



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGON

REDISEÑO DE UN INCINERADOR CONVENCIONAL  
PARA LA INCINERACION DE DESECHOS  
RADIATIVOS DE BAJO NIVEL.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICO  
PRESENTA  
LUIS EDUARDO C. LARA ZALDO

ASESOR: ING. JORGE ANTONIO RODRIGUEZ LUNA



1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

58  
2el.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

EL PRESENTE TRABAJO SE REALIZO EN EL DEPARTAMENTO DE DESECHOS RADIATIVOS, DE LA GERENCIA DE SEGURIDAD RADIOLOGICA PERTENECIENTES AL INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES, BAJO LA ASESORIA DEL M.C. JUAN JIMÉNEZ DOMÍNGUEZ Y LA DIRECCIÓN ACADÉMICA DEL ING. JORGE ANTONIO RODRÍGUEZ LUNA, DE LA ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ARAGÓN" DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

## AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Juan Jiménez Domínguez por su apoyo para la realización de este trabajo.

Al M.C. Miguel Hemeterio Hernández por la ayuda, apoyo y amistad incondicional en el desarrollo de el trabajo.

Al Ing. David Lizcano Cabrera por su disponibilidad, apoyo y amistad en la parte radiológica del trabajo.

Al Departamento de Desechos Radiactivos, Ingenieros y Técnicos por el apoyo para la terminación del trabajo.

Al Ing. Mauricio Salinas Nava por su ayuda incondicional y por su amistad en todo momento.

## DEDICATORIA

Gracias a ti Señor por darme la fuerza, apoyo e impulso para seguir adelante con todos mis proyectos a pesar de las adversidades que se han presentado, y sobre todo por darme vida para disfrutar de tu grandeza; Dankel.

### A mis Padres:

Por darme vida, una familia increíble, confiar siempre en mí y apoyarme en todo momento, gracias por todo eso y más; los Amo.

### A mis Hermanos:

Irma, Jordi, Sergio, por soportarme, quererme y estar conmigo en todo momento.

### A mi Sobrina:

Melanie, por hacerme sonreír y feliz en todo momento.

### A Juan Carlos Herrera N.

Por estar siempre a mi lado en todo momento.

### A Guillermo Jacobo H.

Por enseñarme tantas cosas y ser amigo.

### A Eudelia Hernández B.

Por apoyarme en todo momento.

### A Rosy.

Por enseñarme a ser como soy.

### A los compañeros y amigos de Química Nuclear y Departamentos anexos del ININ.

Eudelia, Salvador, David, Vero, Olga, Carlos, Blanca, Pedro, Sonja, Nico, B. Yenny.

### A Tí.

Que siempre has estado en mi corazón.

Gracias!

To encontré con el adagio  
primero triste y después..  
curiosamente fuerte,  
sublime sinfonía  
que me arrastraba  
hasta tus dominios.  
No importaba la muerte,  
si era de ambos;  
pero..., de ser solo tuya  
o solo mía, oh! tortura,  
oh! castigo;  
sufrir de dolor  
sin esperar alivio.....

Sonia A. Saucedo Anaya.

Diré yo á Jehová: Esperanza mía, y castillo mío; mi Dios, en él  
confiaré.

Salmo 91:2

ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN.	1
OBJETIVO.	2
CAPITULO I. DESECHOS.	
1. Tipos de Desechos.	3
1.1 Desechos sin material radiactivo.	3
1.2 Desechos contaminados con material radiactivo.	3
1.3 Gestión de Desechos Radiactivos.	5
1.4 Desechos radiactivos en el Departamento de Desechos Radiactivos (DDR) del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).	8
CAPITULO II. DESARROLLO DEL PROYECTO.	
2. Proyecto.	12
2.1 Tipos de incineradores.	12
2.1.1 Incinerador de desechos sólidos convencionales.	12
2.1.2 Incinerador de desechos radiactivos.	13
2.2 Proyecto de Rediseño del Incinerador existente en el ININ.	17
2.2.1 Cálculos para los cambios en el Incinerador de desechos.	17
a. Temperatura de operación.	20
b. Aislamiento térmico.	23
c. Instalación del material refractario.	28
d. Arcos y parrillas.	30
2.2.2 Balance de masa , energía y material radiactivo.	38
a. Balance de masa.	
b. Balance de energía.	
c. Balance de material radiactivo.	
CAPITULO III. DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS AUXILIARES DEL INCINERADOR.	
3.1 Intercambiador de calor.	42
3.2 Separador ciclónico de partículas.	53
3.3 Lavador de gases.	55
3.4 Filtro.	59
3.5 Extractor.	60
3.6 Monitor de gases con material radiactivo.	67
CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	68
APÉNDICE.	
BIBLIOGRAFÍA.	

## INTRODUCCIÓN.

En los diversos procesos o aplicaciones industriales es común el uso de radionúclidos, los cuales finalmente se verán convertidos en desechos radiactivos.

La manera segura de tratar estos desechos es seguir lo establecido en lo que se ha denominado como "Gestión de Desechos Radiactivos". En esta es importante establecer los procesos de tratamiento para reducir al mínimo posible los volúmenes de almacenamiento y las descargas de materiales radiactivos al ambiente.

En el Departamento de Desechos Radiactivos (DDR) del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), los procesos de tratamiento se han limitado en su gran mayoría al almacenamiento, provocando esto un aumento indiscriminado en los volúmenes de los desechos en los almacenes provistos para este fin; por esta razón el departamento se ha visto en la necesidad de tratar estos desechos, tomando como opción la incineración de los mismos.

El trabajo pretende buscar solución y atacar este problema, siendo la incineración una opción, la cual es un proceso que ha tomado auge en los diversos países miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), como una opción viable para la reducción de volumen y la disposición final de sus desechos generados.

El ININ cuenta con un incinerador para Desechos Convencionales, mismo que se encuentra en desuso.

Este incinerador es el punto de partida para el proceso de tratamiento en el que se pretende desarrollar el trabajo de incineración de Desechos Radiactivos de Bajo Nivel.



## **OBJETIVO.**

**El objetivo del presente trabajo es el Rediseño y Construcción de un Incinerador de Desechos Sólidos de Bajo Nivel, a partir del Incinerador de Desechos Convencionales ya existente en el ININ.**

**Desde hace varios años se han detectado problemas con el almacenamiento de Desechos Radiactivos, el cual es ocasionado por el crecimiento en volumen y peso de estos.**

**Estos desechos son generados por instituciones particulares y gubernamentales como hospitales, laboratorios, centros de investigación y aplicaciones industriales; mismos que son resultado de procesos donde son empleados radioisotopos para su trabajo o formas de instrumentación y control en nuevos procesos.**

## CAPITULO I. DESECHOS.

### 1. Tipos de Desechos.

De los desechos en general para llevar a cabo su gestión se clasifican de acuerdo a su origen como:

#### 1.1 Desechos sin material radiactivo.

(Desechos comunes) {  
Industriales.  
Municipales.

#### 1.2 Desechos contaminados con material radiactivo.

Desechos Radiactivos {  
Desechos de Plantas Nucleares  
Desechos Institucionales

Dado que el objetivo del trabajo es el tratamiento de desechos radiactivos de bajo nivel, se enfocará solo a estos.

#### Desechos radiactivos<sup>(1)</sup>.

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), define a cualquier material que contenga o esté contaminado con radionúclidos en concentraciones o niveles de radiactividad, mayores a las señaladas por esta, en la norma técnica correspondiente y para el cual no se prevé uso alguno.

#### Gestión de desechos<sup>(2)</sup>.

Todas las actividades (incluidas las funciones administrativas) necesarias para la manipulación, tratamiento, acondicionamiento, transporte, almacenamiento y evacuación de desechos radiactivos.

