferencia de masa real, ya que es una proporción fija de ella. Consecuentemente, (GdH) es la transferencia total de calor en la torre de difusión.

Reacomodando la Ecuación (103):

$$\int \frac{dH}{H' - H} = K_x a \frac{V}{G} \quad \text{Ecuación (104)}$$

$$n_d = \int \frac{dT}{H' - H} = K_x a \frac{V}{L} \quad \text{Ecuación (105)}$$

Mientras que la Ecuación (103) se asemeja a la Ecuación: $n_t = \int \frac{dy}{y-y'} = K_G a \frac{V}{G_m}$ excepto por sus dimensiones, no es muy conveniente, usarse en el cálculo de torres de enfriamiento donde el interés principal se sitúa en la temperatura del agua producida.

CAPITULO 3. ECUACIONES

La *Ecuación* (103) puede transformarse a la *Ecuación* (104) cuando se multiplica por la razón $\left(\frac{G}{L}\right)$ y recordando que ($C = 1.0$) para el agua. Es más conveniente usar la *Ecuación* (104), cuyo valor se llamará *número de unidades de difusión* (n_d) para evitar confusión con el número de unidad de transferencia (n_t).

Si se conoce la altura de una unidad de difusión (H_{DU}) para un tipo dado de empaque, la altura total requerida para la torre para un servicio dado puede entonces calcularse.

3.3.2 Determinación del número de unidades de difusión.

El número de unidades de difusión calculado por la *Ecuación* (104) es igual a $\int dT/(H' - H)$ y está determinado únicamente, por las condiciones de proceso impuestas a la torre y no por el comportamiento propio de la torre.

El (H_{DU}) se pueden obtener experimentalmente, se deben poner en contacto una cantidad de agua a una temperatura de entrada determinada y una cantidad de aire a un bulbo húmedo dado, se requerirá cierto número de unidades de difusión, de acuerdo como se determine por la integración de la *Ecuación* (104) para reducir el agua a cualquier temperatura deseada.

El número de unidades de difusión obtenido se requiere en cualquier tipo de torre, ya sea empacada o vacía, la altura de la torre es capaz de proveer de un número predeterminado de unidades de difusión, es variante para cada tipo de empaque y con las cargas de líquido-gas.

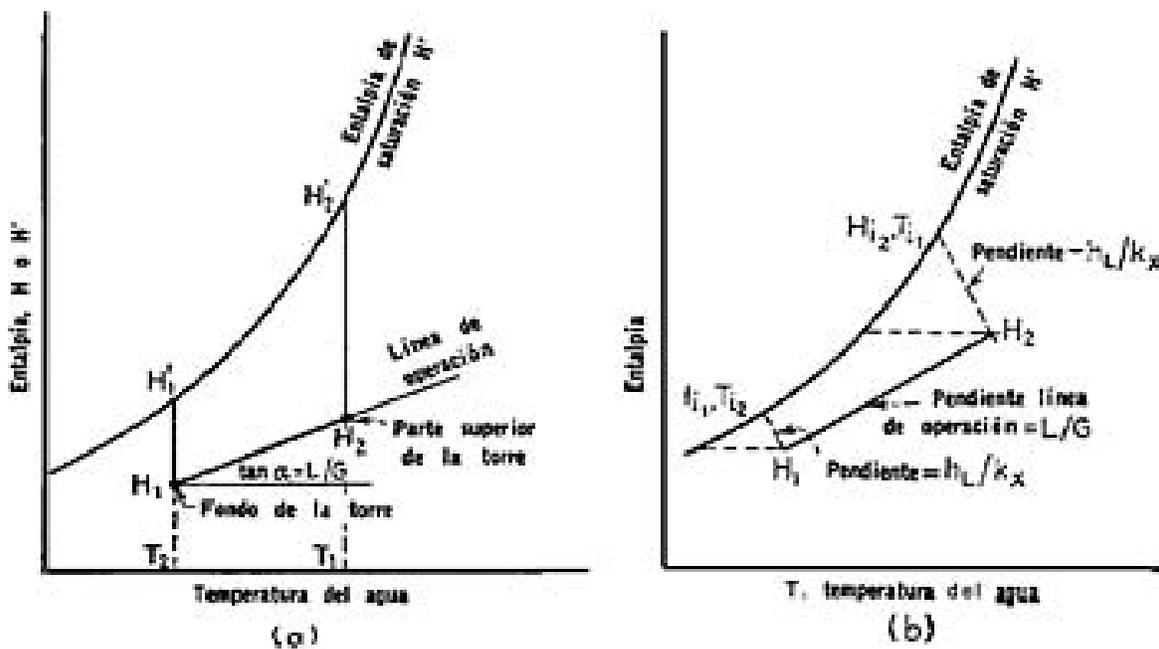


Figura 18. Graficas de temperatura del agua vs entalpia. (Fuente: Donald Q. Kern 1999).

CAPITULO 3. ECUACIONES

Puesto que la temperatura (T') del agua no es una función simple de (H' y H), es más conveniente efectuar la integración de la *Ecuación* (104) por medios gráficos o numéricos.

Refiriéndonos a la figura 18-a, las entalpías de saturación tabuladas (H') para el aire se grafican en contra de la temperatura del agua (T) en el rango de la torre.

Los valores de saturación de (H') forman una curva, siendo los valores del aire saturado a la temperatura del agua y los que se pueden considerar que existen en la película de aire en la superficie del agua.

Ya que las entalpías de saturación también incluyen las humedades de saturación, esta línea es equivalente a la presión de vapor del agua, fuera de ésta. El siguiente requerimiento es determinar la entalpía actual en cualquier punto de la torre.

La *Ecuación* (101) establece que ($LCdT = GdH$), donde ($C = 1.0$) para el agua, relaciona el cambio de entalpía en la fase gas (dH) al cambio de temperatura del agua (dT) que la acompaña en contacto con el gas, este cambio puede representarse reacomodando la *Ecuación* (101) para dar:

$$\frac{L}{G} = \frac{dH}{dT} \quad \text{Ecuación (106)}$$

Es una ecuación de línea recta en la figura 19-a cuya pendiente, es la razón de la carga del líquido a la de aire (L/G), el valor de (H) en cualquier punto de la línea de operación está dado por:

$$H_2 = H_1 + \frac{L}{G}(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación (107)}$$

Ya que la entalpía del aire a la entrada (H), se conoce o se puede determinar.

Como una ayuda visual deberá aclararse que el área en la gráfica, entre la curva de saturación y la línea de operación es una indicación del potencial que promueve la transferencia total de calor, un cambio en las condiciones de proceso, de tal manera que la línea de operación se mueva hacia abajo para incluir una mayor área entre ella misma y la línea de saturación, significa que menos unidades de difusión y una menor altura se requieren para cualquier tipo de torre.

A cualquier temperatura (T) en la columna entre (T_1 y T_2), el potencial que impulsa al calor fuera de la película saturada en la superficie del agua hacia el aire saturado es la diferencia entre el valor de (H') y (H) en ese punto.

Tomando pequeños incrementos de (T) y dividiendo por la diferencia promedio de ($H' - H$), se obtiene el número de unidades de difusión requeridos para el cambio en la temperatura del agua.

CAPITULO 3. ECUACIONES

Los incrementos al sumarse, generan el cambio total de la temperatura del agua da el valor total de (n_d) , como ya se mencionó, el punto de partida de la línea de operación (H) , se obtiene de la condición del aire atmosférico que entra a la torre por la parte inferior.

Cuando el número de unidades de difusión se obtiene de la *Ecuación* (103) en lugar de la *Ecuación* (102), $(H' - H)$ pueden obtenerse como la media logarítmica de la diferencia de entalpías en la parte superior e inferior de la torre.

En la figura 19-a esto es equivalente a tomar el área entre la línea de operación y una línea recta trazada entre $(H_1$ y $H_2)$. Para obtener el número de unidades de difusión de $\int dH / (H' - H)$, se multiplica por $\left(\frac{G}{L}\right)$.

3.3.3 Corrección para la resistencia de la película.

De las *Ecuación* (69) a (105) la derivación se basó en la suposición de que el coeficiente total y el coeficiente del lado del gas eran idénticos, implica que la película del líquido no ofrece ninguna resistencia significativa a la difusión y que el lado del gas es el controlante.

Al escribir la *Ecuación* (85) se supuso que (h) era idéntico con (h_G) , el cual es el coeficiente de transferencia de calor desde líquido-película-película del aire-interface aire.

Cuando hay una resistencia líquido-película apreciable, (h) en la *Ecuación* (85) deberá escribirse correctamente como un coeficiente total (U) , puesto que es la resultante de $(h_G$ y $h_L)$, este último es el coeficiente de convección desde la película del líquido a la interface, (h) sin suscrito se retendrá para las aplicaciones de torres de enfriamiento en lugar de (U) debido a que así es consistente.

Para la correlación actual cuando hay una resistencia liquido-película, la *Ecuación* (85) queda:

$$LC dT = h_L(T - T_i)a dV \quad \text{Ecuación (108)}$$

Es la tasa de transferencia del cuerpo del líquido a través de la película del líquido hacia la interface líquido-aire, la razón de transferencia de calor sensible de la interface a través de la película del gas a la masa de este último está dada por

$$Gc dt = h_G(T_i - t)a dV \quad \text{Ecuación (109)}$$

El análogo de la *Ecuación* (102) puede obtenerse en términos de la interface.

$$G dX = K_X(X_i - X) \quad \text{Ecuación (110)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

Aplicando el número de Lewis ($h_G/K_X c = 1$), donde (K_X) es el coeficiente de difusión del lado del gas:

$$GdH = K_X(H_i - H)a dV \quad \text{Ecuación (111)}$$

Igualando *Ecuación* (85) y (102) da:

$$\frac{h_L}{K_X} = \frac{H_i - H}{T_i - T} \quad \text{Ecuación (112)}$$

Refiriéndonos a la figura 18-b se dibuja una línea de pendiente negativa (h_L/h_X), desde cada uno de los puntos terminales de la línea de operación y el potencial es el área incluida entre la línea de saturación, la línea de operación, y las dos líneas de pendiente negativa. Los valores de interface de entalpías y temperaturas se marcan consecuentemente, las condiciones de proceso para las torres de enfriamiento. Desde el punto de vista de corrosión de tubos, 50°C es la máxima temperatura a la que el agua de enfriamiento emerge ordinariamente de los equipos tubulares.

3.3.4 Coeficientes de humidificación.

Debido al desarrollo de los cálculos modernos de difusión a partir de las prácticas de absorción en las industrias químicas, muchos de los datos se presentan como gráficas de ($K_G a$ VS G) para sistemas en los cuales la película del gas es la controlante.

Este método parece que se está desplazando por las gráficas de (HTU VS G). Colburn ha recalculado muchos de los datos originales en esta base. La relación entre (HTU) y ($K_G a$) es:

$$HTU = \frac{Z}{K_G a} \frac{V}{G} \quad \text{Ecuación (113)}$$

Donde (Z) es la altura total que contiene (n_t) unidades de transferencia, ambos cálculos se basan en el uso de libras-mol de agua transferida y el potencial impulsor se expresa en atmósferas. Al emplear estas unidades en los cálculos de humidificación, puesto que las libras de agua transferidas y el potencial impulsor en unidades de humedad son muy convenientes. Hasta ahora no ha aparecido en la literatura datos en los que (HDU), la altura de una unidad de difusión, se grafique en contra de (G) para la humidificación de aire, pero han aparecido datos con ($K_X a$) graficado contra (G).

La relación entre (HDU) y ($K_X a$) es:

$$HTU = \frac{Z}{K_X a} \frac{V}{L} \quad \text{Ecuación (114)}$$



CAPITULO 3. ECUACIONES

Con la relación entre $(K_X a)$ y $(K_G a)$ puede obtenerse de la *Ecuación*: $(K_X = K_G P_{Bm} M_b)$, (HDU) o $(K_X a)$ son las características del comportamiento de un relleno dado o empaque, y (n_d) es el tamaño requerido para cumplir con las condiciones de proceso. En el caso de torres empacadas que contienen pequeños objetos es posible reportar los datos sobre un amplio rango mediante una ecuación de la forma:

$$K_X a = C_1 G^r \quad \text{Ecuación (115)}$$

Si el valor de $(K_X a)$ se multiplica por la razón $(\frac{V}{L})$, se puede obtener el número de unidades de difusión en una altura dada, puesto que $V = 1Z$.

Si una torre está en operación y se desea determinar sus características de comportamiento tales como (HDU) o $(K_X a)$, el número de unidades de difusión características debe calcularse de las temperaturas de entrada, salida, humedades y gastos de flujo. La altura total empacada o rellena dividida por el valor de (n_d) calculada de los datos observados dará (HDU) .

Los datos disponibles únicamente son para los anillos Raschig y sillas de montar (Berl saddles), ya que otro tipo de empaque o relleno está menos estandarizado y algunas veces son difíciles de reproducir.

Características de humidificación: anillos Raschig y sillas de montar Berl.

$$K_X a = C_1 G^r \quad \text{Ecuación (116)}$$

donde carga de gas, $G = lb/(h)$ (pie^2 area de piso)

carga líquida, $L = lb/(h)$ (pie^2 area de piso)

$$K_X a = \frac{lb}{h} \left(\frac{lb}{lb} \right) \text{potencial} \quad \text{Ecuación (117)}$$

CAPITULO 3. ECUACIONES

Empaque, plg	Profundidad, plg	L	G	γ	K_{Xa}	CL
1 Raschig	24	500	250	0.50	226	14.3
		1500	250	0.50	468	29.6
		3000	250	0.50	635	40.2
1 ½ Raschig	20.6	500	250	0.43	208	19.4
		1500	250	0.55	370	17.9
		3000	250	0.60	445	16.4
2 Raschig	19.1	500	250	0.47	190	14.3
		1500	250	0.54	301	15.3
		3000	250	0.53	351	18.9
½ Berl	15.5	500	250	0.61	320	11.1
		1500	250	0.61	468	16.3
		3000	250	0.61	595	20.7
1 Berl	20.3	500	250	0.42	245	24.2
		1500	250	0.50	464	29.4
		3000	250	0.69	569	12.7
1 ½ Berl	22	500	250	0.52	200	11.4
		1500	250	0.52	305	17.4
		3000	250	0.52	383	21.8

Tabla 4. Datos de comportamientos de rellenos para torres. (Fuente: Donald Q. Kern 1999).

Los datos de rellenos que producen gotas no pueden reproducirse tan fácilmente como los empaques que dan películas, puesto que la superficie total de la gota cambia apreciablemente con el número de gotas formadas. Esto a su vez está influenciado por la carga líquida.

Los gases calientes provenientes del horno a una temperatura aproximada de 1200 °C (TH), deben ser enfriados hasta alcanzar el valor adecuado (50 °C), para que se produzcan las reacciones de absorción en el lavador (TS), esto se logra haciendo pasar el efluente gaseoso a través de una lluvia de la disolución provista por una serie de rociadores en la parte superior del lavador.

Como se mencionó anteriormente además de lograr el descenso de la temperatura de los gases, parte del material particulado es retenido por las gotas de agua.

En donde la capacidad calorífica de la mezcla de gases se calcula según la siguiente ecuación teniendo en cuenta las fracciones molares de cada uno de los constituyentes en el efluente gaseoso

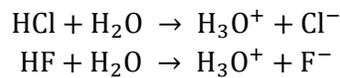
CAPITULO 3. ECUACIONES

$$(C_p)_{mez} = \sum_{i=1}^c y_j c_{pj} \quad Ecuacion (118)$$

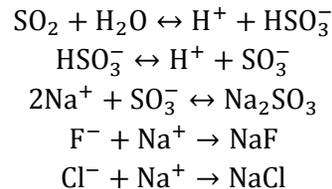
En el enfriador, los efluentes líquidos de características ácidas con cierta cantidad de lodos debido al material particulado que es retenido, salen y se juntan con el efluente proveniente del lavador que tiene características alcalinas produciéndose un proceso de neutralización.

En general, como líquido de lavado se puede emplear una solución de algún reactivo con características alcalinas en agua. Dentro de los reactivos pueden utilizarse NaOH, NaHCO₃, Na₂CO₃, Ca(OH)₂, Ca(HCO₃)₂ etc. La elección del mismo dependerá de distintos factores como reactividad, solubilidad en agua, costo, propiedades corrosivas, solubilidad de los productos de reacción etc.

Los gases ácidos son retenidos por la disolución empleada para el enfriamiento de la corriente gaseosa en el enfriador de acuerdo a las siguientes reacciones:



La solución de lavado en el lavador produce la absorción de los gases remanentes, se muestran a continuación algunas de las reacciones que se llevan a cabo empleando por ejemplo un reactivo de características sódicas:



Los compuestos sódicos presentan mayor solubilidad y son más reactivos, obteniéndose mejores rendimientos, además los productos de las reacciones presentan alta solubilidad lo que facilita su tratamiento posterior. Los reactivos cálcicos presentan una menor solubilidad en agua, a su vez los productos resultantes de las reacciones en el lavador también tienen baja solubilidad.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 Incinerador.

En la siguiente tabla se muestran los resultados para la parte del incinerador, recordando que ya es un equipo que se encuentra instalado en la FES Zaragoza.

Parámetro	Resultado
Horas a laborar por día	5 horas
Cantidad de residuos al día	1200 kg
Capacidad mínima necesaria por hora	240 kg
Capacidad total al año	312 toneladas
Poder calorífico Inferior	2054.22 Kcal/kg
Poder calorífico del combustible	6.350 Kcal/Kg
Flujo másico de aire con 200% de oxígeno en exceso	8.2426 Kg/h
Eficiencia del incinerador	98.9787

Tabla 4. Resultados del incinerador. (Elaboro Alvarez Herrera Dulce Nataly con datos del cálculo).

4.2 Lavador de gases.

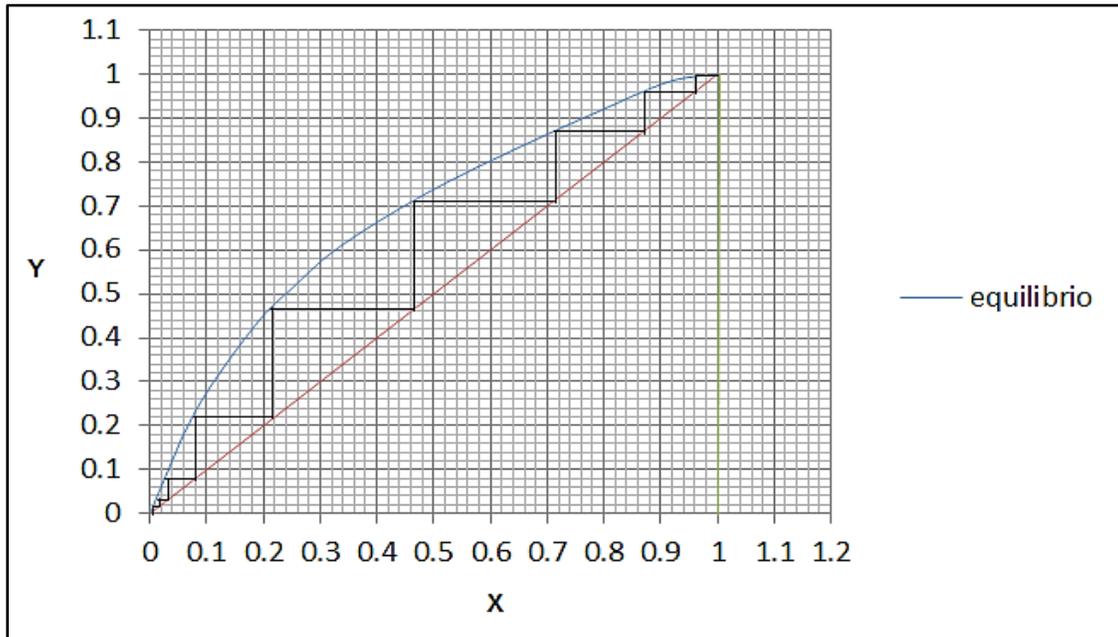
La tabla presenta las características de dimensionamiento del lavador de gases, que nos permite cumplir con la reducción de emisiones de gases contaminantes para el cumplimiento de la Norma, este equipo aún no se encuentra en la institución.

Datos finales del lavador.	
Diámetro del gas	54 in o 1.372 m
Velocidad del gas	5.7641 ft/s o 1.7568 m/s
Diámetro de la boquilla de entrada para el gas	10 in o 25.6 cm
Diámetro de boquilla de salida para el gas	8 in o 20.32 cm
Velocidad de salida del gas	3.571 ft/s o 1.0884 m/s
Diámetro de boquillas de entrada del liquido	24 in o 0.6096 m
Diámetro de boquilla de salida para el liquido	2 in o 5.08 cm
Velocidad de salida del liquido	4.167 ft/s o 1.2701 m/s
Longitud total del lavador	11.7126 ft o 3.57 m

Tabla 5. Resultados de las dimensiones del lavador de gases (Elaboro Carrillo Castelán Osvaldo).

CAPITULO 4. RESULTADOS

La grafica representa el número de mamparas que tendrá internamente el lavador de gases, para que el gas tenga el tiempo de retención suficiente dentro del equipo, así mismo lograr la reducción de la concentración de los gases contaminantes.



Grafica 1. Presenta el número de mamparas requeridas para la reducción de la concentración. (Elaboro Alvarez Herrera Dulce Nataly en base a los resultados de los cálculos).

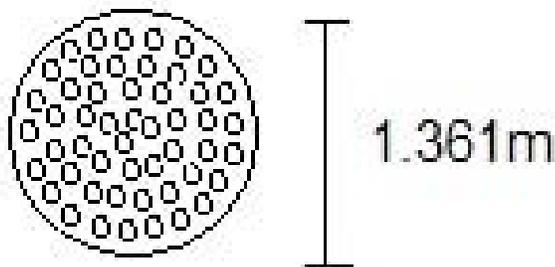


Figura 19. Muestra el distribuidor de flujo que se encontrara en la parte interna del lavador.

Requerimientos.	Datos finales
Numero de agujeros	157
Diámetro	5 mm
Distancia entre agujeros	25 mm
Zona muerta en las orillas	75 mm

Tabla 5. Muestra las dimensiones del distribuidor de flujo (Elaboro Carrillo Castelán Osvaldo con datos de la base de cálculos).

CAPITULO 4. RESULTADOS

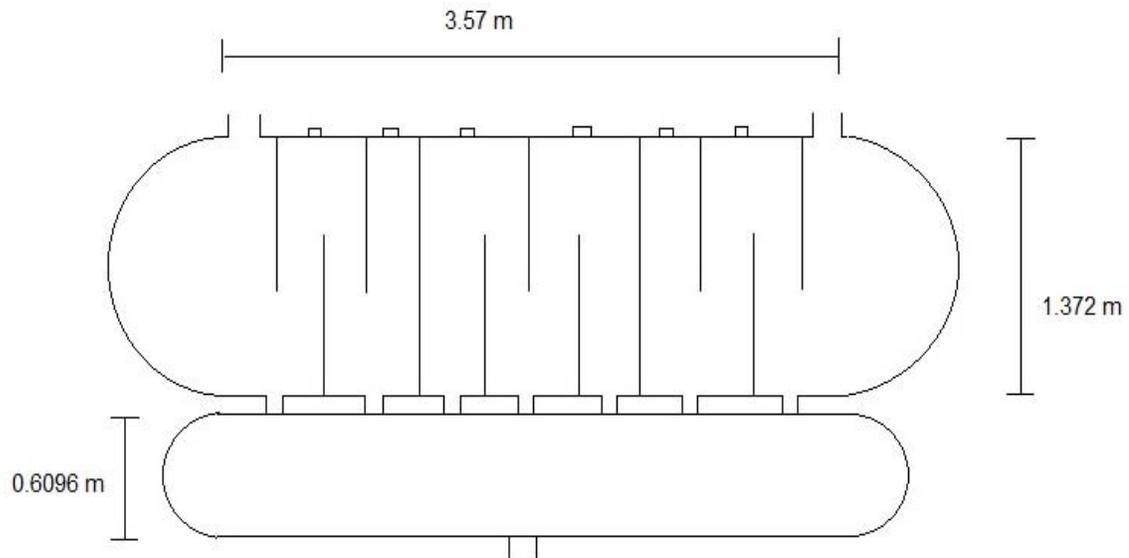


Figura 20. Muestra el arreglo interno del lavador de gases y tanque captador del líquido. (Elaboro Alvarez Herrera Dulce Nataly con base en los resultados obtenidos del diseño).

4.3 Torre de enfriamiento.

En la siguiente tabla se hace referencia a la capacidad calorífica de la disolución proveniente de la torre de enfriamiento y la capacidad de calorífica de los gases, los resultados nos muestran la temperatura final después del lavado.

Datos	Cantidad
Cp H ₂ O+NaOH=	3.01
Cp de gases=	4.344
T _f (Celsius)	45.009

Tabla 6. Datos finales del intercambio de calor y la temperatura final. (Elaboro Carrillo Castelán Osvaldo con datos de lavase de cálculos).

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.4 Concentraciones de los gases para ser liberados al ambiente y formularios de inscripción para la regulación del proceso

Parámetro analizado	Concentraciones de entrada al sistema gases (mg/m ³)	Concentraciones a la salida del sistema de neutralización de gases (mg/m ³)	Concentraciones límites (mg/m ³)
Material particulado	2400	7.5	250
NO _x	946593.205	95.13	300
SO _x	1262778.34	7.31	80
CO	441809.954	15.3	63
HCL y Cl ₂	575110.0582	9.51	15
Dioxinas y furanos EQT	9904895.87	0.09	0.2
CO ₂	694182.652	97	-

Tabla 7. Datos finales de concentración para los gases que serán emitidos al ambiente. (Elaboro Carrillo Castelán Osvaldo con los datos obtenidos de la base de cálculos).

Para evaluar todo el cumplimiento normativo es necesario crear las bitácoras de operación y mantenimiento para cada uno de los equipos, pero para poder operar de manera formal y sin tener problemas en afectación a los alrededores y con el Gobierno de la ciudad de México, se requiere obtener la cedula de operación anual y la licencia ambiental única, son parte del proceso de regulación de emisiones al ambiente.

La licencia no tiene vigencia, esta se emite por única vez y en forma definitiva una vez resuelto el trámite. Si se llega a cambiar el giro industrial o la localización del establecimiento, la Licencia otorgada quedará sin efectos y deberá solicitarse nuevamente. No obstante lo anterior, será obligación de quien cuente con la Licencia Ambiental Única Federal, la presentación de la Cédula de Operación Anual ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Para los establecimientos de jurisdicción federal que cuenten con Licencia de Funcionamiento emitida por la Federación (Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología) antes del año 2000, es opcional el trámite de la Licencia Ambiental Única, para los establecimientos que se instalen posteriormente al año 2000 será necesario que cuenten con la Licencia Ambiental Única Federal.

CAPITULO 4. RESULTADOS.

CEDULA DE OPERACION ANUAL 20

DATOS DE REGISTRO (CONTINUACION)

10) DOMICILIO DEL ESTABLECIMIENTO Centro Poblado () Parque o Puerto Industrial () Otros () Especifique parque o puerto industrial u otros: _____ Calle (además indicar entre qué calles o punto de referencia): _____ No. exterior y No. interior o No. de manzana y lote: _____ Colonia: _____ Código Postal: _____ Localidad (excepto D.F.): _____ Municipio o Delegación: _____ Entidad Federativa: _____ Teléfonos (incluirl clave de larga distancia): _____ Fax (incluirl clave de larga distancia): _____ Correo (s) electrónico (s): _____			
11) DOMICILIO Y OTROS MEDIOS PARA OIR Y RECIBIR NOTIFICACIONES (Sólo en caso de ser diferente al del establecimiento) Calle (además indicar entre qué calles o punto de referencia): _____ No. exterior y No. interior o No. de manzana y lote: _____ Colonia: _____ Código Postal: _____ Localidad (excepto D.F.): _____ Municipio o Delegación: _____ Entidad Federativa: _____ Teléfonos (incluirl clave de larga distancia): _____ Fax (incluirl clave de larga distancia): _____ Correo (s) electrónico (s): _____			
12) UBICACION GEOGRAFICA Coordenadas UTM: X = _____ (m) Y = _____ (m) o ALTITUD _____ Coordenadas Geográficas: _____ Latitud Norte: _____ grados _____ minutos _____ segundos Longitud Oeste: _____ grados _____ minutos _____ segundos Indicar las coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) o geográficas. El Programa de Reporte de la COA genera automáticamente las unidades UTM. Para mayor información de coordenadas cartográficas UTM y Zona UTM consultar el Capítulo 5 (Apartado 5.2) del Instructivo para la elaboración de la COA.		13) PERSONAL No. total de empleados administrativos: _____ No. total de obreros en planta: _____	14) HORAS Y SEMANAS DE TRABAJO EN PLANTA Lunes a Viernes _____ horas/día Sábado _____ horas/día Domingo _____ horas/día Semanas/año _____
15) FECHA DE INICIO DE OPERACION DE LA PLANTA: Día _____ Mes _____ Año _____		16) PARTICIPACION DE CAPITAL: Sólo nacional () Mayoría nacional () Mayoría extranjero () Sólo extranjero ()	
17) DATOS DEL ULTIMO CAMBIO DE NOMBRE O RAZON SOCIAL Fecha de cambio: Día _____ Mes _____ Año _____		Nombre anterior: _____ RUPA o NRA anterior: _____	
18) CAMARA A LA QUE PERTENECE Y NUMERO DE REGISTRO:	19) DATOS DE LA COMPAÑIA MATRIZ O CORPORATIVO Nombre: _____ Ubicación: País _____ Estado o Provincia _____ Número Dun and Bradstreet _____		20) NUMERO DUN AND BRADSTREET DEL ESTABLECIMIENTO. Sólo en caso de contar con este número (para mayor información consultar el Apartado 5.3 del Instructivo para la elaboración de la COA).

Figura 21. Muestra la cedula de operación anual (Fuente: <https://www.google.com.mx/search?q=cedula+de+operacion+anual&biw=1951&bih>)

Diagrama del Procedimiento del Trámite de la Cédula de Operación Anual

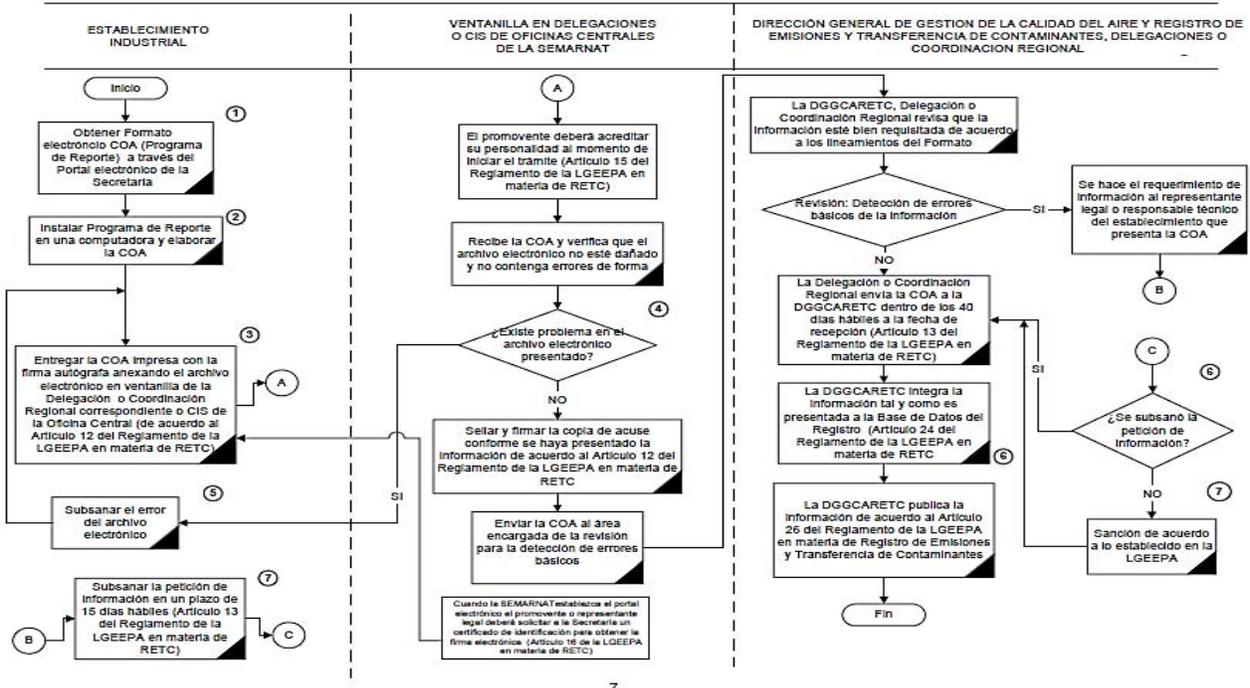


Diagrama 2. Es el procedimiento que se necesita para que el proceso sea regulado por la SEMARNAT. (Fuente <http://www.cofemermir.gob.mx/mir/uploadtests/4849.59.59.2.Instructivo%20COA.pdf>)



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base al diseño realizado, se puede concluir que el lavador con las características antes mencionadas logra la conformidad de la norma NOM-098-SEMARNAT-2002, en los límites de emisiones de gases contaminantes y la temperatura de los mismos, una vez que nuestro proceso cumple con lo establecido por dicha norma, al ser instalado se deben realizar las bitácoras para cada uno de los equipos serán monitoreados constantemente para asegurar que no se esté causando daño al ambiente y para la planeación del mantenimiento.

Una vez que se tienen las bitácoras se necesita, la Cédula de Operación Anual (COA) es el instrumento de reporte y recopilación de información de emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, materiales y residuos peligrosos, de conformidad, aplicable a grandes generadores de residuos peligrosos y los prestadores de servicios de manejo de residuos peligrosos, quienes realizan actividades de: centros de acopio, reutilización reciclaje, coprocesamiento, incineración, tratamiento por inyección profunda, tratamiento de suelos contaminados, instalaciones de disposición final y transporte.

Para lograr que se opere de manera regular es necesario obtener la licencia ambiental única que es aplicable para los establecimientos que cuentan con fuentes fijas que no son de jurisdicción federal, pero cuentan con Licencia de Funcionamiento Federal, deberán solicitar ante la Delegación Federal de SEMARNAT correspondiente, o en su caso en la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, la cancelación de dicha licencia, y realizar las gestiones necesarias a fin de obtener las autorizaciones estatales o municipales aplicables.

La cedula se obtiene por que se da el tratamiento y el diseño está cumpliendo con los parámetros establecidos, el muestre, monitoreo y emisión de contaminantes.

Al implementar este diseño se recomienda incinerar otro tipo de residuos no solo con fines prácticos para los alumnos, si no la idea a corto plazo es lograr obtener recursos proporcionando un servicio para las instituciones de salud y para las viviendas de los alrededores de la facultad, por ejemplo en la reducción de los infecciosos y medicamentos caducos.

Otra recomendación es para los subproductos generados del lavado, las cenizas resultantes y los lodos que se logren formar, se plantea que los alumnos lo utilicen en la práctica de filtro-prensa, otra opción es integrarlos al ambiente como ya que sus concentraciones en contaminantes, fue reducida durante el lavado.

Una de las alternativas de recomendación para el ahorro de combustible es utilizar, la aluminotermia (así como otros métodos de óxido reducción que liberan energía calorífica) como ayuda dentro del proceso de incineración, para metales y aleaciones para producir óxidos, en el que el metal de aluminio se utiliza como un agente reductor.

Para ser reducida de óxido de metal mezclado con polvo de aluminio o de magnesio en polvo y la reacción por calentamiento se inicia. La oxidación del aluminio produce más calor que se consume por la reducción de óxido mixto, el exceso de calor del metal reducido se funde, siendo tremendamente exotérmica.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a que el calor de formación del Óxido de Aluminio es mucho mayor que el de la mayoría de los demás óxidos metálicos, la mezcla el óxido metálico con polvo de aluminio se llama termita, si el óxido es de hierro; en la combustión se oxida el aluminio se reduce el óxido a metal.

La finalidad de implementar el proceso de incineración como medida de reducción para los residuos es que los alumnos, estén en contacto con las operaciones unitarias, también que separen los residuos de manera adecuada y formen un criterio del cuidado del ambiente bajo las normas establecidas en el país.