A nivel mundial no existe una clasificación unificada de los desechos radiactivos, sin embargo, los podemos clasificar de acuerdo a su nivel de actividad y origen.

##### 1.2.1 Clasificación de los Desechos Radiactivos en base a la actividad<sup>(3,20)</sup>.

- a) Desechos de Alto Nivel.
- b) Desechos de Medio Nivel.
- c) Desechos de Bajo Nivel.

**a) Desechos de Alto Nivel.**

A esta clasificación corresponde el combustible agotado o irradiado del reactor si se declara como desecho; desechos del reprocesamiento de combustibles gastados, conteniendo elementos transuránicos y productos de fisión altamente radiactivos.

**b) Desechos de Medio Nivel.**

Son los desechos cuya actividad y emisión de calor son inferiores a la de los desechos de alto nivel, pero que requieren blindaje durante su manipulación y transporte. Generados durante la operación de centrales nucleares de potencia.

El término se aplica en general a todos los desechos no definidos como de alto o bajo nivel.

**c) Desechos de Bajo Nivel.**

Son los desechos que, a causa de su bajo contenido en radioisótopos, no requieren blindaje durante su manipulación y transporte normales. Estos son producidos generalmente en la aplicación de radioisótopos en medicina, investigación, industria y además en la generación de energía eléctrica.

**1.2.2 Clasificación de los Desechos Radiactivos en base a su origen<sup>(1, 12)</sup>**

- a) Desechos de Plantas Nucleares de Potencia.
- b) Desechos Institucionales.

**a) Desechos de Plantas Nucleares de Potencia.**

Los desechos del ciclo del combustible nuclear pueden ser considerados e incluidos en la producción de energía por procesos nucleares. En esta definición podemos considerar los desechos de refinación, provenientes de la conversión y enriquecimiento de los materiales combustibles.

En los países en donde existe un programa nuclear, la mayor parte de los desechos provienen de las actividades relacionadas con el ciclo del combustible nuclear.

**b) Desechos Institucionales.**

La industria genera desechos radiactivos directamente del resultado de los procesos donde son empleados radioisótopos para su trabajo, o formas de instrumentación y control en nuevos procesos. Los procesos de producción incluyen diversas operaciones en la manufactura de radiofarmacos, detectores de humo e indicadores de nivel.

Estos desechos son procedentes también de hospitales, laboratorios y centros de investigación. Los volúmenes generados son relativamente bajos, en comparación con los de Plantas Nucleares.

### 1.3 Gestión de Desechos Radiactivos<sup>(5)</sup>.

La gestión adecuada de los desechos radiactivos incluye varias etapas:

#### 1.3.1 Recolección de desechos.

Para la recolección de desechos se debe tomar en cuenta las características físicas, químicas y radiológicas.

#### 1.3.2 Caracterización.

Antes de iniciar cualquier tratamiento de los desechos radiactivos es necesario conocer el tipo de radioisótopo y la concentración de actividad, ya que de esto depende el tipo de tratamiento a que será sometida.

#### 1.3.3 Clasificación y segregación<sup>(17)</sup>.

Desde el punto de vista del tratamiento que se aplica a los desechos radiactivos se les clasifican en sólidos y líquidos. A su vez los sólidos pueden ser clasificados en compresibles, incompresibles y los líquidos en orgánicos e inorgánicos.

##### Desechos Sólidos.

Los desechos sólidos los podemos caracterizar por sus propiedades Químicas, Físicas y Radiológicas.

##### a) Propiedades Químicas.

Estas propiedades las podemos subdividir en dos clases.

- Por la naturaleza de el material (combustible y no combustible).
- Por la naturaleza de su contaminación (contaminación fija y transferible).

Ambas clases de propiedades deben ser consideradas cuando se seleccionen técnicas de manejo de desechos.

##### b) Propiedades Físicas.

La densidad, la forma física y el tamaño pueden afectar la forma de manejo de los desechos sólidos en la planta. La forma física clasifica generalmente a los desechos de nivel bajo como desechos activos secos (resinas de intercambio iónico, filtros, etc.) y componentes metálicos.

##### c) Propiedades Radiológicas.

Los desechos sólidos pueden ser clasificados de acuerdo a su actividad en: desechos de nivel bajo, nivel intermedio y nivel alto<sup>(18)</sup>.

La actividad es importante dada la clasificación de desechos sólidos: concentración de contaminación en superficie, fijación de la contaminación en superficie, la no dispersión de la contaminación en superficie (materiales con neutrones). Para diferentes tipos de contaminación existen diferentes métodos de tratamientos.

#### Desechos Líquidos.

Al igual que para los sólidos, de los desechos líquidos es necesario conocer sus propiedades químicas, físicas y radiológicas.

#### b) Propiedades Químicas.

- a) Composición química del desecho.
- b) Valor de pH.
- c) Demanda de oxígeno.
- e) Toxicidad.

#### Composición química del desecho.

La composición química del desecho es un factor importante en el tratamiento, cuando se tratan los desechos para su descontaminación debemos considerar las constantes variaciones químicas que pueda tener. Las concentraciones de radioisótopos en un líquido y la cantidad de materia suspendida tiene una gran influencia para el tratamiento, provocando que en algunos casos, se tenga que realizar un pretratamiento a este desecho.

En los desechos acuosos se presentan componentes orgánicos, como aceites, grasas y solventes; estas sustancias orgánicas pueden ser volátiles o inflamables, corriendo el riesgo de provocar una explosión. Algunos de estos solventes son el queroseno y tricloroetileno, provocando corrosión y fugas en tubos, bidones, tanques, plásticos, etc.

#### Valor de pH.

La acidez y alcalinidad del desecho son determinantes para su descontaminación. Para evitar corrosión debemos tomar en cuenta el tipo de material donde se va a almacenar o debemos modificar el pH del desecho.

#### Demanda de oxígeno.

Es la cantidad de oxígeno necesaria para una oxidación completa para todos los compuestos orgánicos e inorgánicos en la solución.

#### Toxicidad.

Es la capacidad de sustancias venenosas para causar efectos dañinos a organismos vivientes al ingerirlos, inhalarlos y a contacto físico.

#### a) Propiedades Físicas.

- a) Conductividad.
- b) Capacidad de emulsificación.
- c) Densidad.
- d) Viscosidad.
- e) Tensión superficial.
- f) Turbidez.

#### Conductividad.

La conductividad de líquidos se determina por la medición de electrolitos en solución.

#### Capacidad de emulsificación.

En los líquidos orgánicos, solventes o aceites que se presentan en los desechos líquidos, existe la posibilidad de que se forme una emulsión. La emulsificación puede afectar a los resultados en las técnicas de filtración. La formación de emulsiones estables acuosas es esencial para la inmovilización de la mayoría de los líquidos orgánicos.

#### Densidad, Viscosidad, Tensión superficial y Turbides.

La densidad y la viscosidad pueden afectar la habilidad de ser bombeados o mezclados los líquidos. La tensión superficial puede afectar íntimamente la mezcla y la humedad en el filtro y el intercambio iónico. Generalmente la turbides se indica en la presencia de partículas coloidales en afluentes donde necesitan ser removidas por tratamiento químicos especiales tanto por floculación como precipitación.

#### c) Propiedades Radiológicas.

Las propiedades radiológicas son importantes, hasta el punto donde no solamente afecta el proceso de tratamiento, sino tienen un fuerte impacto en las operaciones de manejo y seguridad radiológica bajo el criterio ALARA<sup>(7)</sup>. Esto incluye:

- a) Composición de los radioisótopos.
- b) Estabilidad de la radiación.
- c) Efectos en la uniformidad del blindaje.