BIBLIOGRAFIAS

- Donald Q. Kern. 1999. Procesos de Transferencia de Calor, Mc Graw-Hill, 1ª edición 1965, 31ª impresión, México 1999, 645-813 pp.
- James R. Welty, Charles E. Wicks, Robert E. Wilson 1969. Fundamentos de Transferencia de Momentum, Calor y Masa; Limusa Wiley, 2ª edición 1999, 245-770pp.
- Lanier, W. S., 1998. Control of Dioxin and Furan Emissions from Waste Combustion System. Foro internacional de incineración de residuos peligrosos México D.F. Agosto 27 y 28.
- Brunner, C.R.1993. Hazardous Waste Incineration. Mc Graw-Hill. 2nd edición. USA. 460 pp.
- DGMIC. Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes2001. Diagnóstico de la situación actual de la incineración en México. Foro Internacional de Incineración de Residuos. México D.F. Noviembre 6 y 7.
- Cengel Y. y Boles M, 19996 termodinámica, tomo II McGraw-Hill. México.
- Incropera F y Dewitt D, 1998, fundamentos de transferencia de calor, CECSA, México.
- Introducción a la ingeniería Química. Calleja Pardo, F. García Herruzo, A. de Lucas Martínez, D. Prats Rico y J.M. Rodríguez Maroto. Madrid 1999.
- Maradey, Juan F., termodinámica aplicada, editorial UIS, Edición (2003).
- Mott, Robert "Mecánica de Fluidos". Cuarta Edición. Prentice Hall México, 1996.
- Pramparo M.C., estudio de sistemas de destrucción catalítica de compuestos orgánicos volátiles, Doctoral Thesis, U.N.L.P, argentina (2010).
- Perry R.H y Green D. W., Perry,s Chemical Engineer´s Handbook, McGraw-Hill, 7ma Ed (1999).
- Serht R.W., Process Heat transfer. Principles and applications, Elsevier (2007).
- Shah R.k, Sekulic D.P., Fundamentals of Heat Exchanger Design, Ed John Wiley & Sons (2003).
- Villegas Francisco A., Evaluación y control de la contaminación Universidad Nacional (1995).
- Valiente Antonio, Tlaczin Stivalet Rudi Primo, Problemas de Balances de Materia y Energía, Alhambra Mexicana, primera edición (1991).
- PROY-NOM-098-ECOL-2005. Protección Ambiental, Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisiones de contaminantes. Diario oficial de la Federación, 8 septiembre 2005.
- DGMRAR. Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas.1998., La Incineración dentro del Contexto de la Política Nacional de Residuos Peligroso. México D.F. Agosto 27 y 28.
- NOM-098-SEMARNAT-2002.
- NOM-052-SEMARNAT-2005
- http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/123456789/60/1/036071_tesis.pdf (18 de julio de 2014 a las 02:00 horas, reviso, Carrillo Castelán Osvaldo).
- http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jaimefa/jaimecuevas/clase7.pdf (22 de agosto de 2014 a las 18:35 horas, reviso Alvarez Herrera Dulce Nataly).
- http://www.cempre.org.uy/docs/manual_girsu/parte_4_incineracion.pdf (22 de agosto de 2014 a las 19:05 horas, reviso Alvarez Herrera Dulce Nataly).
-

BIBLIOGRAFÍAS

- <http://depa.fquim.unam.mx/procesos/generalidades.html> (22 de agosto de 2014 a las 19:08 horas, reviso Alvarez Herrera Dulce Nataly).
- <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OPIV/torres1.pdf> (24 de agosto de 2014 a las 00:15 horas, reviso Carrillo Castelán Osvaldo).
- http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/integracion3/Torres_de_enfriamiento.pdf (24 de agosto de 2014 a las 00:30 horas, reviso Carrillo Castelán Osvaldo).
- http://siscope.inecc.gob.mx/descargas/legislacion/nom_incineracion.pdf (24 de agosto de 2014 a las 00:35 horas, reviso Carrillo Castelán Osvaldo).
- http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/integracion3/Torres_de_enfriamiento.pdf (24 de agosto de 2014 a las 04:27 horas, reviso Carrillo Castelán Osvaldo).
- <http://www.limpiezastecnicasindustriales.com/torresrefrigeracion.html> (05 de septiembre de 2014 a las 15:37 horas, reviso Alvarez Herrera Dulce Nataly).
- <http://prezi.com/3qhx4d5iovfd/puesta-en-operacion-de-la-torre-de-enfriamiento-de-tiro-forzado-en-el-laboratorio-de-ingenieria-quimica-del-ito/> (10 de septiembre de 2014 a las 10:58 horas, reviso Alvarez Herrera Dulce Nataly).
- <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OPIV/torres1.pdf> (03 de noviembre de 2014 a las 13:11 horas, reviso Alvarez Herrera Dulce Nataly).
- http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=3140 (03 de enero de 2015 a las 21:30 horas, reviso Carrillo Castelán Osvaldo).
- [http://www.gea-wiegand.com/GEAWiegand/cmsresources.nsf/filenames/P03es-GJP-gasscrubber.pdf/\\$file/P03es-GJP-gasscrubber.pdf](http://www.gea-wiegand.com/GEAWiegand/cmsresources.nsf/filenames/P03es-GJP-gasscrubber.pdf/$file/P03es-GJP-gasscrubber.pdf) (05 de marzo de 2015 a las 16:00 horas, reviso Alvarez Herrera Dulce Nataly).
- http://www.enquiol.com/pg_scrubber.html (10 de marzo de 2015 a las 19:29 horas, reviso Carrillo Castelán Osvaldo).
- http://www.ehowenespanol.com/tipos-incineradores-desechos-peligrosos-info_245992/ (13 de marzo a las 20:30 horas, reviso Alvarez Herrera Dulce Nataly).
- http://www.epa.gov/superfund/action/spanish/pdfs/es_incineration.pdf revisada el (27 de marzo de 2014 a las 15:30 horas, reviso Carrillo Castelán Osvaldo).



ANEXOS

Anexo 1. NOM-098-SEMARNAT-2002.

(Primera Sección) DIARIO OFICIAL viernes 1 de octubre de 2004

SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

NORMA Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-098-SEMARNAT-2002, PROTECCION AMBIENTAL-INCINERACION DE RESIDUOS, ESPECIFICACIONES DE OPERACION Y LIMITES DE EMISION DE CONTAMINANTES.

JUAN RAFAEL ELVIRA QUESADA, Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con fundamento en lo dispuesto en los artículos 32 bis fracciones I, II, IV y V de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 8 fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 5 fracciones V, VI, 36, 37, 37 Bis, 137, 150, 151, 151 Bis de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 7 fracción II, 62 y 63 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos; 38 fracción II, 40 fracciones X, XIII y XVII, 47 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y 33 de su Reglamento

CONSIDERANDO

Que con fecha 8 de septiembre de 2000, se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-098-ECOL-2000, Protección ambiental.- Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes, con el fin de que los interesados, dentro del plazo establecido en la ley en la materia, presentaran sus comentarios ante este Comité;

Que durante el citado plazo, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto en cuestión, los cuales después de ser analizados en su totalidad por el Grupo de Trabajo, éste consideró que algunos de ellos eran procedentes y como consecuencia se hicieron modificaciones sustanciales al Proyecto de Norma Oficial Mexicana;

Que dichas modificaciones fueron presentadas al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales (COMARNAT) en su sesión del 25 de noviembre de 2002, por lo que éste, con base en lo establecido por el artículo 33 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, consideró procedente que una vez modificado sustancialmente el proyecto sea publicado para consulta pública, de conformidad con el artículo 47 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, bajo la denominación de PROY-NOM-098-ECOL-2002, Protección ambiental.-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.

Que el 23 de abril de 2003 se publicó en el **Diario Oficial de la Federación**, el Acuerdo por el cual se reforma la nomenclatura de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente



ANEXOS

y Recursos Naturales, así como la ratificación de las mismas previa a su revisión quinquenal, acción que eventualmente llevó a cambiar el nombre de la norma a NOM-098-SEMARNAT-2002.

Que en cumplimiento a lo dispuesto por el artículo 47 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización con fecha 27 de junio de 2003 se publicó en el **Diario Oficial de la Federación**, con carácter de proyecto la presente Norma Oficial Mexicana bajo la denominación PROY-NOM-098-ECOL-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes, con el fin de que los interesados, en un plazo de 60 días naturales, posteriores a la fecha de su publicación presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, sito en bulevar Adolfo Ruiz Cortines número 4209, piso 5o., colonia Jardines en la Montaña, código postal 14210, Delegación Tlalpan, México D.F., vía fax 5628-0632 y en el correo electrónico industria@semarnat.gob.mx.

Que de acuerdo a lo establecido en el artículo 47 fracciones II y III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto de norma en cuestión, los cuales fueron analizados por el COMARNAT en su sesión extraordinaria celebrada el 25 de febrero de 2004, realizándose las modificaciones procedentes al proyecto.

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de normas oficiales mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, aprobó la presente Norma Oficial Mexicana.

Por lo expuesto y fundado, he tenido a bien expedir la siguiente:

**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-098-SEMARNAT-2002,
PROTECCION AMBIENTAL-INCINERACION DE RESIDUOS,
ESPECIFICACIONES DE OPERACION Y LIMITES DE EMISION DE CONTAMINANTES**

PREFACIO

En la elaboración de esta Norma Oficial Mexicana participaron:

- ASOCIACION MEXICANA DE LABORATORIOS ANALITICOS PARA EL MEDIO AMBIENTE, A.C.
- ASOCIACION NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA, A.C.
- CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA FARMACEUTICA
- PETROLEOS MEXICANOS, PEMEX PETROQUIMICA, PETROQUIMICA PAJARITOS, S.A. DE C.V.
- SECRETARIA DE ENERGIA SUBSECRETARIA DE HIDROCARBUROS
- DIRECCION DE SEGURIDAD Y PROTECCION AL AMBIENTE
- SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
- SUBSECRETARIA DE FOMENTO Y NORMATIVIDAD AMBIENTAL
- SUBSECRETARIA DE GESTION PARA LA PROTECCION AMBIENTAL
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGIA PROCURADURIA FEDERAL DE PROTECCION AL AMBIENTE
- SECRETARIA DE SALUD
- DIRECCION GENERAL DE SALUD AMBIENTAL

INDICE

0. Introducción
1. Objetivo
2. Campo de aplicación
3. Referencias
4. Definiciones y terminología
5. Especificaciones
6. Recepción de los residuos
7. Operación de una instalación de incineración
8. Medición en chimenea
9. Emisiones al ambiente
10. Evaluación de la conformidad
11. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración
12. Bibliografía
13. Observancia de la norma

Transitorios

Anexos

0. Introducción

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente establece que para la formulación y conducción de la política ambiental y la expedición de normas oficiales mexicanas se deben observar como principios, entre otros: que toda persona tiene derecho a disfrutar de un ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar; las autoridades y los particulares deben asumir la responsabilidad de la protección del equilibrio ecológico; quienes realicen obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente están obligados a prevenir, minimizar o reparar los daños que causen, así como asumir los costos que dicha afectación implique. Asimismo, debe incentivarse a quien proteja el ambiente y la prevención de las causas que generan desequilibrios ecológicos ya que es el medio más eficaz para evitarlos.

A medida que la población y las actividades productivas del país han ido creciendo, la generación de residuos sólidos municipales, hospitalarios e industriales, se ha incrementado de tal manera, que el impacto y el riesgo que ocasiona su manejo, tratamiento y disposición final representan en la actualidad un verdadero problema, en especial para aquellos residuos considerados como peligrosos. Por lo tanto, es necesario ampliar y diversificar la infraestructura y sistemas orientados a la minimización, reutilización, reciclaje y tratamiento de residuos. Una alternativa tecnológica de disposición es la incineración, la cual permite reducir el volumen y peligrosidad de los mismos.

La incineración de residuos provenientes de cualquier actividad, incluyendo los residuos peligrosos, produce emisiones que provocan la contaminación del ambiente y con ello dañan a los ecosistemas y la salud humana; lo cual demanda la adopción de acciones preventivas tendientes a propiciar condiciones de

ANEXOS

operación adecuadas y valores límite de emisión aceptables, en particular en lo que se refiere a las dioxinas y furanos. Las acciones preventivas, de conformidad con la política ecológica, requieren de un enfoque en el que se incluyan los diferentes medios receptores, lo cual implica considerar de manera integral el control de las emisiones al aire y el manejo de las cenizas.

Por lo anterior, al publicarse esta Norma Oficial Mexicana se establece el primero de los distintos compromisos que derivarán del Convenio de Estocolmo; ya que al establecer límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera particulares para las instalaciones de incineración existentes y nuevas en el país se está procurando el cuidado de la salud de la población y del ambiente.

1. Objetivo

Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones de operación, así como los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las instalaciones de incineración de residuos.

2. Campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria aplicable en todo el territorio mexicano, con excepción de los mares territoriales en donde la nación ejerza su jurisdicción, para todas aquellas instalaciones destinadas a la incineración de residuos, excepto de hornos crematorios, industriales y calderas que utilicen residuos como combustible alterno.

No aplica para la incineración de residuos (desechos) radiactivos, para los cuales se aplicarán las disposiciones que al respecto emita la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

3. Referencias

3.1 Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, publicándose en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.), el 6 de enero de 1997, como NOM-001-ECOL-1996, la cual cambió de nomenclatura por el Acuerdo emitido en el D.O.F. el 23 de abril de 2003, quedando con el nombre que aparece al inicio de esta cita.

3.2 Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, publicándose en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.), el 3 de junio de 1998, como NOM-002-ECOL-1996, la cual cambió de nomenclatura por el Acuerdo emitido en el D.O.F. el 23 de abril de 2003, quedando con el nombre que aparece al inicio de esta cita.

3.3 Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-1993, Sistema General de Unidades de Medida, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 14 de octubre de 1993.

ANEXOS

3.4 Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 22 de octubre de 1993, la cual ha cambiado de nomenclatura en dos ocasiones, la primera, por el Acuerdo Secretarial publicado en el D.O.F. el 29 de noviembre de 1994, siendo modificada a NOM-052-ECOL-1993 y, la segunda, por el Acuerdo emitido en el mismo órgano de difusión el 23 de abril de 2003, quedando con el nombre que aparece al inicio de esta cita.

3.5 Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993, Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 22 de octubre de 1993, la cual ha cambiado de nomenclatura en dos ocasiones, la primera, por el Acuerdo Secretarial publicado en el D.O.F. el 29 de noviembre de 1994, siendo modificada a NOM-053-ECOL-1993 y, la segunda, por el Acuerdo emitido en el mismo órgano de difusión el 23 de abril de 2003, quedando con el nombre que aparece al inicio de esta cita.

3.6 Norma Oficial Mexicana NOM-054-SEMARNAT-1993, Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM052-SEMARNAT-1993, publicada en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 22 de octubre de 1993, la cual ha cambiado de nomenclatura en dos ocasiones, la primera, por el Acuerdo Secretarial publicado en el D.O.F. el 29 de noviembre de 1994, siendo modificada a NOM-054-ECOL-1993 y, la segunda, por el Acuerdo emitido en el mismo órgano de difusión el 23 de abril de 2003, quedando con el nombre que aparece al inicio de esta cita.

3.7 Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994, Contaminación atmosférica-Fuentes fijas-Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión, publicada en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 2 de diciembre de 1994 como NOM-085-ECOL-1994, la cual cambió su nomenclatura por el Acuerdo emitido en el D.O.F. el 23 de abril de 2003, quedando como aparece al inicio de esta cita.

3.8 Norma Oficial Mexicana NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, Protección ambiental-Salud ambiental-Residuos peligrosos biológico-Infeciosos-Clasificación y especificaciones de manejo, publicada en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 17 de febrero de 2003 como NOM-087-ECOL-SSA1-2002, la cual cambió su nomenclatura por el Acuerdo emitido en el D.O.F. el 23 de abril de 2003, quedando como aparece al inicio de esta cita.

ANEXOS

3.9 Norma Mexicana NMX-AA-009/1993-SCFI. Contaminación atmosférica-Fuentes fijas-Determinación de flujo de gases en un conducto por medio del Tubo de Pitot, publicada en el Diario Oficial de la Federación del 27 de diciembre de 1993.

3.10 Norma Mexicana NMX-AA-10-SCFI-2001, Contaminación Atmosférica.- Fuentes fijas.- Determinación de la emisión de partículas contenidas en los gases que fluyen por un conducto.- Método isocinético, publicada en el Diario Oficial de la Federación del 18 de abril de 2001.

3.11 Norma Mexicana NMX-AA-23/1986, Protección al Ambiente. Contaminación Atmosférica. Terminología, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de julio de 1986.

3.12 Norma Mexicana NMX-AA-035-1976. Determinación de bióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 10 de junio de 1976.

3.13 Norma Mexicana NMX-AA-054-1978. Contaminación atmosférica-Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto-Método gravimétrico, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de agosto de 1978.

3.14 Norma Mexicana NMX-AA-055-1979. Contaminación atmosférica-Fuentes fijas-Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de septiembre de 1979.

3.15 Norma Mexicana NMX-AA-070-1980. Contaminación atmosférica-Fuentes fijas-Determinación de cloro y/o cloruros en los gases que fluyen por un conducto, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de septiembre de 1980.

3.16 Norma Mexicana NMX-B-036-1981. Definiciones relativas al Carbón y Coque, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de enero de 1982.

3.17 Norma Mexicana NMX-Z-13-02-1981. Guía para la redacción, estructuración y presentación de las normas oficiales mexicanas, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 14 de mayo de 1981.

3.18 Protocolo de 1996. Relativo al Convenio sobre la Prevención de la Contaminación del Mar por vertimiento de desechos y otras materias, 1972.

4. Definiciones y terminología

Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana se consideran las definiciones contenidas tanto en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, así como en los Reglamentos en materia de Residuos Peligrosos y Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, y las siguientes:

4.1 Alimentación de residuos: Suministro de residuos a la cámara de combustión del incinerador.

ANEXOS

4.2 Alimentación automática: Carga de los residuos a la cámara de combustión primaria del incinerador mediante mecanismos de clausura hermética que operan a presión negativa.

4.3 Alimentación manual: Carga de residuos realizada por los operadores directamente a la cámara de combustión primaria del incinerador.

4.4 Cámara de combustión final: Compartimiento en donde se lleva a cabo la combustión final de los gases producidos por la incineración de los residuos.

4.5 Cámara de combustión primaria: Compartimiento en donde se realiza la ignición y se lleva a cabo la combustión de los residuos.

4.6 Capacidad calorífica del equipo: Es la cantidad de calor de diseño que requiere el equipo de incineración para mantener las condiciones de operación durante una hora y sus unidades son Joules/h.

4.7 Combustión: Proceso controlado de oxidación rápida que se sucede durante la combinación de oxígeno con aquellos materiales o sustancias contenidas en los residuos capaces de oxidarse.

4.8 Congéneres: Se refiere a un compuesto particular que pertenece a la misma familia química.

4.9 Descarga de aguas residuales: Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor.

4.10 Emisión: La descarga a la atmósfera de toda sustancia en cualquiera de sus estados físicos o de energía.

4.11 Equipo de control de emisiones: Dispositivo de control operado al final de los equipos de proceso y cuyo propósito es reducir al mínimo la emisión de partículas y gases de combustión.

4.12 Equivalente tóxico (EQT): Forma de reporte de resultados de los congéneres sustituidos en las posiciones 2,3,7,8 de las Dioxinas y Furanos en el cual se estandarizan las concentraciones detectadas de acuerdo a su toxicidad relativa a la de la 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD).

4.13 Incineración: Cualquier proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos. En esta definición se incluye la pirolisis, la gasificación y el plasma, cuando los subproductos combustibles generados en estos procesos sean sometidos a combustión en un ambiente rico en oxígeno.

4.14 Incinerador: Equipo empleado para la oxidación térmica de residuos con o sin recuperación de calor producido por la combustión, con sus respectivos dispositivos de control de temperatura y de composición de gases, así como con tolvas para la recepción de cenizas.

ANEXOS

4.15 Instalación de incineración: Predio ocupado por las unidades de incineración para la oxidación térmica de residuos, con o sin recuperación del calor producido por la combustión, incluyendo las áreas de recepción, almacenamiento y tratamiento previo de los residuos, el incinerador, sus sistemas de alimentación de residuos, combustible y aire, los sistemas de tratamiento de los gases de escape y de las aguas residuales, así como los dispositivos y sistemas de control de las operaciones de incineración, registro y supervisión de las condiciones de operación.

4.16 Instalación de incineración existente: Cualquier instalación de incineración autorizada por la Secretaría o no autorizada que se encuentre operando con anterioridad a la publicación de esta Norma Oficial Mexicana.

4.17 Ley: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

4.18 Límite máximo permisible: Valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la emisión de contaminantes.

4.19 Monitoreo continuo: El que se realiza con equipo automático con un mínimo de 15 lecturas en un periodo no menor de 60 minutos y un periodo no mayor de 360 minutos. El resultado del monitoreo es el promedio del periodo en el que se llevó a cabo el muestreo.

4.20 Operador Calificado: Operador que demuestre tener experiencia mínima de seis meses en el uso y operación de incineradores.

4.21 PROFEPA: La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

4.22 Protocolo de Pruebas: Secuencia de actividades para verificar la eficiencia del sistema, determinar el nivel de eficiencia de destrucción alcanzado por los sistemas de combustión y de control de emisiones, la confiabilidad de los sistemas de monitoreo continuo de emisiones y de los procedimientos adecuados de manejo de los residuos y subproductos.

4.23 Residuos industriales no peligrosos: Aquellos generados en procesos industriales que no estén considerados en la Norma Oficial Mexicana NOM052-SEMARNAT-1993 y aquellos que la Secretaría certifique como tales.

4.24 Residuos Sólidos Urbanos: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados como residuos de otra índole.

4.25 Residuos peligrosos: Aquellos residuos definidos por la NOM-052-SEMARNAT-1993.



ANEXOS

4.26 Residuos peligrosos biológico-infecciosos: Aquellos residuos así considerados en la NOM-052-SEMARNAT-1993 y la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002.

4.27 Responsable de la Instalación de Incineración: Persona física o moral a quien se extiende una autorización, en los términos de las disposiciones legales aplicables, para llevar a cabo actividades de incineración.

4.28 Secretaría: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

4.29 Sistema de monitoreo continuo de emisiones: Consiste en un dispositivo de medición automático continuo para la determinación de la concentración de un contaminante, reportado en horarios promedios móviles.

5. Especificaciones

5.1 Los responsables de la instalación de incineración de residuos peligrosos deben presentar a la Secretaría un resultado del protocolo de pruebas dentro del plazo señalado en su autorización. En el caso de incineración de residuos peligrosos, los resultados del protocolo de pruebas deben ser presentados en los términos y formalidades que establece el Trámite SEMARNAT-07-012 "Autorización para el manejo de residuos peligrosos que pretendan su reusó, reciclaje, tratamiento o incineración", del Acuerdo por el que se dan a conocer los trámites inscritos en el Registro Federal de Trámites y Servicios que aplica la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y sus órganos administrativos desconcentrados y se establecen diversas medidas de mejora regulatoria, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de mayo de 2003.

5.2 Las instalaciones de incineración deben operar en todo momento con un operador calificado en la operación del equipo.

5.3 La instalación de incineración debe contar con un sistema de registro de datos a través de bitácoras o archivos electrónicos, aplicables a la recepción, almacenamiento, proceso de incineración incluyendo los sistemas de control de emisiones, monitoreo de contaminantes y disposición de residuos sólidos de acuerdo a lo que establezca la Secretaría.

5.4 Las bitácoras deben ser libretas foliadas, el registro también puede ser en archivos electrónicos, en ambos casos deben guardarse por un tiempo mínimo de 5 años.

5.5 No debe llevarse a cabo la incineración de residuos peligrosos que sean o contengan compuestos orgánicos persistentes y bio-acumulables; plaguicidas organoclorados; así como baterías y acumuladores usados que contengan metales tóxicos; siempre y cuando exista en el país alguna otra tecnología disponible que cause menor impacto y riesgo ambiental.

6. Recepción de los residuos.

ANEXOS

6.1 Es requisito indispensable para la instalación que presta servicios a terceros para la aceptación de los residuos peligrosos, la presentación del Manifiesto de Entrega-Transporte-Recepción de Residuos Peligrosos.

6.2 En el caso de residuos peligrosos y de la instalación de incineración que presta servicios a terceros, el responsable de la instalación de incineración, antes de aceptar el ingreso de este tipo de residuos a su establecimiento, debe verificar:

a) Si la composición física y química de los residuos peligrosos coincide con los descritos por el generador en el Manifiesto y si éstos son compatibles con el equipo de incineración;

b) La masa de los residuos;

c) Las medidas adecuadas para su almacenamiento y manejo conforme a las características de incompatibilidad que, en su caso, puedan presentar respecto de otros residuos peligrosos recibidos;

d) La empresa habrá de efectuar una medición por radiación, utilizando un detector de centelleo, en caso de que la lectura sea mayor a dos veces el fondo, se dará aviso de inmediato a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias y se procederá siguiendo las instrucciones que indique la misma.

e) En caso de no satisfacer las condiciones mencionadas en el inciso a), los residuos peligrosos no deben ser recibidos en la instalación del incinerador.

6.3 Para el caso de los residuos considerados como no peligrosos, no es necesario cumplir con lo indicado en los incisos anteriores.

7. Operación de una instalación de incineración

7.1 La instalación de incineración debe contar con un área de almacenamiento, de conformidad con los ordenamientos jurídicos aplicables; para los materiales y residuos, con una capacidad mínima de por lo menos dos veces la capacidad diaria de operación autorizada.

7.2 La instalación de incineración debe contar con los sistemas de control o con una planta generadora de energía eléctrica para emergencias, que garanticen el paro seguro y la combustión completa de los residuos en caso de falla del suministro eléctrico.

7.3 La instalación de incineración contará con un sistema para el pesaje de los residuos que se reciban.

7.4 Las empresas de servicios a terceros deben contar con un laboratorio dentro de sus instalaciones, el cual deberá realizar una evaluación presuntiva del contenido de cloro en cada lote de residuos admitidos, por cualquier método de análisis. Esto no aplica para residuos biológico-infecciosos.

7.5 El diseño, equipamiento y funcionamiento de las instalaciones de incineración deben permitir que la temperatura de los gases derivados de la incineración de los residuos se eleve, tras la última inyección de

ANEXOS

aire de combustión, de manera controlada y homogénea, aun en las condiciones más desfavorables, hasta por lo menos 850°C, alcanzados en o cerca de la pared interna, de la cámara de combustión final, durante un tiempo mínimo de por lo menos dos segundos. En el caso de que se incineren residuos peligrosos que contengan más del 1% de sustancias organocloradas expresadas en cloro, la temperatura deberá elevarse hasta 1,100°C, y durante 2 segundos como mínimo.

Cuando se compruebe que por cuestiones tecnológicas, de eficiencia de los equipos y por la corriente de los residuos a incinerar, la temperatura de operación pueda ser menor a 1100°C, con una eficiencia de destrucción del 99.9999% para el compuesto organoclorado de mayor estabilidad térmica que se encuentre en dicha corriente de residuos, la Secretaría podrá autorizar la operación a una temperatura inferior a la señalada en este inciso, misma que no podrá ser menor a 850°C y el tiempo de residencia será de dos segundos como mínimo.

Por el contrario, para aquellos residuos cuya temperatura de destrucción sea mayor a 1100°C, la Secretaría podrá determinar la temperatura y tiempo de residencia a cumplir, para garantizar su destrucción.

En el caso de los equipos que incineren exclusivamente Residuos Peligrosos-Biológico Infecciosos (RPBI), el tiempo de residencia puede ser menor a dos segundos, siempre y cuando se cumpla con los límites de emisión que aparecen en la Tabla 1 de esta Norma Oficial Mexicana.

7.6 Para evitar las emisiones fugitivas, la presión de operación de las cámaras de combustión del incinerador debe ser negativa.

7.7 La unidad de incineración debe estar equipada con quemadores que se pongan en marcha de manera automática cuando la temperatura descienda por debajo de la mínima establecida para su operación.

7.8 La unidad de incineración debe contar con un sistema de paro automático en la alimentación de residuos peligrosos el cual se acciona cuando:

- a) Durante la puesta en marcha, no se alcance la temperatura mínima requerida;
- b) No logre mantenerse la temperatura mínima de incineración requerida;
- c) Las emisiones de monóxido de carbono (CO) sobrepasen los valores máximos permisibles;

7.9 El operador debe mantener un registro diario en bitácora foliada o archivos electrónicos, a disposición de la PROFEPA, en la cual registrará la siguiente información:

- a) Tipo y cantidad de residuos incinerados, en el caso de las empresas de servicios a terceros, los resultados del análisis de cloro a que se refiere el párrafo 7.4 de la presente Norma;
- b) Temperatura del equipo en las diferentes cámaras y equipos de control;

ANEXOS

- c) Tipo y cantidad de combustible consumido;
- d) Arranques, paros y horas de operación del equipo;
- e) Fallas y problemas presentados durante la operación del equipo, señalando las medidas correctivas adoptadas para el restablecimiento de las condiciones normales de operación;
- f) Mediciones de los contaminantes especificados en las tablas de esta Norma; en el caso de mediciones continuas referenciar la localización de los registros;
- g) Condiciones de operación del equipo de control de emisiones (presión, temperatura y tasa de alimentación);
- h) Cantidad, tipo y destino final de los residuos generados por el incinerador, y
- i) Nombre y firma del responsable de la instalación de incineración.

7.10 No se permite la alimentación manual del incinerador; la alimentación con una carga de residuos mayor o con residuos diferentes a los que han sido autorizados por la Secretaría.

7.11 Las instalaciones de incineración deben de contar con un Programa para Atención a Contingencias y con los sistemas o procedimientos para prevenir y responder a incendios o explosiones, así como a fugas o derrames de residuos.

7.12 Las cenizas y otros residuos sólidos que se generen durante los procesos de incineración, serán considerados como residuos peligrosos, por lo que su manejo deberá cumplir con lo establecido en los ordenamientos legales aplicables.

7.13 Si el contenido de materia volátil en la ceniza es mayor al 10%, éstas deben ser realimentadas al incinerador.

7.14 Las descargas de aguas residuales procedentes de las instalaciones de incineración, deben cumplir con lo dispuesto en la normatividad aplicable o las condiciones particulares de descarga que, en su caso, establezca la autoridad competente.

7.15 Las instalaciones de incineración que cuenten con autorización para llevar a cabo el tratamiento de bifenilos policlorados y compuestos organoclorados, según lo establecido en el apartado 7.5, deben demostrar anualmente una eficiencia de destrucción y remoción (EDR) de al menos 99.9999 por ciento, respecto al compuesto de mayor dificultad de destrucción presente en el residuo alimentado.

Para determinar el compuesto de mayor dificultad presente en el residuo alimentado, es necesario tomar como base el compuesto organoclorado con mayor estabilidad térmica que se encuentre en la corriente de residuos a incinerar.

ANEXOS

El cálculo de la eficiencia de destrucción y remoción está dado por la fórmula:

$$\text{EDR} = \text{Ai} - \text{Ei} \times 100\%$$

Ai = Flujo másico del componente contenido en la alimentación al incinerador, calculado por el producto de la concentración del componente de mayor dificultad de destrucción en el residuo alimentado g/h.

Ei = Flujo másico del componente de mayor dificultad de destrucción presente en el residuo alimentado contenido en las emisiones a la atmósfera y las cenizas generadas.

Dicho flujo se calcula:

$$\text{Ei} = (\text{Qi} \times \text{G}) + (\text{mi} \times \text{Mc})$$

Dónde:

Qi = Concentración de la emisión del compuesto de mayor dificultad de destrucción, g/m³.

G = Caudal del gas de emisión en la chimenea, m³/h.

mi = Concentración del componente de mayor dificultad de destrucción en las cenizas, g/Kg.

Mc = Caudal de cenizas generadas, Kg/h.

En el caso de que por cuestiones propias del proceso de incineración la cantidad de cenizas en los fondos del incinerador sea despreciable, la variable Mc será cero y el segundo término de la ecuación será despreciable.

7.16 En caso de que por razones de fallas en los equipos de alimentación automática, medición continua, control de emisiones, o alguna otra falla que impida el funcionamiento de la operación autorizada del incinerador, se debe suspender la alimentación de los residuos. La recepción de los mismos podrá continuar siempre y cuando no se rebase la capacidad del área de almacenamiento de acuerdo a lo establecido en el numeral 7.1, de la presente Norma Oficial Mexicana.

8. Medición en chimenea

8.1 La instalación de incineración debe contar con sistemas para la medición continua de indicadores de buenas prácticas de operación y control, contando por lo menos con un equipo de monitoreo continuo para la temperatura de la cámara de combustión final y para las emisiones de monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O₂), a la salida de los gases de chimenea.

8.2 Para llevar a cabo la medición de las emisiones a la atmósfera, los incineradores deben contar con plataforma y puertos de muestreo en el ducto de salida de los gases de acuerdo con lo establecido en el artículo 17 fracción III del Reglamento de la Ley en materia de Prevención y Control de la Contaminación de



ANEXOS

la Atmósfera y de acuerdo a lo especificado en la Norma NMX-AA-009/1993-SCFI, referida en el punto 3 de esta Norma Oficial Mexicana.

9. Emisiones al ambiente

9.1 Los límites máximos permisibles de emisiones son los establecidos en la Tabla 1 de la presente Norma Oficial Mexicana.

9.2 La temperatura máxima de los gases antes del equipo de control de emisiones cuando se utilicen lavadores secos debe ser menor a 250°C. En los demás casos, la temperatura de los gases a la salida de la chimenea no debe rebasar dicho valor.

9.3 Los límites máximos permisibles de emisión, la frecuencia de medición y los métodos de evaluación son los establecidos en la Tabla 1 de esta Norma Oficial Mexicana y se aplicarán todo el tiempo para las instalaciones de incineración, excepto en periodos de arranque o paro de los equipos.

9.4 En caso de mal funcionamiento del equipo de medición continua, debe efectuarse al menos una medición diaria puntual hasta que el desajuste sea corregido y dar aviso de inmediato a la

Secretaría, de la falla y el tiempo estimado para su ajuste, para que ésta determine lo conducente. La utilización de métodos de evaluación, distintos a los señalados en la Tabla 1 se sujetará a lo establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento. En caso de que no sea posible llevar a cabo la medición diaria puntual se debe suspender la alimentación de los residuos al incinerador.

9.5 El responsable de la instalación de incineración podrá quedar exento de realizar el análisis de alguno o varios de los parámetros establecidos en la Tabla 1 de esta Norma Oficial Mexicana, cuando demuestre a la Secretaría que por las características de los residuos a tratar no genera o concentra los contaminantes a exentar, manifestándolo a ella por escrito y bajo protesta de decir la verdad. En caso de falsedad, el responsable queda sujeto a los ordenamientos legales aplicables.

La disposición anterior no aplica para los parámetros relacionados con la calidad de la combustión (CO, NOx). Estas exenciones sólo podrán ser autorizadas por un plazo no mayor a 2 años, siempre y cuando los resultados de 3 años consecutivos de mediciones de los parámetros a exentar estén 25% por debajo de los límites máximos permisibles indicados en la Tabla 1.

ANEXOS

TABLA 1

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES PARA INSTALACIONES DE INCINERACION DE RESIDUOS.

CONTAMINANTE	LIMITE DE EMISION	FRECUENCIA DE MEDICION	NORMA QUE APLICA O METODO
CO (mg/m ³)	63	CONTINUO	Infrarrojo No Dispersivo y Celda Electroquímica Anexo 1
HCl (mg/m ³)	15	TRIMESTRAL	NMX-AA-070-1980
NOx (mg/m ³)	300	SEMESTRAL	Quimiluminiscencia Anexo 2
SO ₂ (mg/m ³)	80	SEMESTRAL	NMX-AA-55-1979
PARTICULAS (mg/m ³)	50	SEMESTRAL	NMX-AA-10-SCFI-2001
ARSENICO SELENIO COBALTO NIQUEL MANGANESO ESTAÑO (mg/m ³)	0.7*	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica Anexos 3 y 4
CADMIO (mg/m ³)	0.07	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica Anexos 3 y 4
PLOMO CROMO total COBRE ZINC (mg/m ³)	0.7*	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica Anexos 3 y 4
MERCURIO (mg/m ³)	0.07	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica con vapor frío Anexos 3 y 4
DIOXINAS Y FURANOS EQT (ng/m ³) Instalaciones de incineración nuevas	0.2	ANUAL	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución Anexo 5A
DIOXINAS Y FURANOS EQT (ng/m ³) Instalaciones de incineración existentes antes de la publicación de esta NOM	0.5	ANUAL	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de baja resolución Anexo 5B

Todos los valores están referidos a condiciones estándar: 1 atmósfera, base seca, 25°C y 7% de Oxígeno O₂, de acuerdo a la NOM-085-SEMARNAT-1994.

* Suma total metales pesados.

**Todas las mediciones deben estar registradas en bitácora

10. Evaluación de la conformidad

La Secretaría reconocerá las determinaciones analíticas que hayan sido muestreadas y analizadas por un laboratorio acreditado y aprobado conforme a las disposiciones legales aplicables.

11. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración. Esta Norma Oficial Mexicana no concuerda con ninguna norma o lineamiento internacional, tampoco existen normas mexicanas que hayan servido de base para su elaboración.

12. Bibliografía

12.1 Aseguramiento de la Calidad/Control de la Calidad Procedimientos para la Incineración de Residuos Peligrosos EPA/625/6-89/0.

12.2 Exposure of man to dioxins: a perspective on industrial waste incineration. ISBN-8072-49. Reporte Técnico No. 49 (Exposición humana a dioxinas: una perspectiva sobre la incineración de residuos industriales).

12.3 LaGrega Michael, Buckingham Phillip L., y Evans Jeffrey C. "Gestión de residuos tóxicos", Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. Vols. I y II, McGraw-Hill, México, 1996.

ANEXOS

12.4 Martínez Mondragón Jaime y Ortiz Monasterio Fernando (ERM-México, S.A. de C.V.) "Tecnología de control de Dioxinas y Furanos y un caso de estudio de muestreo", presentado en el Seminario Internacional sobre Incineración, México, agosto, 1998.

12.5 Método 23 de la EPA.- "Determinación de policlorodibenzodioxinas y policlorodibenzofuranos provenientes de fuentes estacionarias".

12.6 Standards of Performance for New Stationary Sources: Medical Waste Incinerators, 27 de febrero de 1995 [Estándares de Desempeño para Fuentes Fijas Nuevas: Incineradores de Residuos Médicos].

12.7 Strong Brian and Copland Richard. "Summary of the Final New Source Performance Standards and Emission Guidelines for New and Existing Hospital/Medical/Infectious Waste Incinerators". Presentado en la 91a. Reunión Anual de la Air & Waste Management Association del 14 al 16 de junio de 1998 en San Diego, California, EUA pp. 9.

12.8 Tchobanoglous George, Theisen Hilary y Vigil Samuel A., "Gestión integral de residuos sólidos", Vol. I y II, McGraw-Hill, México, 1996.

12.9 Van Ruymbeke Claire. "Propuesta de Norma de Emisiones a la atmósfera por la incineración de Residuos Hospitalarios". Informe interno de distribución restringida para la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas del Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP, México, 1997.

12.10 Directiva de la Comunidad Europea 2000/76/EC, relativa a la incineración de residuos. Parlamento Europeo. 28 de diciembre de 2000.

12.11 Taylor, Phillip H., Barry Dellinger, and C. C. Lee (University of Dayton and USEPA), "Development of a thermal stability-based ranking of hazardous organic compound incinerability", Environmental Science and Technology. Vol. 24; Pág. 316-328. Marzo, 1990.

13. Observancia de la norma

La Secretaría a través de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, los gobiernos de los estados, del Distrito Federal y de los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias y atribuciones, vigilará el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana. El incumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana será sancionado conforme a lo dispuesto en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

TRANSITORIOS

PRIMERO.- La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor 60 días después de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.



ANEXOS

SEGUNDO.- Los límites máximos permisibles de emisión de dioxinas y furanos en incineradores existentes serán revisados quinquenalmente por la Secretaría y el Grupo de Trabajo de esta Norma Oficial Mexicana, tomando en consideración aspectos ambientales y de salud pública, de desarrollo tecnológico y la conveniencia de aprovechar la vida útil de las instalaciones existentes.

TERCERO.-A la entrada en vigor del Plan Nacional derivado de la obligatoriedad del Convenio de Estocolmo se revisarán las especificaciones aplicables a los equipos de monitoreo, particularmente de aquellos que determinen las emisiones de dioxinas y furanos, en los incineradores nuevos.

México, Distrito Federal, a los cinco días del mes de agosto de dos mil cuatro.- El Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Juan Rafael Elvira Quesada.- Rúbrica.