Se debe hacer notar que las propiedades radiológicas dependen del decaimiento radiactivo de cada isótopo.

#### 1.3.4 Tratamiento<sup>(8 u 15)</sup>.

El tratamiento de los desechos radiactivos tiene como finalidad separar el material radiactivo para minimizar la descarga de radioisótopos al ambiente, lográndose además acondicionar el desecho para su transporte y disposición. Los desechos se someten al tratamiento que más convenga según sus propiedades físicas, químicas y radiológicas, por ejemplo: Los desechos que contienen radioisótopos de vida media corta (del orden de días) se les dejan decaer durante 10 vidas medias.

En general los desechos radiactivos líquidos son sometidos a los siguientes procesos de tratamiento:

##### Filtración.

Consiste en la retención de los radioisótopos en fase sólida que se encuentran en suspensión de una corriente líquida al pasar por una membrana o material poroso. Los filtros más usados en instalaciones nucleares son: filtros desechables, filtros metálicos y filtros de precapa.

##### Precipitación química.

El objeto de este proceso es reducir la concentración de los radioisótopos presentes en los desechos radiactivos líquidos empleando reactivos apropiados; como resultado de la reacción química se forma un material sólido insoluble que precipita.

### Evaporación.

Consiste en la separación de los componentes volátiles de los no volátiles de una solución o suspensión mediante la ebullición del componente volátil; la evaporación es ampliamente usada en el tratamiento de desechos con alto contenido de impurezas ya que reduce significativamente el volumen de éstos.

### Incineración.

Consiste en el quemado de los desechos combustibles hasta reducirlos a cenizas, obteniendo una reducción considerable en el volumen de estos.

### 1.3.5 Inmovilización.

Antes de ser enviados a un almacén, los desechos deben ser inmovilizados y envasados en contenedores apropiados para evitar dispersión durante su transporte y almacenamiento. Los métodos de inmovilización más comunes son: la cementación, bituminización, inmovilización en polímeros y vitrificación.

### 1.3.8 Calificación de bultos.

Los bultos que contienen a los radioisótopos inmovilizados deben ser calificados para asegurar su comportamiento a largo plazo en un almacén definitivo. Las pruebas de calificación incluyen entre otras: resistencia a la compresión axial, corrosión, radiación, ciclos térmicos y lixiviación por inmersión al agua.

### 1.3.7 Disposición final.

La evacuación o disposición de los desechos acondicionados en su última fase de la gestión tiene como propósito principal aislarlos del ambiente humano, para evitar cualquier tipo de contaminación o radiación.

En la práctica es limitado el número de opciones para la disposición de los desechos, se combinan varios factores a causa de las tecnologías para sus disposición, actitudes del gobierno y el público en general, la falta de lugares geográficamente bien localizados, y la necesidad de regulaciones estándares para su confinamiento. A pesar de estos problemas existen varias alternativas que representan las opciones viables para la disposición de desechos radiológicamente contaminados; las mas comunes son:

Disposición superficial (la que se practica en México)

Disposición profunda.

## 1.4 Desechos radiactivos en el Departamento de Desechos Radiactivos (DDR) del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)<sup>22, 23</sup>.

La Planta de Tratamiento de Desechos Radiactivos (PATRADER) tiene la capacidad para tratar y acondicionar diariamente  $1\text{ m}^3$  de desechos sólidos. Asimismo, mediante evaporación o precipitación puede tratar  $1\text{ m}^3$  de desechos líquidos. Además, por decaimiento (almacenamiento en bidones) y por dilución, la planta puede tratar al rededor de  $1\text{ m}^3$  mensual. Considerando 200 días de operación durante el año, la planta además podría procesar anualmente hasta  $200\text{ m}^3$  de desechos sólidos,  $200\text{ m}^3$  de desechos líquidos por evaporación y precipitación y  $550\text{ m}^3$  tratados mediante dilución o decaimiento.

Se reciben y tratan un promedio anual de 25.2 m<sup>3</sup> de desechos sólidos se evaporan y precipitan 42.5 m<sup>3</sup> de desechos líquidos (15.24 m<sup>3</sup> de ellos procedentes de usuarios externos). Se reciben también, a través del drenaje caliente 278.05 m<sup>3</sup> de desechos líquidos con una actividad de 39.16 MBq (ver su composición isotópica en la tabla I); de este volumen, al rededor del 90 % se desecha por el drenaje común después de haber sufrido decaimiento y dilución, el volumen restante (considerado dentro de los 42.5 m<sup>3</sup> de desechos líquidos mencionados anteriormente) se trata primero por evaporación y después por precipitación, obteniéndose un volumen final de 0.05 m<sup>3</sup> el cual se incorpora en concreto y envasa en un bidón. Asimismo se reciben aproximadamente 219 fuentes selladas.

TABLA I  
Composición Isotópica de los Desechos Líquidos evacuados en 1994.

ISOTOPO	ACTIVIDAD (Bq)
<sup>60</sup> Co	1.14x10 <sup>5</sup>
<sup>57</sup> Co	1.26x10 <sup>5</sup>
<sup>137</sup> Cs	7.00x10 <sup>3</sup>
<sup>3</sup> H	3.63x10 <sup>7</sup>
<sup>131</sup> I	3.50x10 <sup>5</sup>
<sup>14</sup> Mn	4.14x10 <sup>5</sup>
<sup>22</sup> Na	2.11x10 <sup>3</sup>
<sup>32</sup> P	5.00x10 <sup>3</sup>
<sup>75</sup> Se	9.92x10 <sup>5</sup>

La PATRADER recibe anualmente alrededor de 30 m<sup>3</sup> de desechos sólidos (de origen externo e interno) unos 250 m<sup>3</sup> de desechos líquidos mediante el drenaje caliente y alrededor de 20 m<sup>3</sup> de procedencia externa; con base en los volúmenes manejados en promedios anuales, se espera que, para los años consecutivos reciba anualmente 300 fuentes radiactivas selladas (principalmente de Am-241, Am-Be, Cs-137, Ra-226, Ir-192 y Co-60) envasadas por usuarios del área médica e industrial. Los desechos radiactivos que se tratan y acondicionan son desechos de Nivel Bajo y de Nivel Medio<sup>(20)</sup>.

La PATRADER puede almacenar durante 6 meses, en espera de ser tratados, hasta 51.4 m<sup>3</sup> de desechos líquidos captados mediante el drenaje caliente. Estos líquidos se almacenan en tanques. Cuando cualquiera de estos tanques se llena al 80 % de su capacidad, se toma una muestra del líquido y se envía al Laboratorio de Vigilancia Radiológica Ambiental (LVRA) para su análisis. Si la concentración de los materiales radiactivos en el líquido de ese tanque no rebasa los límites especificados en el 10 Code of Federal Regulation Parte 20 Apéndice B (Anexo IV), entonces son desalojados por el drenaje común de acuerdo al procedimiento P.DR-20 (Anexo V inciso m), de lo contrario, se dejan decaer hasta que cumplan con los límites mencionados o son tratados por evaporación y precipitación. En el Área de Maniobras pueden almacenarse en bidones durante un año alrededor de 16 m<sup>3</sup> de desechos líquidos orgánicos provenientes de usuarios externos. En cuanto a los desechos sólidos, estos son clasificados y compactados en bidones metálicos de 200 litros casi al mismo tiempo en que son recibidos y no pasan más de 3 meses en el almacén del DDR. Aunque la PATRADER tiene la capacidad de almacenar alrededor de 400 bidones durante 6 meses, debido a los bajos volúmenes que actualmente maneja, sólo almacena al rededor de 20 bidones (4 m<sup>3</sup>) estibados bajo techo y sobre polines de madera para evitar la corrosión por humedad.

Los desechos radiactivos sólidos y líquidos recolectados por el DDR provienen de permisionarios externos y del propio Centro Nuclear. Para propósito de tratamiento se clasifican en:



- Sólidos: Compresibles (generalmente plásticos, hules, vidrios, metales, papel, tela y cartón).
- Biológicos (despojos de ratones, perros, conejos e iguanas).
- Líquidos: Soluciones acuosas, que constituyen aproximadamente el 80 % de los desechos líquidos que se reciben y soluciones orgánicas, que constituyen el 20 % del volumen total recibido.

Los radioisótopos que usualmente contienen los desechos son:

Sólidos contaminados con: C-14, H-3, I-125, Mo-99, Na-22, P-32, S-35 y Tc-99<sup>m</sup>.

Líquidos contaminados con: Co-57, Co-60, Cs-137, H-3, I-131, Mn-54, Na-22, P-32, S-35, Se-75, U-235 y U-238.

Fuentes selladas: Am-Bc, Co-60, Cs-137, Ir-192, Kr 85, Ra-226 y Sr-90.

En la tabla II podemos observar las propiedades de algunos radioisótopos, comúnmente gestionados en el DDR.

Principales generadores de desechos: Cardiología Dr. Luis Méndez, Ciclos de combustibles, CINVESTAV-IPN, Fac. de Medicina (UNAM), Fac. de Química (UNAM), Fac. de Veterinaria y Zootecnia, Fisiología Celular (UNAM), Hospital Gral. de Zona 2 A, Hospital Juárez de México, I. de Inv. Biomédicas (UNAM), Industria, Inst. Diag. y Ref. Epidemiología, Inst. M. de Psiquiatría, Inst. Nal. de Enfermedades Respiratorias, Inst. Nal. de la Nutrición, Inst. Nal. Neurología y Neurocirugía, Plantas de poder, etc.

La incineración es un proceso significativo en la reducción del volumen y peso de los desechos radiactivos de bajo nivel.

Puesto que el problema de la eliminación de los desechos radiactivos se ve complicado por la incapacidad de destruir la radiactividad, excepto mediante procesos naturales de "decaimiento radiactivo", el hecho es que alguno de los isótopos activos utilizados tengan una vida media radiológica de cientos de años o más, descarta el proceso de incineración como procedimiento para su eliminación. Por esta razón no todos los Desechos de Nivel Bajo son incinerables. Ellos son clasificados por el departamento en compresibles y biológicos.

TABLA II  
Propiedades de los radioisótopos

	Vida media (t 1/2)	Actividad específica (Bq/g)	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Punto de fusión (°Kmol)
C-14.	5.73 E+3 a	2.38 E+10	3826.85	4196.85	2.62	—
H-3.	12.3 a	1.1 E+12	259.125	252.886	0.0099 (g/l)	0.05668
I-125.	60.2 d	6.43 E+14	113.55	185.25	4.92 (g/cm)	7.824
I-131.	8.07 d	4.60 E+15	113.55	185.25	4.92 (g/cm)	7.824
Mo-99.	66.7 h	1.78 E+16	2616.85	4638.85	10.2 (g/cm)	32.000
P-32.	14.3 d	1.06 E+16	44.15	276.85	1.82 (g/cm)	0.857
S-35.	86.7 d	1.58 E+15	115.21	444.6	2.07	1.7175
Tc-99.	6 h	1.05 E+17	2199.85	4294.85	11.5	24

TI-201 73 h \_\_\_\_\_ 303.85 1472.85 11.35 4.142

☐ No existen datos de estos valores

Estos desechos después de ser almacenados temporalmente en el patio caliente del DDR, son trasladados al Centro de Almacenamiento de Desechos Radiactivos (CADER), ubicado en Santa María Maquixco, Municipio de Temascalapa, Estado de México. Esta instalación está dividida en 3 almacenes temporales (bodegas) y 5 trincheras.<sup>12)</sup>

La instalación tiene una capacidad de almacenamiento para desechos radiactivos de 970.0 m<sup>3</sup> de almacenes y 2100.0 m<sup>3</sup> de trincheras, con un total de 3070.0 m<sup>3</sup>.

Hasta Octubre de 1995 se tienen ocupados 671.95 m<sup>3</sup> del volumen, dándonos como resultado una capacidad disponible de 299.05 m<sup>3</sup> en los almacenes; en las trincheras el volumen no ha llegado a su capacidad total, puesto que tenemos un volumen ocupado de 1481.52 m<sup>3</sup>, el volumen ocupado de 2089.47 m<sup>3</sup> y una capacidad disponible de 980.53 m<sup>3</sup>.

Actualmente se reciben aproximadamente un promedio de 20 m<sup>3</sup> (100 bidones) anuales de desechos. Suponiendo un incremento a 30 m<sup>3</sup> anuales y teniendo en cuenta la capacidad total disponible de 299.05 m<sup>3</sup> en almacenes, la instalación podría operar 10 años a partir de esta fecha.

Debido a la cantidad de desechos que llegan constantemente al DDR y al CADER, el DDR está constantemente en la búsqueda de nuevos tratamientos y formas para reducir el volumen de los desechos, con los desechos líquidos se está obteniendo una respuesta satisfactoria, pero con los desechos sólidos el compactamiento solo reduce en parte el problema.

Hasta la fecha la técnica más efectiva para la reducción de volumen es la de incineración, ya que al incinerar desechos se obtiene en proporción una reducción aproximada del 5 al 20% del volumen total.<sup>12, 13, 14)</sup>

Es por esta razón que el DDR se vio en la necesidad de crear un proyecto en el cual es importante implementar el proceso de incineración que cumpla con las características específicas de reducir el volumen de los desechos radiactivos gestionados por el ININ.

## CAPITULO II. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 2. Proyecto.

#### 2.1 Tipos de Incineradores

##### 2.1.1 Incinerador de desechos sólidos convencionales<sup>(2)</sup>.

Los incineradores tienen generalmente en su diseño dos cámaras de combustión; una primera cámara para quemar los desechos y una segunda cámara para los gases que no se quemaron en la primera, ayudando a que el proceso de combustión sea más eficiente.

Estos cuentan con varias capas de aislantes (tabique refractario, aislante, etc.), las cuales no permiten que el calor sea conducido al exterior.

Las condiciones de temperatura a que trabajan (500 a 1800 °C), cenizas, residuos orgánicos, etc., y además el trabajo intermitente, dañan considerablemente al material refractario, ocasionando el alabeo en el interior de estos, estos refractarios no han sido posible sustituirlos por otros materiales; el combustible comúnmente utilizado es diesel y el gas; las partes más dañadas son las paredes, parrillas, la puerta de alimentación o carga, el marco de la puerta de carga y las boquillas de los quemadores.

Los incineradores de desechos se clasifican de acuerdo a la naturaleza del material que se incinera:

- a) Desechos Municipales.
- b) Desechos Industriales.

Los desechos sólidos varían en su composición y características físicas, puesto que al incinerarse los parámetros de combustión son difíciles de predecir.

Los incineradores comúnmente utilizados a nivel mundial y en nuestro país, son los que trabajan con cámaras dobles, por su forma de operación realizan una incineración eficiente.

En este caso el incinerador que se va a rediseñar se puede incluir en la clasificación de:

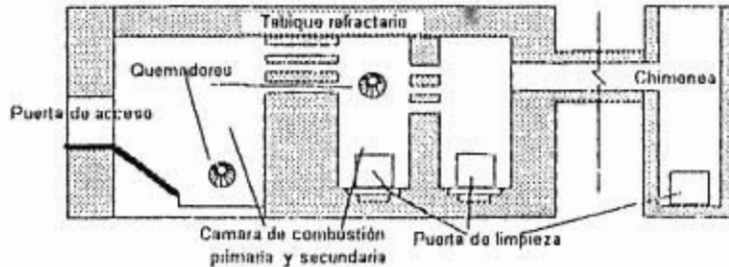
- Incineradores de Cámara Múltiple.