ANEXOS

Anexo 2. NOM-052-SEMARNAT-2005

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-SEMARNAT-2005, QUE ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS, EL PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y LOS LISTADOS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS.

Norma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 2006

TEXTO VIGENTE

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos. Presidencia de la República.

JOSÉ RAMÓN ARDAVIN ITUARTE, Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con fundamento en lo dispuesto en los artículos 32 Bis fracciones I, II, IV y V de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 6o. fracción XIX y 8o. fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 1o., fracciones I, II, III y VI, 5o., fracciones V y VI, 36, 37 Bis, 150, 151, 160 y 171 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 7o. fracción II, 15, fracciones I, III, 16, 22, 31, 42, 43, 45 y 67 fracción VIII de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos; 4o. fracción I del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Residuos Peligrosos; 38 fracción II, 40, fracciones X, XIII y XVII, 47 fracción I, 51 y 73 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 33 y 40, fracciones III y IV del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y

CÓNSIDERANDO

Que las disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer, entre otras, las bases para garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar; definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación; la preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente, así como la prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.

Que los citados ordenamientos legales establecen que las normas oficiales mexicanas contendrán, entre otros temas, los listados que clasifiquen los materiales y residuos peligrosos considerando sus características.

Que con fecha 22 de octubre de 1993 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM-CRP-001-ECOL/1993, Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente; dicha Norma mediante acuerdo SECRETARÍA publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1994, actualizó su nomenclatura quedando como NOM-052-ECOL-1993.



ANEXOS

Que los residuos peligrosos se han diversificado en la medida que se modifican o presentan nuevos procesos de extracción, transformación, producción, uso y tratamiento, por lo que se hizo necesario revisar la NOM-052-ECOL-1993, acorde a las modificaciones de la legislación aplicable.

Que con fecha 22 de octubre de 1999, se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-052-ECOL-1999, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos con el fin de que los interesados dentro del plazo legal que establece la ley en la materia presentaran sus comentarios ante el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental; que durante el citado plazo, los interesados presentaron sus comentarios y modificaciones al proyecto en cuestión, que al ser analizados algunos se consideraron procedentes y como consecuencia se hicieron modificaciones sustanciales al mismo.

Que derivado de lo anterior, el mencionado Comité, en cumplimiento con lo establecido por el artículo 33 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, determinó someter el proyecto modificado al periodo de consulta pública, bajo la denominación de PROY-NOM-052-ECOL-2001, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos.

Que el PROY-NOM-052-ECOL-2001, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos, de conformidad con los preceptos antes invocados, se publicó a consulta pública el 26 de julio de 2002, a efecto de que los interesados, dentro de los 60 días naturales siguientes a la publicación en el Diario Oficial de la Federación, emitieran sus comentarios ante el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, sito en Bulevar Adolfo Ruiz Cortines número 4209, piso 5o., colonia Jardines en la Montaña, código postal 14210, Delegación Tlalpan, México, D.F., vía fax 5628-0632 o al correo electrónico: industria@semarnat.gob.mx.

Que el día 23 de abril de 2003 apareció en el Diario Oficial de la Federación un acuerdo a través del cual se reforma la nomenclatura de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, cambiando el nombre tanto de la NOM-052-ECOL-1993 como del PROY-NOM-052-ECOL-2001 a NOM-052-SEMARNAT-1993 y PROY-NOM-052-SEMARNAT-2001, respectivamente.

Que el 8 de octubre de 2003 fue publicada, en el Diario Oficial de la Federación, la Ley general para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

Que de acuerdo a lo establecido en el artículo 47 fracciones II y III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto de norma en cuestión, los cuales fueron analizados por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales en su sesión del 15 de diciembre de 2005, realizándose las modificaciones procedentes al proyecto, las cuales contemplaron las disposiciones establecidas en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.



ANEXOS

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de normas oficiales mexicanas y con base en lo dispuesto en el artículo 28 fracción I inciso d) del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, aprobó las respuestas a los comentarios derivados de la consulta pública, así como la versión definitiva de esta Norma Oficial Mexicana.

Por lo expuesto y fundado, he tenido a bien expedir la siguiente:

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-SEMARNAT-2005, QUE ESTABLECE LAS CARACTERISTICAS, EL PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y LOS LISTADOS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS

PREFACIO

En la elaboración de esta Norma Oficial Mexicana participaron:

- ASOCIACIÓN MEXICANA DE CÓNTROL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y PELIGROSOS, A.C.
- ASOCIACIÓN MEXICANA DE LABORATORIOS ANALÍTICOS DEL MEDIO AMBIENTE, A.C. (AMEXLAB).
- ASOCIACIÓN MEXICANA DE LA INDUSTRIA FITOSANITARIA, A.C.
- ASOCIACIÓN NACIONAL DE FABRICANTES DE PINTURAS Y TINTAS, A.C.
- ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA, A.C.
- ASOCIACIÓN NACIONAL DE LABORATORIOS AMBIENTALES, A.C.
- ASOCIACIÓN NACIONAL DE PRODUCTORES DE REFRESCOS Y AGUAS CARBÓNATADAS, A.C.
- CÁMARA DE LA INDUSTRIA DE CURTIDURIA DEL ESTADO DE GUANAJUATO
- CÁMARA MINERA DE MÉXICO
- CÁMARA NACIONAL DE ACEITES, GRASAS, JABONES Y DETERGENTES
- CÁMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y DEL ACERO
- CÁMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA CERVEZA Y DE LA MALTA
- CÁMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE CURTIDURIA
- CÁMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA TRANSFORMACIÓN
- CÁMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA FARMACEUTICA
- CÁMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA, DE TELECOMUNICACIONES E INFORMÁTICA -
- CÁMARA REGIONAL DE LA INDUSTRIA DE CURTIDURIA DE JALISCO
- CENTRO DE ESTUDIOS DEL SECTOR PRIVADO PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE
- CENTRO INDUSTRIAL DE GESTIÓN AMBIENTAL
- COLEGIO DE INGENIEROS AMBIENTALES DE MÉXICO, A.C.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
- CÓNFERACIÓN DE CÁMARAS INDUSTRIALES
- CÓNFERACIÓN PATRÓNAL DE LA REPÚBLICA MEXICANA
- FEDERACIÓN MEXICANA DE INGENIERIA SANITARIA Y CIENCIAS AMBIENTALES, A.C.
- INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA
- INSTITUTO PARA LA PROTECCIÓN AMBIENTAL DE NUEVO LEÓN, A.C.



ANEXOS

- LABORATORIOS ABC QUÍMICA INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS S.A. DE C.V.
- LUZ Y FUERZA DEL CENTRO
- PETRÓLEOS MEXICANOS
- PROCURADURÍA FEDERAL DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE
- SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
- SECRETARÍA DE ECONOMÍA
- SECRETARÍA DE ENERGÍA
- SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
- SECRETARÍA DE MARINA-ARMADA DE MÉXICO
- SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
- SECRETARÍA DE SALUD
- SECRETARÍA DEL TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL
- SOCIEDAD MEXICANA DE TOXICOLOGIA
- UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ÍNDICE

1. Introducción
2. Objetivo
3. Campo de aplicación
4. Referencias
5. Definiciones
6. Procedimiento para determinar si un residuo es peligroso
7. Características que definen a un residuo como peligroso
8. Procedimiento para la Evaluación de la Conformidad
9. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración
10. Bibliografía
11. Vigilancia de esta Norma

TABLAS:

Tabla 1: Códigos de Peligrosidad de los Residuos (CPR)

Tabla 2: Límites Máximos Permisibles para los Constituyentes Tóxicos en el Extracto PECT.

LISTADOS:

Listado 1: Clasificación de residuos peligrosos por fuente específica.

Listado 2: Clasificación de residuos peligrosos por fuente no específica.

Listado 3: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Agudos).

Listado 4: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Crónicos).

ANEXOS

Listado 5: Clasificación por tipo de residuos, sujetos a Condiciones Particulares de Manejo.

FIGURA:

Figura 1: Diagrama de flujo del procedimiento para identificar la peligrosidad de un residuo (listados y caracterización).

ANEXO:

Anexo 1: Bases para listar residuos peligrosos por “Fuente Específica” y “Fuente No Específica”, en función de sus Toxicidades ambiental, aguda o crónica.

1. Introducción

Los residuos peligrosos, en cualquier estado físico, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables, tóxicas, y biológico-infecciosas, y por su forma de manejo pueden representar un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población en general, por lo que es necesario determinar los criterios, procedimientos, características y listados que los identifiquen.

Los avances científicos y tecnológicos y la experiencia internacional sobre la caracterización de los residuos peligrosos han permitido definir como constituyentes tóxicos ambientales, agudos y crónicos a aquellas sustancias químicas que son capaces de producir efectos adversos a la salud o al ambiente.

2. Objetivo

Esta Norma Oficial Mexicana establece el procedimiento para identificar si un residuo es peligroso, el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales.

3. Campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en lo conducente para los responsables de identificar la peligrosidad de un residuo.

4. Referencias

4.1 Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección Ambiental.-Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de agosto de 2003.

4.2 Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993, Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 22 de octubre de 1993, la cual ha cambiado de nomenclatura en dos ocasiones, la primera, por el Acuerdo SECRETARÍA publicado en el D.O.F. el 29 de noviembre de 1994, siendo modificada a NOM-053ECOL-1993 y, la segunda, por el

ANEXOS

Acuerdo emitido en el mismo órgano de difusión el 23 de abril de 2003, quedando con el nombre que aparece al inicio de esta cita.

4.3 Norma Oficial Mexicana NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, Protección ambiental-Salud ambiental-Residuos peligrosos biológico-infecciosos-Clasificación y especificaciones de manejo, publicada en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 17 de febrero de 2003, la cual cambió de nomenclatura por el Acuerdo SECRETARÍA publicado en el D.O.F. el 23 de abril de 2003, quedando con el nombre que aparece al inicio de esta cita.

4.4 Norma Oficial Mexicana NOM-133-SEMARNAT-2000, Protección Ambiental-Bifenilos Policlorados (BPC's)-Especificaciones de manejo, publicada en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 10 de diciembre de 2001, la cual cambió de nomenclatura por el Acuerdo SECRETARÍA publicado en el D.O.F. el 23 de abril de 2003, quedando con el nombre que aparece al inicio de esta cita.

4.5 Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de marzo de 2005.

4.6 Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de septiembre de 2004.

4.7 Norma Oficial Mexicana NOM-002-SCT/2003, Listado de las Substancias y Materiales Peligrosos más usualmente transportados, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de diciembre de 2003.

5. Definiciones

Para los efectos de esta Norma Oficial Mexicana se consideran las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y en los Reglamentos correspondientes y las siguientes:

5.1 Constituyente Tóxico.- Cualquier sustancia química contenida en un residuo y que hace que éste sea peligroso por su toxicidad, ya sea ambiental, aguda o crónica.

5.2 CRETIB.-El acrónimo de clasificación de las características a identificar en los residuos peligrosos y que significa: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico ambiental, inflamable y biológico-infeccioso.

5.3 CRIT.-El acrónimo de clasificación de las características a identificar en los residuos peligrosos y que significa: corrosivo, reactivo, inflamable y tóxico ambiental.

5.4 Extracto PECT.- El lixiviado a partir del cual se determinan los constituyentes tóxicos del residuo y su concentración con la finalidad de identificar si éste es peligroso por su toxicidad al ambiente.

ANEXOS

5.5 Fuente específica.- Las actividades que generan residuos peligrosos y que están definidas por giro o proceso industrial.

5.6 Fuente no específica.- Las actividades que generan residuos peligrosos y que por llevarse a cabo en diferentes giros o procesos se clasifican de manera general.

5.7 Ley.-La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

5.8 PECT.-Procedimiento de Extracción de Constituyentes Tóxicos.

5.9 Residuos peligrosos resultado del desecho de productos fuera de especificaciones o caducos.- Sustancias químicas que han perdido, carecen o presentan variación en las características necesarias para ser utilizados, transformados o comercializados respecto a los estándares de diseño o producción originales.

5.10 Reglamento.-El Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

5.11 Secretaría.-La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

5.12 Toxicidad.-La propiedad de una sustancia o mezcla de sustancias de provocar efectos adversos en la salud o en los ecosistemas.

5.13 Toxicidad Ambiental.-La característica de una sustancia o mezcla de sustancias que ocasiona un desequilibrio ecológico.

5.14 Toxicidad Aguda.-El grado en el cual una sustancia o mezcla de sustancias puede provocar, en un corto periodo de tiempo o en una sola exposición, daños o la muerte de un organismo.

5.15 Toxicidad Crónica.- Es la propiedad de una sustancia o mezcla de sustancias de causar efectos dañinos a largo plazo en los organismos, generalmente a partir de exposiciones continuas o repetidas y que son capaces de producir efectos cancerígenos, teratogénicos o mutagénicos.

6. Procedimiento para determinar si un residuo es peligroso

6.1 El procedimiento para determinar si un residuo es peligroso se presenta en la Figura 1.

6.2 Un residuo es peligroso si se encuentra en alguno de los siguientes listados:

Listado 1: Clasificación de residuos peligrosos por fuente específica.

Listado 2: Clasificación de residuos peligrosos por fuente no específica.

Listado 3: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Agudos).

Listado 4: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Crónicos).

ANEXOS

Listado 5: Clasificación por tipo de residuos, sujetos a Condiciones Particulares de Manejo.

6.2.1 Las Toxicidades aguda y crónica referidas en los Listados 1, 2, 3 y 4 de esta Norma Oficial Mexicana no están contempladas en los análisis a realizar para la determinación de las características CRIT de peligrosidad en los residuos.

6.2.2 El Anexo 1 de esta Norma Oficial Mexicana contiene las bases para listar residuos peligrosos por “Fuente Específica” y “Fuente No Específica”, en función de sus Toxicidades ambiental, aguda o crónica.

6.3 Si el residuo no se encuentra en ninguno de los Listados 1 a 5 y es regulado por alguno de los criterios contemplados en los numerales 6.3.1 a 6.3.4 de esta norma, éste se sujetará a lo dispuesto en el Instrumento Regulatorio correspondiente.

6.3.1 Los lodos y biosólidos están regulados por la NOM-004-SEMARNAT-2002.

6.3.2 Los bifenilos policlorados (BPC’s) están sujetos a las disposiciones establecidas en la NOM-133-SEMARNAT-2000.

6.3.3 Los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos están sujetos a lo definido en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

6.3.4 Los jales mineros se rigen bajo las especificaciones incluidas en la NOM-141SEMARNAT-2003.

6.4 Si el residuo no está listado o no cumple con las particularidades establecidas en el inciso 6.3 se deberá definir si es que éste presenta alguna de las características de peligrosidad que se mencionan en el numeral 7 de esta Norma Oficial Mexicana. Esta determinación se llevará a cabo mediante alguna de las opciones que se mencionan a continuación:

6.4.1 Caracterización o análisis CRIT de los residuos junto con la determinación de las características de Explosividad y Biológico-Infecioso.

6.4.2 Manifestación basada en el conocimiento científico o la evidencia empírica sobre los materiales y procesos empleados en la generación del residuo en los siguientes casos:

6.4.2.1 Si el generador sabe que su residuo tiene alguna de las características de peligrosidad establecidas en esta norma.

6.4.2.2 Si el generador conoce que el residuo contiene un constituyente tóxico que lo hace peligroso.

6.4.2.3 Si el generador declara, bajo protesta de decir verdad, que su residuo no es peligroso.

7. Características que definen a un residuo como peligroso

7.1 El residuo es peligroso si presenta al menos una de las siguientes características, bajo las condiciones señaladas en los numerales 7.2 a 7.7 de esta Norma Oficial.

ANEXOS

Mexicana:

- Corrosividad
- Reactividad
- Explosividad
- Toxicidad Ambiental
- Inflamabilidad
- Biológico-Infeciosa

7.1.1 Las Toxicidades aguda y crónica quedan exceptuadas de los análisis a realizar para la determinación de la característica de Toxicidad Ambiental en los residuos establecida en el numeral 7.5 de esta Norma Oficial Mexicana.

7.2 Es Corrosivo cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

7.2.1 Es un líquido acuoso y presenta un PH menor o igual a 2,0 o mayor o igual a 12,5 de conformidad con el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

7.2.2 Es un sólido que cuando se mezcla con agua destilada presenta un PH menor o igual a 2,0 o mayor o igual a 12,5 según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

7.2.3 Es un líquido no acuoso capaz de corroer el acero al carbón, tipo SAE 1020, a una velocidad de 6,35 milímetros o más por año a una temperatura de 328 K (55°C), según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

7.3 Es Reactivo cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

7.3.1 Es un líquido o sólido que después de ponerse en contacto con el aire se inflama en un tiempo menor a cinco minutos sin que exista una fuente externa de ignición, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

7.3.2 Cuando se pone en contacto con agua reacciona espontáneamente y genera gases inflamables en una cantidad mayor de 1 litro por kilogramo del residuo por hora, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

7.3.3 Es un residuo que en contacto con el aire y sin una fuente de energía suplementaria genera calor, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

7.3.4 Posee en su constitución cianuros o sulfuros liberables, que cuando se expone a condiciones ácidas genera gases en cantidades mayores a 250 mg de ácido cianhídrico por kg de residuo o 500 mg de ácido sulfhídrico por kg de residuo, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

ANEXOS

7.4 Es Explosivo cuando es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva solo o en presencia de una fuente de energía o si es calentado bajo confinamiento. Esta característica no debe determinarse mediante análisis de laboratorio, por lo que la identificación de esta característica debe estar basada en el conocimiento del origen o composición del residuo.

7.5 Es Tóxico Ambiental cuando:

7.5.1 El extracto PECT, obtenido mediante el procedimiento establecido en la NOM-053-SEMARNAT-1993, contiene cualquiera de los constituyentes tóxicos listados en la Tabla 2 de esta Norma en una concentración mayor a los límites ahí señalados, la cual deberá obtenerse según los procedimientos que se establecen en las Normas Mexicanas correspondientes.

7.6 Es **Inflamable** cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

7.6.1 Es un líquido o una mezcla de líquidos que contienen sólidos en solución o suspensión que tiene un punto de inflamación inferior a 60,5°C, medido en copa cerrada, de conformidad con el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente, quedando excluidas las soluciones acuosas que contengan un porcentaje de alcohol, en volumen, menor a 24%.

7.6.2 No es líquido y es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos a 25°C, según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.

7.6.3 Es un gas que, a 20°C y una presión de 101,3 kPa, arde cuando se encuentra en una mezcla del 13% o menos por volumen de aire, o tiene un rango de inflamabilidad con aire de cuando menos 12% sin importar el límite inferior de inflamabilidad.

7.6.4 Es un gas oxidante que puede causar o contribuir más que el aire, a la combustión de otro material.

7.7 Es **Biológico-Infecioso** de conformidad con lo que se establece en la NOM-087SEMARNAT-SSA1-2002, referida en el punto 4 de esta Norma.

8. Procedimiento para la evaluación de la conformidad

8.1 Las muestras para determinaciones analíticas deben ser tomadas directamente a la salida del proceso o del área de almacenamiento en su caso, de conformidad con los procedimientos establecidos en la Norma Mexicana correspondiente y deberán ser representativas del volumen generado, considerando las variaciones en el proceso y, además, se debe establecer la cadena de custodia para las mismas.

8.2 La Secretaría reconocerá las determinaciones analíticas de la prueba CRIT que hayan sido muestreadas y analizadas por un laboratorio acreditado y aprobado conforme a las disposiciones legales aplicables.

9. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración

ANEXOS

Esta Norma Oficial Mexicana no concuerda con ninguna norma internacional ni norma mexicana.

10. Bibliografía

10.1 Ley Federal sobre Metrología y Normalización, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de julio de 1992 y reformada por Decretos publicados en el mismo órgano el 24 de diciembre de 1996 y el 20 de mayo de 1997.

10.2 Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 14 de enero de 1999.

10.3 Code of Federal Regulations, Vol. 40 Part. 261. 1999. U.S.A. (Código de Regulaciones Federales, Vol. 40, Parte 261, 1999, Estados Unidos de América).

10.4 Registro Internacional de Sustancias Químicas Potencialmente Tóxicas, Ginebra, Suiza, 1982.

10.5 Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos de la SCT, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de abril de 1993.

10.6 Hazardous Waste Characteristics Scoping Study. Office of Solid Waste, USEPA, November 1996 (Estudio de los Alcances de las Características de los Residuos Peligrosos, Oficina de Residuos Sólidos, USEPA, Noviembre de 1996).

11. Vigilancia de esta Norma La vigilancia del cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, cuyo personal realizará los trabajos de inspección y vigilancia que sean necesarios.

Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, sus Reglamentos y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

TRANSITORIOS

PRIMERO.-La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor a los noventa días naturales siguientes de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

SEGUNDO.-A la entrada en vigor de esta Norma Oficial Mexicana se abroga la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) el 22 de octubre de 1993.

TERCERO.-Las Constancias de No Peligrosidad que estén vigentes a la entrada en vigor de esta Norma Oficial Mexicana tendrán validez hasta el plazo por el cual fueron emitidas.

ANEXOS

Provéase la publicación de esta Norma Oficial Mexicana en el Diario Oficial de la Federación.

México, Distrito Federal, al segundo día del mes de junio de dos mil seis.-El Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, **José Ramón Ardaín Ituarte**.- Rúbrica.

TABLA 1
CÓDIGOS DE PELIGROSIDAD DE LOS RESIDUOS (CPR)

Características	Código de Peligrosidad de los Residuos (CPR)
Corrosividad	C
Reactividad	R
Explosividad	E
Toxicidad	T
Ambiental	Te
Aguda	Th
Crónica	Tt
Inflamabilidad	I
Biológico-Infecioso	B

Cuando se trate de una mezcla de residuos peligrosos de los Listados 3 y 4 se identificarán con la característica del residuo de mayor volumen, agregándole al CPR la letra "M".

TABLA 2
LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA LOS CONSTITUYENTES TOXICOS EN EL EXTRACTO PECT

No. CAS ¹	Contaminante	LMP ² (mg/L)
CÓNSTITUYENTES INORGÁNICOS (METALES)		
7440-38-2	Arsénico	5.0
7440-39-3	Bario	100.0
7440-43-9	Cadmio	1.0
7440-47-3	Cromo	5.0
7439-97-6	Mercurio	0.2
7440-22-4	Plata	5.0
7439-92-1	Plomo	5.0
7782-49-2	Selenio	1.0

ANEXOS

CÓNSTITUYENTES ORGÁNICOS SEMIVOLATILES

94-75-7	Acido 2,4-Diclorofenoxiacético (2,4-D)	10.0
93-72-1	Acido 2,4,5-Triclorofenoxiopropiónico (Silvex)	1.0
57-74-9	Clordano	0.03
95-48-7	o-Cresol	200.0
108-39-4	m-Cresol	200.0
106-44-5	p-Cresol	200.0
1319-77-3	Cresol	200.0
121-14-2	2,4-Dinitrotolueno	0.13
72-20-8	Endrin	0.02
76-44-8	Heptacloro (y su Epóxido)	0.008
67-72-1	Hexacloroetano	3.0
58-89-9	Lindano	0.4
74-43-5	Metoxicloro	10.0
98-95-3	Nitrobenzeno	2.0
87-86-5	Pentaclorofenol	100.0
8001-35-2	Toxafeno	0.5
95-95-4	2,4,5-Triclorofenol	400.0
88-06-2	2,4,6-Triclorofenol	2.0

CÓNSTITUYENTES ORGÁNICOS VOLATILES

71-43-2	Benceno	0.5
108-90-7	Clorobenceno	100.0
67-66-3	Cloroformo	6.0
75-01-4	Cloruro de Vinilo	0.2
106-46-7	1,4-Diclorobenceno	7.5
107-06-2	1,2-Dicloroetano	0.5
75-35-4	1,1-Dicloroetileno	0.7
118-74-1	Hexaclorobenceno	0.13
87-68-3	Hexaclorobutadieno	0.5
78-93-3	Metil etil cetona	200.0
110-86-1	Piridina	5.0
127-18-4	Tetracloroetileno	0.7
56-23-5	Tetracloruro de CARBONO	0.5
79-01-6	Tricloroetileno	0.5

¹ No. CAS: Número del Chemical Abstracts Service (Servicio de Resúmenes Químicos)

² LMP: Límite Máximo Permisible

ANEXOS

Anexo 3. Base de datos.

La población en la facultad es de 12000 entre alumnos y profesores en promedio al día las personas generan entre 100gr /día* hab. Para conocer la capacidad de la planta se considera que funcionara 5 días a la semana, 260 días al año del total de los 365 y los otros días restantes que son 105 días por paradas por averías, reparaciones, futuras modificaciones o los periodos intersemestrales donde hay poca afluencia de alumnos. De este modo disponemos de los equipos en un año 71.23% de los días del año para su funcionamiento.

La cantidad de horas que trabajaran los equipos serán 5 horas:

$$5 \frac{h}{día} * 260 \frac{días}{año} = 1300 \frac{h}{año}$$

Cantidad de residuos producidos:

$$100 \frac{g}{día * alum} * \frac{1kg}{1000g} * 12000alum = 1200 \frac{kg}{día}$$

Con esto se puede calcular la capacidad mínima necesaria:

$$1200 \frac{kg}{día} * \frac{día}{5 h} = 240 \frac{kg}{h}$$

Capacidad total:

$$240 \frac{kg}{h} * \frac{ton}{1000kg} * (1 linea) * \frac{5h}{día} * \frac{260días}{año} = 312 \frac{ton}{año}$$

Cálculos para la combustión.

Los datos siguientes están basados en los 240 kg de la capacidad mínima.

Materiales	% Distribución en peso	% Humedad que contienen
Papel y cartón	20.2	11
Maderas	0.9	20
Plástico	16.6	2
Tejidos	4.8	10
Alimentos	44	70
Material ferroso	1.7	3
Material no ferroso	1.8	3
Inertes	3.6	11
Vidrio	6.4	2
Total	100	

ANEXOS

Humedad	% Peso de lo que es seco
2.222	17.978
0.18	0.72
0.332	16.268
0.48	4.32
30.8	13.2
0.051	1.649
0.054	1.746
0.396	3.204
0.128	6.272
34.643	65.357

En cuanto a los elementos químicos que conforman los componentes del residuo tomando en cuenta que los datos son un valor aproximado de los componentes.

H ₂ O	C	H	O	N	S	Cl	Cenizas	Partículas
34.643	24.3872	3.6385	16.7233	0.3356	0.0767	0.4	5	0.1

Componente	%	Peso de los 240 kg
H ₂ O	34.6430	83.1432
C	26.8364	64.4074
H ₂	8.5369	20.4886
O ₂	21.6217	51.8921
N ₂	0.3356	0.8054
S	0.0767	0.1841
Cl ₂	2.8492	6.8381
Cenizas	5.0000	12.0000
Partículas	0.1000	0.2400
Total	100.000	240.00

ANEXOS

Componente	Moles	Oxigeno	kg moles de oxigeno
CO	0.2681	1	0.2681
CO₂	2.6812	1	2.6812
HCl	2.5796	0	0.0000
SO_x	0.0057	1	0.0057
NO_x	0.0259	1	0.0259
DIOXINAS Y FURANOS	7.0447	3	10.5671
H₂O	3.0492	1	3.0492
N₂	2.8013	0	0.0000
Total			16.5971

Requerimientos al 200%		Cantidad	Unidad
Oxigeno estequiometrico		16.5971	kg mol
Exceso de aire		33.1943	kg mol
Oxígeno total		49.7914	kg mol
Nitrógeno total		187.3106	kg mol
Aire total		237.1020	kg mol/h
Flujo de aire	5796.7406	atm m ³ /h	
Flujo másico	8.2426	kg/h	

Compuesto	Mg de contaminante	mg/m ³
CO	9572.152542	441809.9539
CO₂	60921.60707	694182.6516
HCl	70748.78903	575110.0582
SO_x	71.70626157	1262778.339
NO_x	431.1963607	946593.2052
DIOXINAS Y FURANOS	16827.75754	9904895.873
H₂O	169258.6931	10052.58153
N₂	100000	441857.2738
Total	427831.9019	

Cálculos para el lavador.

velocidad del gas permisible en el recipiente

$$\rho_g := \frac{P_{ope} \cdot p_{maire} \cdot \gamma_g}{z \cdot R1 \cdot T_{ope1}}$$

$$\rho_g = 0.21018$$

$$w_g := \rho_g \cdot Q_g \quad w_L := \rho_L \cdot Q_{L1}$$

$$w_g = 9.342 \quad w_L = 12.865$$

$$j := \left(\frac{w_L}{w_g} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_L}} \quad +$$

$$j = 0.088$$

$0.1 \geq j \leq 0.04$ verificar ecuaciones con respecto a j

$$k_v := 0.45942 - (0.54293 \cdot j) + [17.00791 \cdot (j - 0.04)^2] - [237.42792 \cdot (j - 0.04)^3]$$

$$k_v = 0.42457$$

$$V_{g1} := k_v \cdot \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_g)}{\rho_g}}$$

$$V_{g1} = 6.63$$

$$V_g := F_v \cdot V_{g1} \quad V_g = 5.635$$

area de la seccion transversal requerida para el flujo de gas

$$A_{g1} := \frac{Q_g}{V_g}$$

$$A_g := F_a \cdot A_{g1}$$

$$A_g = 9.465$$

diametro del recipiente

$$D1 := F_{20} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot A_g}{\pi}}$$

$$D1 = 42$$

velocidad del recipiente

$$A_{g2} := \left(\frac{D1}{F_{20}} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$A_{g2} = 9.465$$

$$V_{g2} := \frac{Q_g}{A_{g2}}$$

$$V_{g2} = 4.696$$

velocidad del gas permisible en el recipiente

$$k_h := 1.25 \cdot k_v$$

$$k_h = 0.531$$

$$V_G := k_h \cdot \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g}}$$

$$V_G = 8.287$$

$$V_{G1} := F_v \cdot V_G$$

$$V_{G1} = 7.044$$

area de la seccion transversal para el flujo de gas

$$A_G := \frac{Q_g}{V_{G1}}$$

$$A_G = 6.31$$

$$A_{G1} := F_a \cdot A_G$$

$$A_{G1} = 7.572$$

+

dimensionamiento inicial del seprador volumen de retencion maximo de liquido

$$v_{rtot} = 127.5$$

diametro del equipo

$$a_{tot} := 3 \cdot A_{G1}$$

$$a_{tot} = 22.716$$

$$D_{11} := F_{20} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot a_{tot}}{\pi}}$$

$$D_{11} = 64.536$$

$$D_{12} := 66$$

$$l_{eff5} := r_h \cdot \frac{D_{12}}{f_{25}}$$

$$l_{eff5} = 198$$

$$f_{24} := 12$$

ANBBL - NAAL

$$ANBBL := f_{24} \cdot \frac{v_{rtot}}{l_{eff5}}$$

$$ANBBL = 7.727$$

$$ANAL := f_{24} \cdot \frac{v_{r1}}{l_{eff5}}$$

$$ANAL = 0.909$$

8.Avd

$$Avd := Asep - (Afon + ANBBL)$$

$$Avd = 14.092$$

comparacion

$$AG1 = 7.572$$

$$Avd = 14.092$$

$$AG1 < \mu < Avd$$

d := 60 tanteo 2

$$leff6 := rh \cdot \frac{d}{f25}$$

$$leff6 = 180$$

$$anbbl := f24 \cdot \frac{vrtot}{leff6}$$

$$anbbl = 8.5$$

$$anal := f24 \cdot \frac{vr1}{leff6}$$

$$anal = 1$$

Cálculos para la torre de enfriamiento.

Cálculo de un enfriador de gas por contacto directo. Una operación de enfriamiento consiste en pasar 50 000 lb/h de gas seco de peso molecular 29 (esencialmente nitrógeno) sobre un enrejado de material caliente de cuya superficie debe excluirse el oxígeno. Al pasar sobre el enrejado el gas se calienta de 200 a 300 °F y sale con un punto de rocío de 120 °F.

Después este gas va a un enfriador de contacto directo para enfriarse de nuevo a 200 °F y deshumidificarse con agua que se calienta de 85 a 120 °F. Se permite una caída de presión de 2 plg.

(a) ¿cuántas unidades de difusión se requieren para efectuar este proceso?

(b) Usando datos estándar de pequeñas caídas de presión existentes en la literatura, calcule las dimensiones de la torre de contacto directo. En la solución de este problema se usarán datos de un relleno simple descrito por Simpson y Sherwood.

Solución. Base: 1 pie² de área de piso.

(a) Para el empaque de la torre se usaran láminas de fibra comprimida.

ANEXOS

Estas torres pueden operarse fácilmente con velocidades de gas de 450 ppm con caídas de presión razonables y eliminación de arrastre, debido a que son torres del tipo de película. Si la carga del gas se supone de 1 500 lb/(h) (pie²), corresponderá a una velocidad de gas a la temperatura promedio de 450 ppm.

Una velocidad mayor de gas no puede justificarse, y una menor resultará en una torre de sección transversal innecesariamente grande. Esto último sólo puede comprobarse mediante cálculo de la caída de presión una vez que la altura de la torre se ha determinado.

Para cerrar el balance de calor y determinar la transferencia total de calor y la carga líquida, es necesario suponer la humedad del gas a la salida. Suposición: 20% del contenido inicial de vapor del gas entra a la masa de agua.

$$\begin{aligned} \text{En la entrada del gas } X_1 &= \frac{1.69}{14.7 - 1.69} * \frac{18}{29} = 0.0807 \text{ bl/lb} \\ G &= 1500 \text{ lb/h} \end{aligned}$$

Cantidad total de agua en gas a la entrada = $1500 \times 0.0807 = 121.05 \text{ lb/h}$

El gas a la entrada está a 300°F (148.8 °C) y 120 °F (48.8 °C) de punto de rocío. Usar 0.25 Btu/(lb) (°F) como calor específico del nitrógeno.

$$\begin{aligned} H_1 &= (0.0807 * 120) + (0.0807 * 1025.8) + (0.45 * 0.0807)(300 - 120) + (0.25 * 300) \\ &= 174.0 \text{ Btu/lb de aire seco} \end{aligned}$$

Se ha supuesto que el 20% del vapor se difunde hacia el agua.

$$\text{Humedad del gas a la salida, } X_2 = \frac{121.05(1.0 - 0.20)}{1500} = 0.06456 \frac{\text{lb}}{\text{lb}}$$

$$\text{Punto de rocío del gas a la salida, } = \frac{P_w}{15.7 - P_w} \left(\frac{18}{29} \right) = 0.06456$$

$$P_w = \frac{1.479 \text{ lb}}{p \text{ l g}^2} a - 112.9 \text{ °F punto rocío}$$

El gas de salida tiene una temperatura de 206 °F y 112.9 °F de punto de rocío.

$$\begin{aligned} H_2 &= 0.66456 \times 112.9 + 0.06456 \times 1029.8 + 0.06456 \times 0.45(200 - 112.9) + 0.25 \times 200 \\ &= 126.4 \text{ Btu/lb de aire seco} \end{aligned}$$

ANEXOS

$$\text{Carga total de calor, } q = G(H_1 - H_2) = 1500(174.0 - 126.4) = 71500 \text{ Btu/h}$$

$$\text{Carga de agua, } L = \frac{71500}{120 - 85} = 2040 \text{ lb/h}$$

Esta carga de agua corresponde a 4.0 gpm/(pie²), que es razonable para este tipo de aparatos, como ya explicamos.

Intervalo 1:

$$\frac{K_x a \Delta V}{L} = 0 \text{ a } 0.05$$

$$\text{De la Fig. 17.4 a } 300 \text{ } ^\circ\text{F, } Le = 0.93$$

$$C = 0.25 + 0.45 * 0.0807 = 0.283 \text{ Btu/(lb)}(^\circ\text{F)}$$

$$h_a V = K_x a \frac{V}{L} L(Le)C = 0.05 * 2040 * 0.93 * 0.283 = 26.9 \text{ Btu/(h)}(^\circ\text{F)}$$

$$q_c = h_a V(T - t) = 26.9(300 - 120) = 4850 \text{ Btu/b}$$

$$\Delta T = \frac{4850}{0.283 * 1500} = 11.4 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_{0.05} = 300 - 11.4 = 288.6 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Puesto que el punto de rocío del gas y del agua a la salida son los mismos en este problema, en el primer intervalo no hay difusión. En cualquier otro problema puede haber difusión en el primer intervalo y debe tratarse de la misma forma que en el segundo intervalo

$$A_t = \frac{4850}{2040} = 2.38 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{0.05} = 120 - 2.38 = 117.6 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Las temperaturas para el primer intervalo

$$\text{intervalo 2} = \frac{K_x a \Delta V}{L} = 0.05 \text{ a } 0.15$$



ANEXOS

$$h_a V = 0.10 * 2040 * 0.93 * 0.283 = 53.8 \text{ Btu}/(h)(^{\circ}F)$$

Para el intervalo 2:

$$q_c = 53.8 (288.6 - 117.6) = 9200 \text{ Btu}/h$$

$$\Delta_T = \frac{9200}{0.283 * 1500} = 21.7 ^{\circ}F$$

$$T_{0.15} = 288.6 - 21.7 = 266.9 ^{\circ}F$$

$$X'_{117.6^{\circ}F} = 0.0748 \text{ lb}/\text{lb}$$

Lb de agua difundidas durante el intervalo = $K_X a V (X - X')$

$$K_X a V = K_X a \frac{V}{L} * L = 0.10 * 2040 = 204.0 \text{ lb}/(h)(\text{lb}/\text{lb})$$

$$K_X a V (X - X') = 204.0(0.0807 - 0.0748) = 1.203 \text{ lb}/h$$

$$\text{lb agua remanente} = 121.05 - 1.203 = 119.85 \text{ lb}/h$$

$$\lambda_{117.6^{\circ}F} = 1027 \text{ Btu}/\text{lb}$$

$$q_c = 1.203 * 1027 = 1235 \text{ Btu}/h$$

$$q = 9200 + 1235 = 10435 \text{ Btu}/h$$

$$\Delta_T = \frac{10435}{2040} = 5.12 ^{\circ}F$$

$$t_{0.15} = (117.6 - 5.1) = 112.5 ^{\circ}F$$

$$X'_{112.5^{\circ}F} = 0.0640 \text{ lb}/\text{lb}$$

$$X'_{112.5^{\circ}F} = \frac{119.85}{1500} = 0.0798 \text{ lb}/\text{lb}$$

$$\text{intervalo 3} = \frac{K_X a \Delta V}{L} = 0.15 \text{ a } 0.25$$

$$h_a V = 53.8 \text{ Btu}/h(^{\circ}F)$$



ANEXOS

Para el intervalo:

$$q_c = 53.8(266.9 - 112.5) = 8300 \text{ Btu/h}$$

$$A_T = \frac{8300}{0.283 * 1500} = 19.5 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{0.25} = (266.9 - 19.5) = 247.4 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\text{lb de agua difundidas durante el intervalo} = 204.0(0.0798 - 0.0640) = 3.22 \text{ lb/h}$$

$$\text{lb de agua remanentes} = 119.85 - 3.22 = 116.63 \text{ lb/h}$$

$$\lambda_{112.6^\circ\text{F}} = 1030 \text{ Btu/lb}$$

$$q_c = 3.22 * 1030 = 3320 \text{ Btu/h}$$

$$q = 8300 + 3320 = 11620 \text{ Btu/h}$$

$$\Delta_T = \frac{11620}{2040} = 5.70 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{0.25} = (112.5 - 5.7) = 106.8 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$X'_{106.8^\circ\text{F}} = 0.0533 \text{ lb/lb}$$

$$X_{106.8^\circ\text{F}} = \frac{116.63}{1500} = 0.0775 \text{ lb/lb}$$

ANEXOS

Intervalo	$K_x a \frac{V}{L}$	T	T	H_2O difundido lb	q_c	q_d
	0	300	120			
1	0.05	288.6	117.6	0	4850	0
2	0.15	266.9	112.5	1.20	9200	1235
3	0.25	247.4	106.8	3.22	8300	3320
4	0.35	229.6	100.6	4.99	7560	5150
5	0.45	213.2	94.0	6.29	6950	6520
6	0.538	200.0	88.0	6.22	5640	6460
	Nd=0.538			21.92	42500	22685

$$q = 650185 \text{ Btu/h}$$

Difusión supuesta = 20%

$$\text{Difusión calculada} = 21.92 \left(\frac{100}{121.05} \right) = 18.10 \%$$

Se ve que el sumario anterior está algo sobrado, ya que la temperatura del agua termina en 88 °F. Mientras que la temperatura de entrada se especificó a 85 °F. Si él desea una respuesta de mayor precisión, se encuentra que la temperatura y la humedad chocan cuando la difusión se supone de 18.5% y se obtienen 0.55 unidades de difusión. Se pueden hacer gráficas que muestran la variación de T y t con la altura.

(b) Los siguientes datos redondeados se dan para una torre experimental con placas verticales:

Sección transversal de la torre: $41 \frac{5}{8}$ por $23 \frac{7}{8}$ plg

Altura del relleno: $41 \frac{3}{8}$ plg

Espesor de la hoja: $\frac{1}{8}$ plg Espaciado horizontal: $\frac{5}{8}$ pig centros

ANEXOS

Número de espreas: 18

$L, lb\ agua / (h)(pie^2)$	$G, lb\ aire / (h)(pie^2)$	$K_x a$	$\Delta P, plg\ H_2O$
882	700	190	0.040
	1100	258	0.083
	1500	312	0.136
1178	700	200	0.049
	1100	290	0.095
	1500	373	0.015
1473	700	206	0.060
	1100	315	0.166
	1500	420	0.162

Tabla 16. Cálculos correspondientes a los para G/L (Fuente: Donald Q. Kern 1999)

Para $G = 1500$, extrapole a $L = 2040$ en coordenadas logarítmicas. $K_x a = 510$.

$$\text{Altura de la torre, } Z = \frac{n_d L}{K_x a} = 0.54 * \frac{2040}{510} = 2.16 \text{ pies}$$

$$\text{Sección transversal} = \frac{50000}{1500} = 33.3 \text{ pies}$$

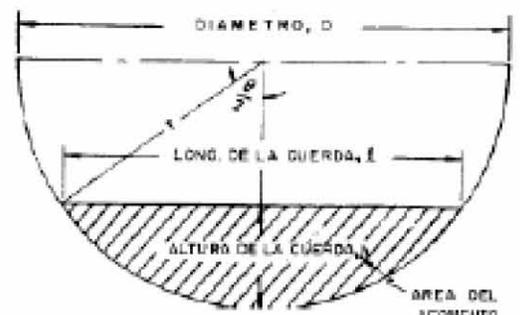
Note la pequeña altura. Aun con un factor de seguridad adecuado se requerirá una altura pequeña para enfriar el gas.

La caída de presión extrapolada es 0.175 plg de H_2O para $41 \frac{3}{8}$ plg de altura.

ANEXOS

Anexo 4. Tabla de valores de R para el cálculo del lavador.

R*	L*	A*	R*	L*	A*	R*	L*	A*	R*	L*	A*	R*	L*	A*	R*	L*	A*
0.030	0.341	0.0087	0.090	0.572	0.0446	0.150	0.714	0.0941	0.210	0.815	0.163	0.266	0.872	0.201	0.340	0.947	0.300
0.031	0.347	0.0093	0.091	0.575	0.0453	0.151	0.716	0.0950	0.211	0.816	0.164	0.266	0.873	0.202	0.342	0.949	0.302
0.032	0.352	0.0096	0.092	0.578	0.0460	0.152	0.718	0.0959	0.212	0.817	0.165	0.267	0.874	0.203	0.344	0.950	0.305
0.033	0.357	0.0101	0.093	0.581	0.0468	0.153	0.720	0.0968	0.213	0.819	0.166	0.268	0.875	0.204	0.346	0.951	0.307
0.034	0.362	0.0106	0.094	0.584	0.0475	0.154	0.722	0.0977	0.214	0.820	0.167	0.269	0.876	0.205	0.348	0.953	0.309
0.035	0.368	0.0110	0.095	0.588	0.0483	0.155	0.724	0.0986	0.215	0.822	0.168	0.269	0.877	0.207	0.350	0.954	0.312
0.036	0.373	0.0115	0.096	0.589	0.0490	0.156	0.726	0.0994	0.216	0.823	0.169	0.269	0.879	0.209	0.352	0.957	0.314
0.037	0.378	0.0119	0.097	0.592	0.0498	0.157	0.728	0.1005	0.217	0.824	0.169	0.269	0.882	0.211	0.354	0.960	0.316
0.038	0.382	0.0124	0.098	0.596	0.0506	0.158	0.729	0.1014	0.218	0.826	0.171	0.269	0.884	0.213	0.356	0.963	0.318
0.039	0.387	0.0129	0.099	0.597	0.0513	0.159	0.731	0.1023	0.219	0.827	0.162	0.269	0.886	0.215	0.358	0.965	0.320
0.040	0.392	0.0134	0.100	0.600	0.0520	0.160	0.733	0.1033	0.220	0.828	0.163	0.270	0.888	0.218	0.370	0.966	0.336
0.041	0.397	0.0139	0.101	0.603	0.0528	0.161	0.735	0.1042	0.221	0.830	0.164	0.272	0.890	0.220	0.375	0.968	0.343
0.042	0.401	0.0144	0.102	0.606	0.0536	0.162	0.737	0.1051	0.222	0.831	0.165	0.274	0.892	0.222	0.379	0.970	0.350
0.043	0.406	0.0149	0.103	0.608	0.0544	0.163	0.739	0.1061	0.223	0.833	0.166	0.276	0.894	0.225	0.380	0.971	0.348
0.044	0.410	0.0155	0.104	0.611	0.0551	0.164	0.741	0.1070	0.224	0.834	0.167	0.278	0.896	0.227	0.385	0.973	0.355
0.045	0.415	0.0160	0.105	0.613	0.0559	0.165	0.742	0.1080	0.225	0.835	0.168	0.280	0.898	0.229	0.390	0.975	0.361
0.046	0.419	0.0165	0.106	0.616	0.0567	0.166	0.744	0.1089	0.226	0.836	0.169	0.282	0.900	0.231	0.395	0.976	0.367
0.047	0.423	0.0171	0.107	0.618	0.0575	0.167	0.746	0.1099	0.227	0.838	0.171	0.284	0.902	0.234	0.400	0.980	0.374
0.048	0.428	0.0176	0.108	0.621	0.0583	0.168	0.748	0.1108	0.228	0.839	0.172	0.286	0.904	0.236	0.405	0.982	0.380
0.049	0.432	0.0181	0.109	0.623	0.0591	0.169	0.750	0.1118	0.229	0.840	0.173	0.288	0.906	0.238	0.406	0.982	0.380
0.050	0.436	0.0187	0.110	0.626	0.0598	0.170	0.751	0.1127	0.230	0.842	0.174	0.290	0.908	0.241	0.410	0.984	0.386
0.051	0.440	0.0193	0.111	0.628	0.0606	0.171	0.753	0.1137	0.231	0.843	0.175	0.292	0.909	0.243	0.415	0.985	0.392
0.052	0.444	0.0198	0.112	0.631	0.0614	0.172	0.755	0.1146	0.232	0.844	0.176	0.294	0.911	0.245	0.420	0.987	0.399
0.053	0.448	0.0204	0.113	0.633	0.0623	0.173	0.756	0.1156	0.233	0.845	0.177	0.296	0.913	0.248	0.425	0.989	0.405
0.054	0.452	0.0210	0.114	0.636	0.0631	0.174	0.758	0.1166	0.234	0.847	0.178	0.298	0.915	0.250	0.430	0.990	0.411
0.055	0.456	0.0215	0.115	0.638	0.0639	0.175	0.760	0.1175	0.235	0.848	0.179	0.300	0.917	0.252	0.435	0.992	0.417
0.056	0.460	0.0221	0.116	0.640	0.0647	0.176	0.762	0.1185	0.236	0.849	0.180	0.302	0.918	0.255	0.440	0.993	0.424
0.057	0.464	0.0227	0.117	0.643	0.0655	0.177	0.763	0.1195	0.237	0.850	0.181	0.304	0.920	0.257	0.445	0.994	0.430
0.058	0.467	0.0233	0.118	0.645	0.0663	0.178	0.765	0.1204	0.238	0.852	0.182	0.306	0.922	0.259	0.450	0.995	0.436
0.059	0.471	0.0239	0.119	0.648	0.0671	0.179	0.767	0.1214	0.239	0.853	0.183	0.308	0.923	0.262	0.455	0.996	0.443
0.060	0.475	0.0245	0.120	0.650	0.0680	0.180	0.768	0.1224	0.240	0.854	0.185	0.310	0.925	0.264	0.460	0.997	0.449
0.061	0.479	0.0251	0.121	0.652	0.0688	0.181	0.770	0.1234	0.241	0.855	0.186	0.312	0.927	0.266	0.465	0.998	0.456
0.062	0.482	0.0257	0.122	0.655	0.0696	0.182	0.772	0.1244	0.242	0.857	0.187	0.314	0.928	0.268	0.470	0.998	0.462
0.063	0.486	0.0263	0.123	0.657	0.0705	0.183	0.773	0.1253	0.243	0.858	0.188	0.316	0.930	0.271	0.475	0.999	0.469
0.064	0.490	0.0270	0.124	0.659	0.0713	0.184	0.775	0.1263	0.244	0.859	0.189	0.318	0.931	0.273	0.480	0.999	0.475
0.065	0.493	0.0276	0.125	0.661	0.0721	0.185	0.777	0.1273	0.245	0.860	0.190	0.320	0.933	0.276	0.485	1.000	0.481
0.066	0.497	0.0282	0.126	0.664	0.0730	0.186	0.778	0.1283	0.246	0.861	0.191	0.322	0.934	0.278	0.490	1.000	0.487
0.067	0.500	0.0288	0.127	0.666	0.0738	0.187	0.780	0.1293	0.247	0.863	0.192	0.324	0.935	0.281	0.495	1.000	0.494
0.068	0.503	0.0295	0.128	0.668	0.0747	0.188	0.781	0.1303	0.248	0.864	0.193	0.326	0.937	0.283	0.500	1.000	0.500
0.069	0.507	0.0301	0.129	0.670	0.0755	0.189	0.783	0.1313	0.249	0.865	0.194	0.328	0.939	0.285	0.500	1.000	0.500
0.070	0.510	0.0308	0.130	0.672	0.0764	0.190	0.785	0.1323	0.250	0.866	0.195	0.330	0.940	0.288	0.500	1.000	0.500
0.071	0.514	0.0314	0.131	0.675	0.0773	0.191	0.786	0.1333	0.251	0.867	0.197	0.332	0.942	0.290	0.500	1.000	0.500
0.072	0.517	0.0321	0.132	0.677	0.0781	0.192	0.788	0.1343	0.252	0.868	0.198	0.334	0.943	0.293	0.500	1.000	0.500
0.073	0.520	0.0327	0.133	0.679	0.0790	0.193	0.789	0.1353	0.253	0.869	0.199	0.336	0.945	0.295	0.500	1.000	0.500
0.074	0.524	0.0334	0.134	0.681	0.0798	0.194	0.791	0.1363	0.254	0.871	0.200	0.338	0.946	0.297	0.500	1.000	0.500
0.075	0.527	0.0341	0.135	0.683	0.0807	0.195	0.792	0.1373	0.255	0.872	0.201	0.340	0.947	0.300	0.500	1.000	0.500
0.076	0.530	0.0347	0.136	0.685	0.0816	0.196	0.794	0.1383	0.256	0.873	0.202	0.342	0.949	0.302	0.500	1.000	0.500
0.077	0.533	0.0354	0.137	0.688	0.0825	0.197	0.795	0.1393	0.257	0.874	0.203	0.344	0.950	0.305	0.500	1.000	0.500
0.078	0.536	0.0361	0.138	0.690	0.0833	0.198	0.797	0.1403	0.258	0.875	0.204	0.346	0.951	0.307	0.500	1.000	0.500
0.079	0.539	0.0368	0.139	0.692	0.0842	0.199	0.798	0.1414	0.259	0.876	0.205	0.348	0.953	0.309	0.500	1.000	0.500
0.080	0.543	0.0375	0.140	0.694	0.0851	0.200	0.800	0.1424	0.260	0.880	0.206	0.350	0.954	0.312	0.500	1.000	0.500
0.081	0.546	0.0382	0.141	0.696	0.0860	0.201	0.801	0.1434	0.261	0.881	0.207	0.352	0.955	0.314	0.500	1.000	0.500
0.082	0.549	0.0389	0.142	0.698	0.0869	0.202	0.803	0.1444	0.262	0.882	0.208	0.354	0.956	0.316	0.500	1.000	0.500
0.083	0.552	0.0396	0.143	0.700	0.0878	0.203	0.804	0.1454	0.263	0.883	0.209	0.356	0.957	0.318	0.500	1.000	0.500
0.084	0.555	0.0403	0.144	0.702	0.0886	0.204	0.806	0.1465	0.264	0.884	0.210	0.358	0.958	0.320	0.500	1.000	0.500
0.085	0.558	0.0410	0.145	0.704	0.0895	0.205	0.807	0.1475	0.265	0.885	0.211	0.360	0.959	0.322	0.500	1.000	0.500
0.086	0.561	0.0417	0.146	0.706	0.0904	0.206	0.809	0.1485	0.266	0.886	0.212	0.362	0.960	0.324	0.500	1.000	0.500
0.087	0.564	0.0424	0.147	0.708	0.0913	0.207	0.810	0.1496	0.267	0.887	0.213	0.364	0.961	0.326	0.500	1.000	0.500
0.088	0.567	0.0431	0.148	0.710	0.0922	0.208	0.812	0.1506	0.268	0.888	0.214	0.366	0.962	0.328	0.500	1.000	0.500
0.089	0.569	0.0439	0.149	0.712	0.0932	0.209	0.813	0.1516	0.269	0.889	0.215	0.368	0.963	0.330	0.500	1.000	0.500



$$R^* = \frac{\text{Altura de la cuerda}}{\text{Diámetro}} = \frac{h}{D}$$

$$L^* = \frac{\text{Long. de la cuerda}}{\text{Diámetro}} = \frac{L}{D} = \text{Sen } \frac{\theta}{2} = \text{Sen Cos}^{-1} \left(1 - \frac{2h}{D} \right)$$

$$A^* = \frac{A_{\text{segmento}}}{A_{\text{círculo}}} = \frac{r^2 (\theta - \text{Sen}\theta)}{2\pi r^2} = \frac{\theta - \text{Sen}\theta}{2\pi}; \theta = 2 \left[\text{Cos}^{-1} \left(1 - \frac{2h}{D} \right) \right], \theta \text{ en Radianes}$$

ANEXOS

Anexo 5. Diámetros para boquillas y diámetros comerciales para recipientes

Clase ANSI	Tamaño de la boquilla (pulg)										
	2	3	4	6	8	10	12	15	16	18	20
150	10	30	45	65	100	140	185	240	320	345	410
300	15	30	55	95	130	170	245	325	440	565	670
400	20	40	70	100	150	205	295	370	490	580	705
500	20	40	75	120	180	270	330	485	675	825	1020

Pulgadas	Diámetro del recipiente										
	16	20	24	30	36	42	48	54	60	66	72
Pies			2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6

ANEXOS

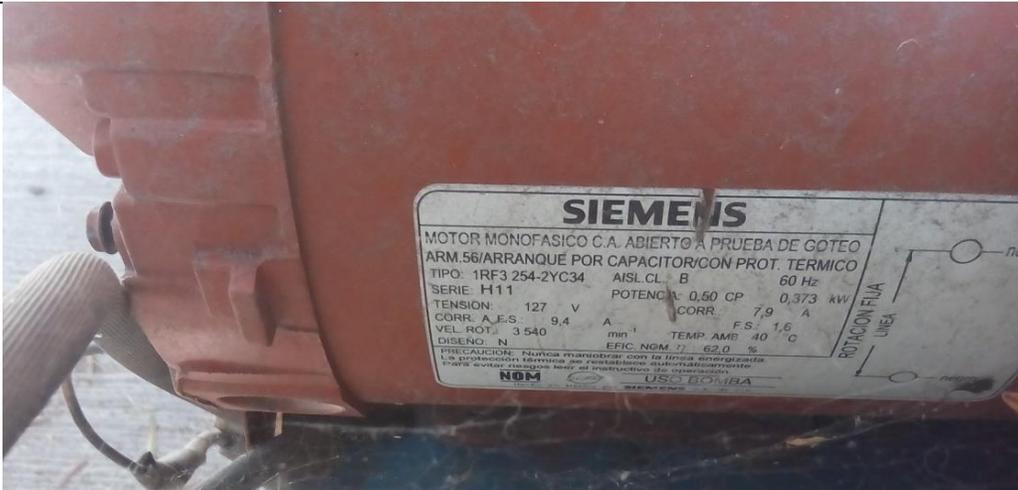
Anexo 6. Hojas de datos de los equipos

Incinerador	Código: BA-01	Carrera: Ingeniería química	
Localización: Laboratorio de desarrollo de procesos	Hoja: 1/1	Fecha: 27/noviembre/2015	
	Ítem: No tiene	Material: Metal-ladrillo refractario	
Denominación: Pos incinerador (Incinerador de doble cámara con aire controlado)			Cantidad: 1
Condiciones de operación:			
Gas:	Gas LP	Volumen:	0.4021m ³
Caudal:	0.05 m ³ /min	Presión de ignición:	0.7697 atm
Temperaturas de ignición:	600/750	Presión de operación:	0.7697 atm
Temperatura proceso:	1000/1250	Tiempo de operación:	15 años
Características del Pos incinerador			
Marca:	Sin marca	Norma:	NOM-098-SEMARNAT
Modelo:	Incinerador doble cámara con aire controlado	Peso máximo de alimentación:	50 Kg
Tipo:	Pos-incinerador	Volumen máximo:	0.20 m ³
Proyecto:			
El diseño de un lavador de gases, neutralizador y adaptación de una torre de enfriamiento para el cumplimiento de la NOM-098-SEMARNAT-2002 en la incineración de desechos de la FES Zaragoza.			
FOTO			
			