##### Incinerador de Cámara Múltiple.

En este tipo de incineradores se ha buscado la forma de reducir al mínimo las partículas (cenizas) presentes en los gases de combustión, colocando en primer lugar una cámara usada para la combustión de desechos, y una segunda provista de un segundo quemador para la combustión de gases sin quemar y combustibles sólidos en el aire (cenizas), descargados de la primer cámara.

En la figura 1 se muestran las etapas que constituyen un incinerador de cámara múltiple.

FIGURA I  
Incinerador de Cámara Múltiple



Estos incineradores han sido diseñados para desechos especiales, como los desechos patológicos, y para todo tipo de desechos que se requiera que su incineración sea cercana al 100%.

#### 2.1.2 Incinerador de desechos radiactivos<sup>(1,2)</sup>.

El diseño de este tipo de incineradores es semejante a los incineradores de desechos sólidos convencionales, como puede esperarse, la incineración de desechos radiactivos requiere consideraciones únicas no aplicables a otros desechos comunes.

La seguridad es de primera importancia. El manejo, almacenaje y la alimentación del material, debe ser controlada con cuidado. Los centros donde se almacena el material contaminado deben de contar con exhaustivos sistemas de ventilación los cuales cuentan con filtros de aire de alta eficiencia (HEPA, alta eficiencia en partículas de aire).

Los sistemas de carga deben ser diseñados específicamente, para evitar la posibilidad de escapes de gases calientes del incinerador cuando la puerta de carga del incinerador esta abierta. Estos deben estar provistos con una serie de compuertas de aire para aislar el gas del incinerador bajo todas las condiciones de operación.

Se debe tener cuidado con la puerta de alimentación, puesto que llega a existir la posibilidad de acumulación de gases de combustión, causados por la incineración incompleta de desechos que contengan solventes o otro material que puedan causar explosión.

Las cenizas y residuos de material radiactivo de bajo nivel contenido en el gas de combustión deben ser manejado con sumo cuidado, este no puede ser desalojado de manera común al ambiente.

Estos incineradores cuentan con una cámara de combustión en la cual es incinerado el material contaminado; un sistema de lavado de gases, en el cual los gases son lavados quitándole la acidez que hayan adquirido en el proceso de incineración, este lavado se hace mediante aspersores con una solución cáustica, esta solución es enfriada, filtrada y posteriormente reincorporada al sistema; filtros de aire HEPA, en donde se retienen residuos sólidos y se limpian los gases de combustión; estos dos últimos equipos son utilizados para la disminución de contaminantes, posteriormente estos gases son liberados al ambiente con un nivel de contaminación mínima<sup>(3)</sup>.

Los Incineradores para desechos radiactivos, se clasifican de acuerdo a su aplicación<sup>(1)</sup> en:

- a) Incineradores de desechos institucionales.
- b) Incineradores de desechos de Plantas Nucleares.

Existe una variedad de diseños de incineradores para desechos radiactivos, desarrollados bajo el patrocinio de la República Federal Alemana (Planta de Investigación Nuclear de Karlsruhe), Francia (Centro de Estudios Nucleares de Saclay), el Reino Unido (Autoridad en Energía Atómica del Reino Unido, Harwell), Canadá (Sociedad nuclear Canadiense, Toronto, Ontario) y los Estados Unidos de América (Laboratorio Nacional Los Álamos), éstos países a través de sus departamentos han desarrollado diferentes clases de incineradores de tipo comercial<sup>(4)</sup>.

- A. Incinerador de Hogar Agitado.
- B. Incinerador de Aire Controlado.
- C. Incinerador con Exceso de Aire. (Incinerador de tambor)
- D. Incinerador con Cama Fluidizada.
- E. Incinerador de Homo Rotatorio.

#### A. Incinerador de Hogar Agitado.

Este incinerador cuenta con un hogar en forma de vasija circular de 2.6 m de diámetro por 4.6 m de altura, con agitadores rotatorios. Estos agitadores mueven los desechos hasta que se incineran en su totalidad, los gases de combustión que contienen cenizas y residuos pasan a un segundo quemador donde se terminan de incinerar estos residuos sólidos, los gases de combustión producidos son tratados por una serie de lavadores de gases donde separara el residuo sólido de los gases y finalmente estos pasan a unos filtros de alta eficiencia (HEPA). Este incinerador tiene una capacidad de 70 kg/h, teniendo una reducción a 5 kg/h de desechos.

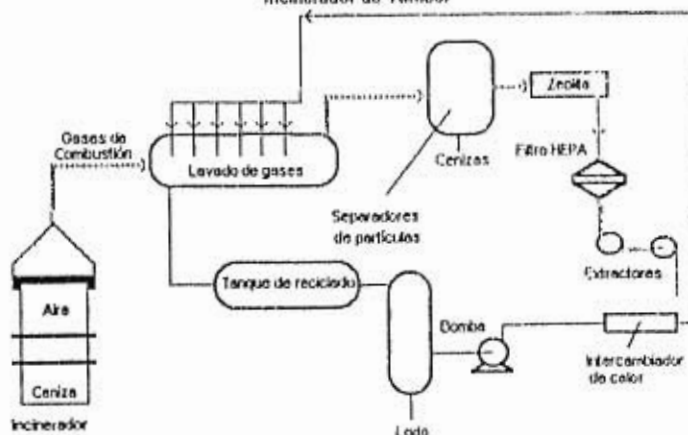
#### B. Incinerador de Aire Controlado.

También se le conoce con el nombre de unidad de cámara múltiple, donde la incineración se realiza en una primera cámara y después por una segunda. En la primer cámara se generan gases de combustión con productos sólidos (cenizas y residuos), que pasan a la segunda cámara donde se oxidan, incinerándose; este incinerador cuenta con un sistema de lavado de gases para remover las partículas sólidas en el gas, a la salida este gas pasa por un sistema de filtrado conformado por filtros HEPA. Este incinerador tiene una capacidad de 45 kg/h, teniendo una reducción a 2.5 kg/h de desechos.

#### C. Incinerador con Exceso de Aire<sup>(1,2)</sup>.

También conocido con el nombre de incinerador de tambor. Estos incineradores están diseñados para quemar desechos sólidos radiactivos con una expulsión de gases al ambiente sin contaminación. Las temperaturas alcanzadas por el incinerador son de 1093-1204 °C, el cual es mostrado en a figura II.

FIGURA II  
Incinerador de Tambor



El Incinerador está constituido por una cámara de combustión o tambor donde se le suministra aire tangencialmente provocando una turbulencia y dando un efecto de ciclón en el proceso de combustión, este aire tiene suficiente presión para transportar todo el gas de combustión hacia los procesos de purificación.

Los gases de combustión pasan por un lavado de gases de solución cáustica, donde los gases son enfriados y neutralizados, y la mayoría de las partículas sólidas en los gases (cenizas) son removidas. El separador de partículas remueve las partículas sólidas suspendidas en el gas.

El filtro HEPA es necesario para completar esencialmente la remoción de partículas sólidas suspendidas en los gases, sin embargo, este pierde eficiencia rápidamente con la humedad de los gases circulantes adquiridas en el proceso, en este caso el filtro de Zeolita se ocupa para remover humedad particularmente los residuos cáusticos en el gas.