ANEXOS

Incinerador	Código: BA-02	Carrera: Ingeniería química	
Localización: Laboratorio de desarrollo de procesos	Hoja: 1/1	Fecha: 27/noviembre/2015	
	Ítem: No tiene	Material: Metal-ladrillo refractario	
Denominación: Pre incinerador (Incinerador de doble cámara con aire controlado)			Cantidad: 1
Condiciones de operación:			
Gas:	Gas LP	Volumen:	1.2428m ³
Caudal:	0.05 m ³ /min	Presión de ignición:	0.7697 atm
Temperaturas de ignición:	100/250	Presión de operación:	0.7697 atm
Temperatura proceso:	600/750	Tiempo de operación:	10 años
Características del Pre- incinerador			
Marca:	Sin marca	Norma:	NOM-098-SEMARNAT
Modelo:	Incinerador doble cámara con aire controlado	Peso máximo de alimentación:	300 Kg
Tipo:	Pre-incinerador	Volumen máximo:	1.0 m ³
Proyecto:			
El diseño de un lavador de gases, neutralizador y adaptación de una torre de enfriamiento para el cumplimiento de la NOM-098-SEMARNAT-2002 en la incineración de desechos de la FES Zaragoza.			
FOTO			
			

ANEXOS

Motor monofásico Bomba o Turbina	Código: GB-01/02	Carrera: Ingeniería química	
Localización: Laboratorio de desarrollo de procesos	Hoja: 1/1	Fecha: 27/noviembre/2015	
	Ítem: No tiene	Material: Metal con protección a la corrosión	
Denominación: Turbina de alimentación de aire (Incinerador de doble cámara con aire controlado)			Cantidad: 2
Condiciones de operación:			
Tensión:	127 v 60 Hz	Peso:	6.50 Kg
Caudal:	0.05 m ³ /min	Eficiencia :	62 %
Temperaturas de operación:	Ambiente 40°C	Corrosión :	7.9
Velocidad de rotación:	3540 rpm	Tiempo de operación:	10 a 15 años
Características de la Turbina			
Marca:	Siemens	Norma:	NOM
Modelo:	H11	Flujo de alimentación:	10.8333 m ³ /min
Tipo:	1RF3254-2YC34	Tipo de alimentación:	Monofásico
Proyecto:			
El diseño de un lavador de gases, neutralizador y adaptación de una torre de enfriamiento para el cumplimiento de la NOM-098-SEMARNAT-2002 en la incineración de desechos de la FES Zaragoza.			
FOTO			
			

ANEXOS

Motor monofásico Bomba o Turbina	Código: GB-01/02	Carrera: Ingeniería química	
Localización: Laboratorio de desarrollo de procesos	Hoja: 1/1	Fecha: 27/noviembre/2015	
	Ítem: No tiene	Material: Metal con protección a la corrosión	
Denominación: Turbina de alimentación de aire (Incinerador de doble cámara con aire controlado)			Cantidad: 1
Condiciones de operación:			
Tensión:	220/440 v 60 Hz	Peso:	8.90 Kg
Caudal:	1.30 m ³ /min	Eficiencia :	62 %
Temperaturas de operación:	Ambiente 40°C	Corrosión :	7.9
Velocidad de rotación:	3465 rpm	Tiempo de operación:	10 a 15 años
Características de la Turbina			
Marca:	S & P	Norma:	NOM
Modelo:	1PC29120CA515RA0	Flujo de alimentación:	21.6666 m ³ /min
Tipo:	5CST-1300	Tipo de alimentación:	Trifásico
Proyecto:			
El diseño de un lavador de gases, neutralizador y adaptación de una torre de enfriamiento para el cumplimiento de la NOM-098-SEMARNAT-2002 en la incineración de desechos de la FES Zaragoza.			
FOTO			
			

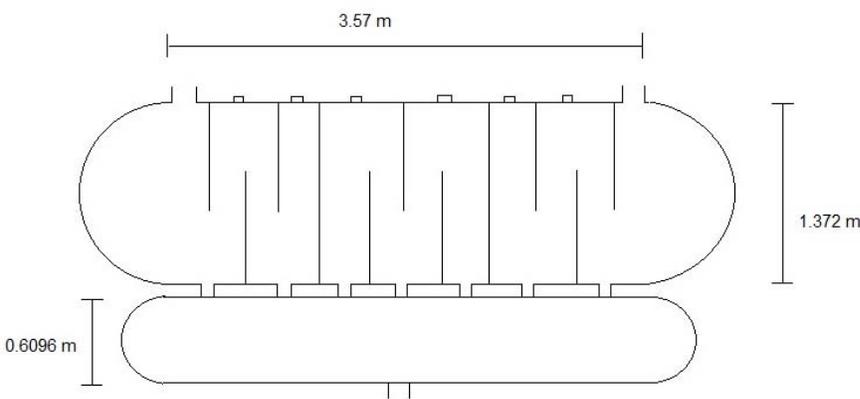
ANEXOS

Torre de enfriamiento	Código: DA-01	Carrera: Ingeniería química	
Localización: Laboratorio de desarrollo de procesos	Hoja: 1/1	Fecha: 27/noviembre/2015	
	Ítem: No tiene	Material: Metal	
Denominación: Torre de enfriamiento de tiro forzado (Enfriamiento y ultimo lavador final)			Cantidad: 1
Condiciones de operación:			
Tensión:	220/440 v 60 Hz	Motor:	5.0 HP
Caudal:	0.58 m ³ /min	Eficiencia :	62 %
Temperaturas de operación:	65 °C	Corrosión :	4.9
Temperatura mínima de salida:	23 °C	Tiempo de operación:	10 a 15 años
Características de la Torre de enfriamiento			
Marca:	Ingeniería, montajes y servicios industriales	Norma:	NOM
Modelo:	AVANT 53502013	Flujo de alimentación:	0.58 m ³ /min
Capacidad del tanque:	1.4580 m ³	Tipo de empaque:	T Aluminio
Proyecto:			
El diseño de un lavador de gases, neutralizador y adaptación de una torre de enfriamiento para el cumplimiento de la NOM-098-SEMARNAT-2002 en la incineración de desechos de la FES Zaragoza.			
FOTO			
			

ANEXOS

Motor torre de enfriamiento	Código: DA-01	Carrera: Ingeniería química	
Localización: Laboratorio de desarrollo de procesos	Hoja: 1/1	Fecha: 27/noviembre/2015	
	Ítem: No tiene	Material: Metal	
Denominación: Torre de enfriamiento de tiro forzado (Enfriamiento y ultimo lavador final)			Cantidad: 1
Condiciones de operación:			
Tensión:	208-230/460 v	Motor:	5.0 HP
Caudal:	0.58 m ³ /min	Eficiencia :	89.5 %
Temperaturas de operación:	40°C	Modelo :	N.P.
Altura:	1000	Tiempo de operación:	10 a 15 años
Características de motor de la Torre de enfriamiento			
Marca:	WEG	Norma:	NOM/nema/ance
Modelo:	00512ET3EM215TW	Flujo de alimentación:	0.58 m ³ /min
Capacidad del tanque:	1.4580 m ³	Peso:	76 Kg
Proyecto:			
El diseño de un lavador de gases, neutralizador y adaptación de una torre de enfriamiento para el cumplimiento de la NOM-098-SEMARNAT-2002 en la incineración de desechos de la FES Zaragoza.			
FOTO			
			

ANEXOS

Lavador Neutralizador	Código: FB-01	Carrera: Ingeniería química	
Localización: Laboratorio de desarrollo de procesos	Hoja: 1/1	Fecha: 27/noviembre/2015	
	Ítem: No tiene	Material: Metal	
Denominación: lavador neutralizador (tren de lavado y obtención de precipitados)			Cantidad: 1
Condiciones de Diseño Tanque:			
Agua de tratamiento:	Agua con hidróxido de sodio	Peso total:	1,500 Kg
Caudal:	1.15 m ³ /min	Presión de operación:	0.7697 atm
Temperatura máxima a la entrada :	1250 °C	Mamparas:	9
Temperatura mínima a la salida:	50 °C	Diámetro de distribuidores de flujo	5 mm
Cantidad de orificios:	157	Distancia ente orificios:	25mm
Largo:	3.570 m	Diámetro:	1.372 m
Volumen:	5.2780 m ³	Área:	1.4784 m ²
Condiciones de Diseño del Tanque Colector:			
Ítem: No tiene	Material: Acero inoxidable	Cantidad: 1	Capacidad de líquido: 0.800 m ³
Largo:	3.57 m	Área:	0.2918 m ²
Volumen:	1.0419 m ³	Temperatura máxima:	90 °C
Modelo:	Digestor	Peso:	200 Kg
Tipo:	Lavador	Presión:	0.7697 atm
Proyecto:			
El diseño de un lavador de gases, neutralizador y adaptación de una torre de enfriamiento para el cumplimiento de la NOM-098-SEMARNAT-2002 en la incineración de desechos de la FES Zaragoza.			
Esquema:			
			



ANEXOS

Anexo 7. Nomenclatura.

PCS= poder calorífico superior.

PCI= poder calorífico inferior.

F_D = Fuerza de arrastre (lb).

C_D = Coeficiente de arrastre (adimensional).

A= Área de la gota (pie^2).

ρ = Densidad de la fase continua (lb/pie^3).

V_t = Velocidad de asentamiento de la gota (pie/seg).

g = Constante de gravedad $32.2 \text{ pie}/\text{seg}^2$

Re= Número de Reynolds.

V_{esfera} =volumen partículas esféricas.

A_{esfera} = área de partículas esféricas.

F_B = fuerza de flotabilidad.

D_t = diámetro interno de la tubería (pie).

π' = Viscosidad ($\text{lb}/\text{pie}\cdot\text{seg}^2$).

D= diámetro de las esfera (pie).

π = Constante adimensional 3.1416.

ρ_l = densidad de líquido (gr/cc).

ρ_g = Densidad del gas (gr/cc).

F_B = fuerza de flotabilidad.

$\mu' = \mu * 2.088 * 10^{-5}$.

μ = Viscosidad (Cp).

D= (d_m)*($3.281 * 10^{-6}$).

D_m = Relación entre el diámetro de la tubería y el diámetro de las gotas (micras).

$\rho_l = 62.4 * Ge$.

PM g = $28.97 * Ge$.

Ge= Gravedad específica, relativa al agua.

V_t =volumen total.

t= Tiempo de separación (seg).

d= Tamaño final de la gota (micrón).

d_o = Tamaño inicial de la gota (micrón).

\emptyset = Fracción del volumen de la fase dispersada (adimensional).

K_s = Parámetro empírico particular del sistema.

j= Parámetro empírico que siempre debe ser mayor que tres (3) y dependiente de la probabilidad de que exista un rebote entre el par de gotas antes de ocurrir la coalescencia.

Lss= relación entre la longitud de costura a costura.

G= velocidad del gas seco por unidad de área $\text{lb}/(\text{h})(\text{pie}^2)$.

L= velocidad del agua por unidad de superficie $\text{lb}/(\text{h})(\text{pie}^2)$.

C= es el calor específico del agua.

H= entalpía.

q= carga total de calor por hora por pie cuadrado.

L_o = agua de compensación.

qd= porción transferida por difusión.

qc= porción que se transfiere por convección.



ANEXOS

λ = es el calor latente promedio.

a = es la superficie del agua por pie cúbico de torre.

dV = es el volumen diferencial de la torre en el que existe la superficie.

A = es la superficie de transferencia de calor.

c = es el calor húmedo del aire definido por $c = 0.24 + 0.45X$

dV = es el volumen diferencial de la torre en el que existe la superficie.

dL = es la razón a la que el material se difunde.

p' = es la presión parcial.

p = es la presión de vapor en el aire.

X' = es la humedad a la temperatura T del agua.

X = es la humedad del aire.

dL = el agua evaporada.

$dq = \text{suma de dos modos de transferencia } dq_c + dq_d$

x = calor latente.

G = carga de gas.

L = carga de líquido.

K_X = es el término de la tasa de transferencia total análogo.

n_t = número de unidades de transferencia.

n_d = cambio total de la temperatura del agua.

HTU= altura de la unidad de transferencia.

GdH= transferencia total de calor en la torre de difusión.

dH= cambio de entalpia en la fase gas.

dT= cambio de temperatura del agua.

LIG= razón de la carga del líquido a la de aire.

h_G = coeficiente de transferencia de calor.

U = coeficiente total de transferencia.

h_L =coeficiente de convección desde la película del líquido a la interfase.

$Gc dt$ =razón de la transferencia de calor a través de la película del líquido.

$h_G/K_x c = 1$ = número de Lewis.

Z = es la altura total que contiene n_t unidades de transferencia.

n_d = es el tamaño requerido para cumplir con las condiciones de proceso.

F_v = factor de seguridad.

D =diámetro del recipiente.

A_g = área del gas.

V_g = velocidad del gas.

V_{min} = velocidad mínima de entrada.

V_{max} = velocidad máxima de entrada.

d_{min} =diámetro mínimo de entrada de la boquilla.

d_{max} = diámetro máximo de entrada de la boquilla.

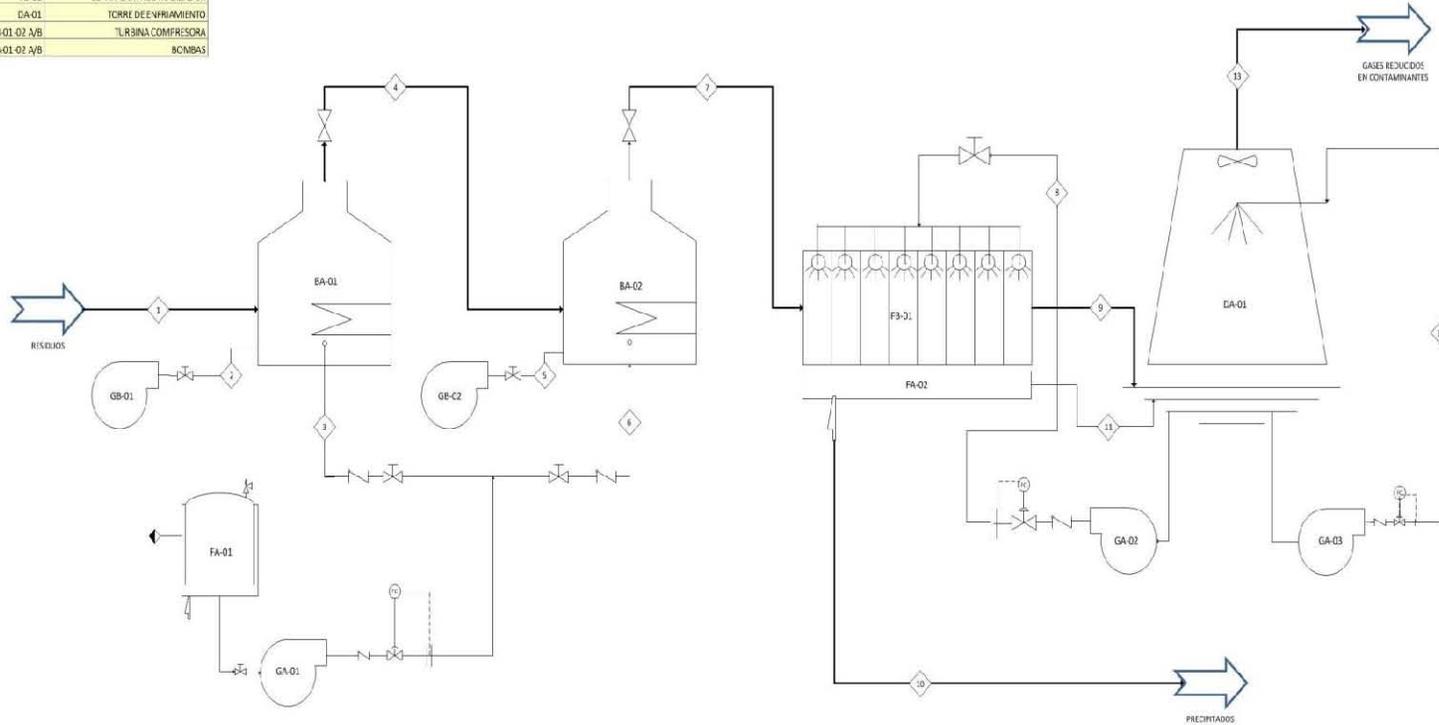


ANEXOS

ve = velocidad calculada con diámetro estandarizado.
 Vsg_{min} = velocidad de salida mínima con diámetro estandarizado.
 Vsg_{max} = velocidad de salida máxima con diámetro estandarizado.
 dsg_{min} = diámetro mínimo de salida del gas.
 dsg_{max} = diámetro máximo de salida del gas.
 Vsg = velocidad de salida del gas.
 Vsl_{min} = velocidad mínima de salida del líquido.
 Vsl_{max} = velocidad máxima de salida del líquido.
 ρ_l = densidad del líquido.
 ρ_g = densidad del gas.
 Ql = flujo volumétrico del líquido.
 Qg = flujo volumétrico del gas.
 F_{20} = 1000 mm/m.
 F_{25} = 1000 mm/m.
 F_{24} es 1 mm/m.
 h_2 = altura de retención del líquido con diámetro estandarizado.
 $leff$ = longitud mínima efectiva.
 kh = velocidad permisible para un tanque horizontal.
 fv = factor de seguridad.
 $F_a = 1.2$ = factor de seguridad.
 Rh = volumen de retención máximo del flujo.
 A_{Total} = área total.
 avg = relación entre el área de salida del gas y la velocidad.
 A_2 = área recalculada.



Equipo	Descripción
FA-01	RECIPIENTE DE GAS
FA-02	RECIPIENTE DE RECLUFERACIÓN
BA-01	INCINERADOR A FLEGO DIRECTO
BA-02	INCINERADOR A FLEGO DIRECTO
FB-01	SEPARADOR NEUTRALIZADOR
DA-01	TORRE DE ENFRÍAMIENTO
GB-01 O2 /Y/B	TURBINA COMPRESORA
GA-01 O2 /Y/B	BOMBAS



ANEXOS

Anexo 8. Diagrama de flujo de procesos.

LABORIO Alvarez Herrera Dulce Ratay Carrillo Cuatrecasas Ovalle Fecha: 27 de Noviembre del 2015 Diagrama de flujo de proceso de incineración de residuos en la FES Zaragoza	Características/corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Flujo Másico (Kg/min)	2.40	0.06	0.723	3.605	0.06	0.723	5.9	4.089	2.089	4.089	4.089	2.089	0.2769
Flujo Vol. Std (m3/min)	2.40	0.05	0.05	3.5	0.05	0.05	5.4	1.92	0.981	1.92	1.92	0.981	0.130	
Temperatura °C	23	23	23	500-700	23	23	1000-1200	23	49	40	40	23	39	
Presión (atm)	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	0.7697	
% de agua (g/kg)	34.643	40	0	70	40	0	60	100	80	70	100	100	0	
Oxígeno (Kmol)	21	140-150	0	140-150	200	0	200	21	140-150	21	21	21	50	

"El diseño de un lavador de gases, neutralizador y adaptación de una torre de enfriamiento para el cumplimiento de la NOM-098-SEMARNAT-2002 en la incineración de cesachos de la FES Zaragoza."