La solución líquida cáustica proveniente del tanque de aspersión donde se colecta en un tanque para su posterior recirculación. El líquido pasa por un filtro vertical con mayor efectividad de remoción de partículas sólidas en forma de tango. El intercambiador de calor es proveído por la solución cáustica limpia, alimentando así los aspersores del lavado de gases en el sistema.

El desecho sólido generado de los gases en forma de lodo y como cenizas en el filtro HEPA son un décimo del volumen del desecho original, y en el cenicero una producción de ceniza del 5% del volumen original<sup>(1,2,3)</sup>.

Este tipo de Incinerador se asemeja a las características de tratamiento de gases que deseamos implementar para el Incinerador a rediseñar.

#### D. Incinerador con Cama Fluidizada.

Este Incinerador está diseñado para desechos radiactivos de nivel bajo y transuránicos. Tiene una capacidad de incinerar 80 kg/h, teniendo una reducción a 9 kg/h de desechos. El Incinerador cuenta una cámara primaria, de granulos del carbonato sódico que son fluidizados por aire y nitrógeno. La generación de desechos sólidos por combustión parcial llega a ser mínima

puesto que cuenta con separador de partículas para quitar productos sólidos en los gases de combustión, además cuenta con una cámara secundaria donde se realiza la combustión completa. Los gases de combustión provenientes de la cámara secundaria que llegan a contener ceniza y productos sólidos se hacen pasar por un segundo separador de partículas y una serie de filtros HEPA para quitar estos residuos sólidos.

#### E. Incinerador de Homo Rotatorio.

Este Incinerador se ha probado a nivel laboratorio, con una capacidad de 40 kg/h con desechos municipales, teniendo una reducción a 2 kg/h de desechos. Cuenta con una cámara principal rotatoria en forma de tambor. Este tambor es alimentado por uno de sus costados, trabajando a temperaturas de 600 a 800 °C, los gases de combustión son expulsados por la parte superior y las cenizas por la parte inferior de esto, los gases pasan a una segunda cámara que se encuentra fija, a una temperatura 1000 °C, después estos gases se tratan en lavadores de gases, separadores de partículas y por filtros HEPA.

## 2.2 Proyecto de Rediseño del Incinerador existente en el ININ.

Antes de realizar el diseño del incinerador, se requiere conocer que desechos se va a incinerar.

Sabemos que los desechos radiactivos recolectados por el Departamento de Desechos Radiactivos del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares son clasificados en compresible y biológicos.

Para fines del trabajo estos desechos se reclasifican en: compresibles los cuales comprende a los incinerables y no incinerables a demás de los biológicos.

Los desechos incinerables incluyen desde artículos de papel, madera, plástico, metal, vidrio, tela y caucho.

Se seleccionó y se separó también de acuerdo a su radioisótopo contaminante, por su tiempo de vida media, anteriormente se mencionó que existen algunos isótopos los cuales su tiempo de vida media es de cientos de años, los cuales por el momento no se consideraran para los procesos de incineración.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) propone a la incineración como un proceso de tratamiento y el cual sugiere los requerimientos que debe cumplir un incinerador para desechos radiactivos.

### Requerimientos Básicos de Diseño.

1. Maximizar la eficiencia en la combustión para que la incineración se aproxime al 100%.
2. Expulsión de gases con el mínimo contenido de contaminantes.
3. Facilidad de mantenimiento al incinerador y a los equipos auxiliares.
4. Operación con presiones menores a la atmosférica del sitio para minimizar los riesgos de fuga o dispersión de material radiactivo al medio ambiente.
5. Facilidad para la recolección de cenizas.

### Condiciones Radiológicas

1. Cumplir con el principio ALARA<sup>(21)</sup>.
2. Los desechos deben ser solamente desechos con material radiactivo.
3. Protección radiológica al POE<sup>(21)</sup> y al medio ambiente.

Puesto que el problema de la eliminación de los desechos radiactivos se ve complicado por la incapacidad de destruir la radiactividad, excepto mediante procesos naturales de decaimiento radiactivo como se vio anteriormente.

El hecho es, que alguno de los radionúclidos utilizados tenga una vida media radiológica de cientos de años o mas, descarta la posibilidad de introducirlos en el proceso de tratamiento de incineración. Por esta razón no todos los desechos radiactivos de bajo nivel son incinerables.

### 2.2.1 Cálculos para los cambios en el incinerador de desechos<sup>(2,4,5)</sup>.

Previo al diseño del incinerador de desechos radiactivos se consideró el estado actual del incinerador de desechos convencionales, mismo que no repetaba condiciones adecuadas para su operación. Gran parte de la estructura interna de este se debía substituir, ya que los factores climatológicos, el tiempo y el uso intermitente al que este fue sometido lo dañaron considerablemente.



Para rediseñar este Incinerador se requiere conocer que condiciones de diseño tiene, las cuales se pueden observar en la figura III.

Después de un inspección visual se encontró que:

1. Se cuenta con un hogar parcialmente destruido.
2. El material refractario en la chimenea no se encuentra instalado en su totalidad.
3. No cuenta con anclas en las paredes.
4. Tabique tipo Bloc que protege al material refractario se encuentra en buenas condiciones.
5. Las protecciones de asbesto para las puntas de alimentación y del primer quemador se encuentran bastante deterioradas.
6. No cuenta con tanque de gas para la alimentación de los quemadores.
7. Los quemadores y la línea de gas existente requieren mantenimiento.

En el diseño del Incinerador se debe tomar en cuenta que la duración de este depende no solamente de los refractarios utilizados sino también del modo que se instalan.

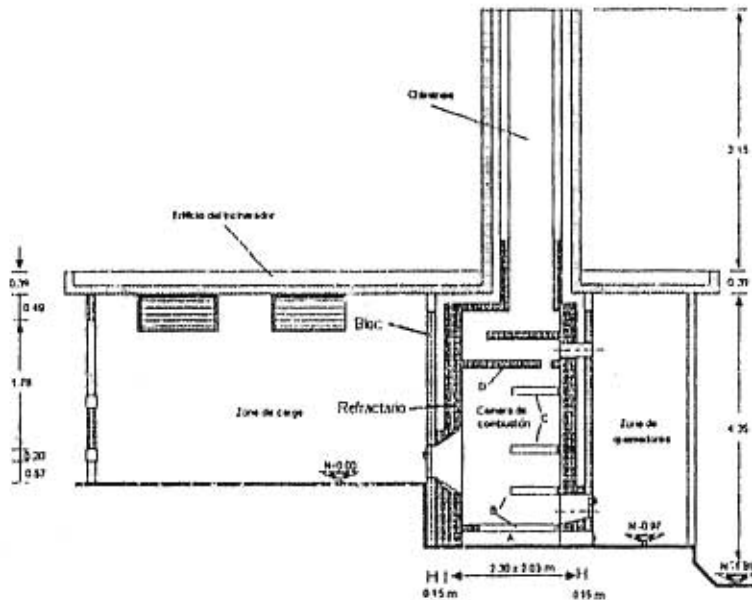
El aislamiento del hogar del Incinerador debe estar considerado en el diseño para evitar un sobrecalentamiento en su parte externa, es necesario calcular el tipo de material refractario conveniente para este propósito; es importante tener juntas de dilatación en el hogar y en las paredes, pues si se olvida tener en cuenta esta expansión se forzará la base del Incinerador, se abombarán las paredes y causará un alabeo en él; en este capítulo se calculará este material refractario, juntas de dilatación, la cantidad necesaria para la construcción y se menciona la forma de instalarlo.

Paredes de material refractario<sup>(5)</sup>.

La pared tiene la función primaria de retener el calor en la cámara de trabajo (ó cámara de combustión). Sin embargo, para que su función sea satisfactoria, debe ser estable bajo las severas condiciones de trabajo.

Para determinar su espesor debe tomarse en cuenta las condiciones de temperatura a las que va a trabajar. <sup>(6)</sup>Desde el punto de vista de estabilidad, cuanto más altas sean las paredes, mayor deberá ser su grosor; en éste caso debemos adaptarnos a los espacios que actualmente se tiene; como se muestra en la figura III.

FIGURA III  
Condiciones actuales del Incinerador del ININ



Nota: Todas las medidas están dadas en metros.

#### Aislamiento del material refractario<sup>(2)</sup>

El aislamiento del material refractario debe ser una construcción estable que se instala con la finalidad de protegerlo, pero existe un inconveniente, al tener un revestimiento implica un almacenamiento de calor en la pared, lo que es una desventaja en su funcionamiento intermitente.

Esta pared a pesar de sus inconvenientes es necesaria, esta fue construida con tabiques (Bloc) de hormigón comprimido.<sup>(3)</sup> Este tabique tiene la peculiaridad de disipar rápidamente el calor por la forma física en la que está diseñado, como se muestra en la figura IV.

FIGURA IV  
Tabique tipo Bloc



#### a. Temperatura de operación.

<sup>(2)</sup>La incineración de desechos radiactivos involucra la aplicación de procesos de combustión bajo condiciones controladas, para reducir el volumen.

Estas condiciones son:

- A.1 Constancia de las temperaturas en la zona de combustión.
- B.1 Cantidad requerida de combustible y aire en la zona de combustión.
- C.1 Turbulencia dentro del Incinerador.

Estos parámetros son los principales mecanismos de la incineración: el oxígeno, la temperatura, la turbulencia.

#### A.1 Constancia de las temperaturas en la zona de combustión.

Rango de operación del Incinerador.

Para iniciar los cálculos de rediseño, se debe conocer a que temperatura va a operar el Incinerador. En base a la literatura que establece los rangos de operación de los Incineradores para desechos radiactivos<sup>(1,2,4)</sup>, se seleccionó el rango de operación fijándose de 1200 a 1500°C.

Para poder mantener este rango de temperatura debemos conocer la temperatura máxima que llevan a cabo los productos de combustión (temperatura de flama adiabática), esta temperatura se obtiene en un proceso adiabático y con un exceso de aire teórico adecuado, para el proceso.

#### B.1 Cantidad requerida de combustible y aire en la zona de combustión.

En el proceso de incineración es importante conocer las características del combustible a utilizar.

A causa de que ya existían los quemadores para este Incinerador y estos son específicos para el consumo de gas butano en la combustión, por ello se limitan los cálculos a las condiciones de éste combustible.

#### Características del Gas Butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>).

Gas incoloro, aroma ligero desagradable, medianamente tóxico, provoca sueño, muy peligroso cuando es expuesto al calor o fuego, altamente explosivo. Su punto de ebullición a - 0.5 °K, punto de fusión a -138 °K.<sup>(5)</sup>

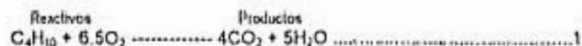
#### Cálculo de la temperatura de adiabática teórica.

Para poder calcular la temperatura adiabática se necesitan conocer los siguientes parámetros:

1. La reacción estequiométrica de la combustión sin aire.
2. El calor de combustión del combustible.
3. La reacción estequiométrica de la combustión con aire.

Estos parámetros se calculan suponiendo que la temperatura en el interior del Incinerador es homogénea y la pérdida de calor por parte del aislamiento no existe (condiciones adiabáticas).

#### 1. La reacción estequiométrica de la combustión sin aire, es la siguiente:



2. El calor de combustión del combustible.

Para calcular el calor de combustión de la reacción ( $\Delta H_c$ ), es necesario conocer los calores de formación de los reactivos y productos (de tabla 5.4.1)<sup>(1)</sup>, el cual se determina por la ecuación siguiente:



la cual se define como: a igual a mol del reactivo A con b moles de B forman c moles de C y d moles de D, donde:

$$\Delta H_c = c\Delta H_c + d\Delta H_d - a\Delta H_a - b\Delta H_b \quad 2$$

donde:

$\Delta H_c$  = Entalpia.

a, b, c, d = Coeficientes estequiométricos.

A, B, C, D = Especies químicas A, B, C y D.

sustituyendo los valores de esta tabla y de la ecuación 1, tenemos:

$$\Delta H_c + \Delta H_p = \Delta H = 0 \quad 3$$

$$\Delta H_a = 29,719.811 \text{ C}_4\text{H}_{10}$$

$$\Delta H_b = 0.0 \text{ O}_2$$

$$\Delta H_c = -94,052 \text{ CO}_2$$

$$\Delta H_d = -57,789 \text{ H}_2\text{O}$$

$$\Delta H_c = 4 \begin{array}{c} \text{CO}_2 \\ (-94,052) \end{array} + 5 \begin{array}{c} \text{H}_2\text{O} \\ (-57,789) \end{array} - 29,719.811 + 0.0$$

$$\Delta H_c = -635,433.189 \text{ cal/gmol.}$$

de acuerdo al peso molecular del Butano, se determina el peso en gramos, teniendo:

$$\text{C}_4\text{H}_{10} = 4 \begin{array}{c} \text{C} \\ (12.01) \end{array} + 10 \begin{array}{c} \text{H} \\ (1.00797) \end{array} = 58.12 \text{ g/gmol.}$$

El calor de combustión expresado en caloría gramo:

$$\text{Calor de combustión} = -10,933.12 \text{ kcal/kg}$$

3. La reacción estequiométrica de la combustión con aire, es la siguiente:



La capacidad calorífica de los gases la determinamos mediante la ecuación siguiente:

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad 5$$

de la tabla 5.2.4<sup>(2)</sup>:

$$C_p, \text{CO}_2 = 10.57 + 2.10 \times 10^{-3}T - 2.06 \times 10^{-5}T^2$$

$$C_p, \text{H}_2\text{O} = 7.30 + 2.46 \times 10^{-3}T + 0.00 \times 10^{-5}T^2$$

$$C_p, \text{N}_2 = 6.83 + 0.90 \times 10^{-3}T - 0.12 \times 10^{-5}T^2$$

$$\Delta C_p = 4 C_p, \text{CO}_2 + 5 C_p, \text{H}_2\text{O} + 24.47 C_p, \text{N}_2 \quad 6$$

para determinar la temperatura adiabática de la flama se requiere resolver la siguiente ecuación, dado que la incógnita es la temperatura asumimos a la capacidad calorífica (Cp) en función de ella.

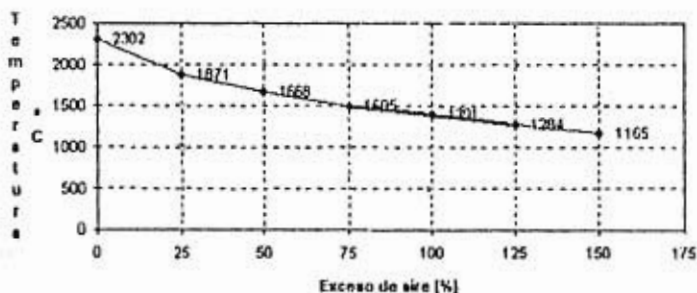
$$\Delta H_c = \int_{298}^{T_2} \Delta C_p dT$$

Integrando la ecuación e igualando a cero tenemos:

$$21.4 \times 10^{-3} T_2^2 + 245.91 T_2 - 774,232.85 = 0$$

donde  $T_2$  es la temperatura de flama adiabática; resolviendo esta ecuación (7) para diferentes excesos de aire, los resultados se muestran en la gráfica 1.

GRÁFICA 1  
TEMPERATURA DE FLAMA

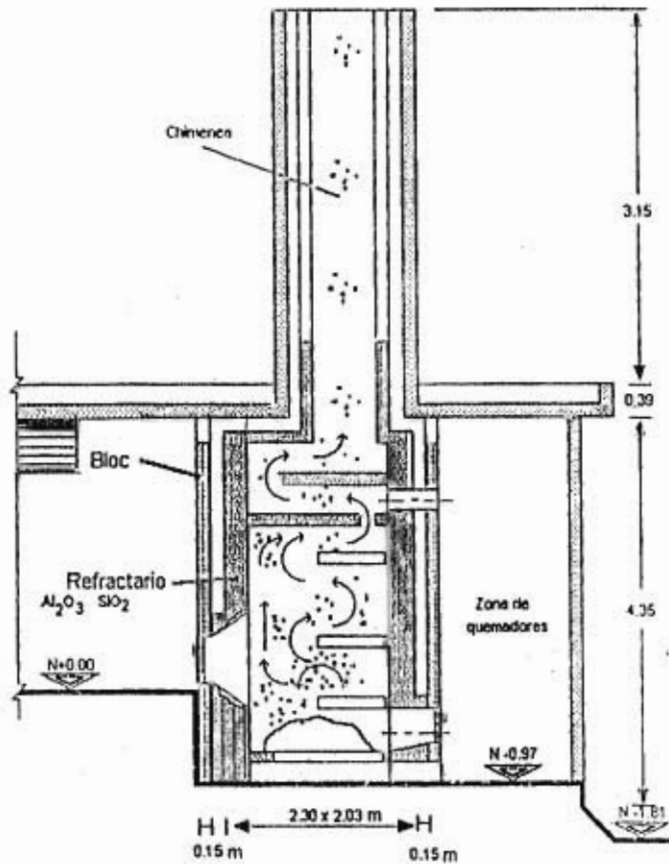


En la gráfica 1 se observa que en el rango de temperatura en que debe operar el incinerador, la combustión debe tener un exceso de aire del 75 al 125 %, de acuerdo a el rango de operación del incinerador.

#### C.1 Turbulencia dentro del incinerador.

La turbulencia dentro del incinerador es provocada por la forma física en que esta construido, de acuerdo a la literatura<sup>(7)</sup> la forma que se propone es semejante a la original, como se puede observar en la figura IV.A la turbulencia provocada por las parrillas y los arcos provoca que el material sólido suspendido el aire descienda hacia la zona de combustión, los gases y el material restante pase a la segunda cámara de combustión y con esto provocar que la incineración se acerque al 100 % de las cenizas y los gases de combustión

FIGURA IV.A  
Turbulencia en el Incinerador.



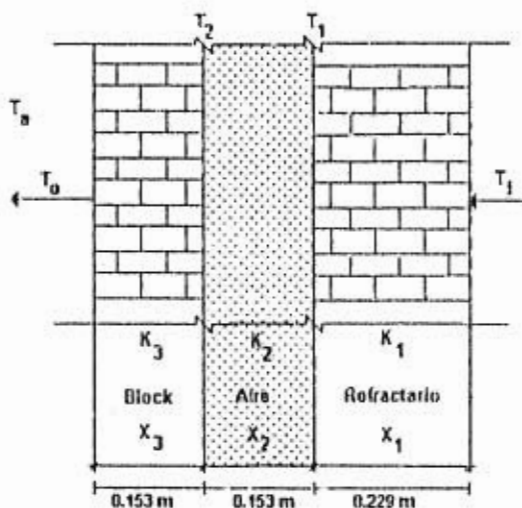
**b. Aislamiento térmico<sup>(2)</sup>.**

Se buscó un material en el mercado que sus características técnicas soportaran una temperatura de 1500 °C, se llegó a la conclusión de que el material que se acerca más a los requerimientos de esta temperatura del Incinerador es la Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alúmina) y SiO<sub>2</sub> (Silíce).

En base a este tipo de material refractario se realizaron los cálculos térmicos utilizando el método de conducción para determinar el espesor requerido de las paredes del Incinerador.

<sup>(1)</sup>De acuerdo al espacio que se tiene y a lo que se propuso en el punto anterior, consideraremos una temperatura en el interior del Inclinerador de 1500 °C, una temperatura promedio en el exterior de 10 °C, y un espesor de 0.229 m para el tabique refractario, 0.153 m para la cámara de aire y 0.153 m para el bloc, como se muestra en la figura V.

FIGURA V



Por condiciones de espacio solo podemos calcular el espesor del refractario.

$T_1 = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

donde:

$T_1$  = Temperatura en la cara caliente.

$T_a$  = Temperatura en el exterior.

La resistencia que presenta la cámara de tabique refractario en contacto directo con la flama de inclinación es:

$$R = \frac{X}{K} \dots \dots \dots 8$$

$X$  = Espesor del material, m.

$K$  = Conductividad del material, kcal/hm<sup>2</sup> (°C/m).

Para los tres espesores tenemos que la conducción para una pared compuesta:

$$R_1 = \frac{0.229}{0.404} = 0.567 \text{ (Refractario)}$$

$$R_2 = \frac{0.153}{0.019} = 8.052 \text{ (Cámara de Aire)}$$

$$R_3 = \frac{0.153}{0.688} = 0.223 \quad (\text{Bloc})$$

Sabiendo que la suma de las resistencias en un muro con múltiples materiales es igual a la resistencia total.

$$R = \Sigma R = (0.567 + 8.052 + 0.223) \dots\dots\dots 9$$

$$R = 8.842 \text{ h}^\circ\text{C/kcal}$$

Las caídas de temperatura a través de la pared es proporcional a la resistencia de esa pared comparada con la resistencia total, de la figura VI tenemos:

$$T_i - T_1 = \frac{R_1}{R} (T_i - T_0) \dots\dots\dots 10$$

$$T_1 - T_2 = \frac{R_2}{R} (T_i - T_0) \dots\dots\dots 11$$

$$T_2 - T_0 = \frac{R_3}{R} (T_i - T_0) \dots\dots\dots 12$$

donde:

$$T_i - T_1 = \frac{0.567}{8.842} (1500 - 10) = 95.547 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_1 = T_i - 95.547 = 1500 - 95.547 = 1404.453 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_1 - T_2 = \frac{8.052}{8.842} (1500 - 10) = 1356.87 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_1 - 1356.87 = 1404.453 - 1356.87 = 47.579 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 - T_0 = \frac{0.223}{8.842} (1500 - 10) = 37.579 \text{ }^\circ\text{C}$$

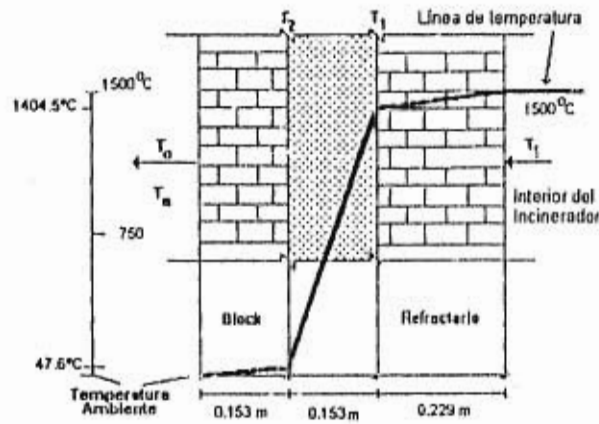
$$T_0 = T_2 - 37.579 = 47.579 - 37.579 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Por lo tanto tenemos :

Un descenso de temperatura de la cara caliente  $T_i = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , a  $T_1 = 1404.45 \text{ }^\circ\text{C}$ , a  $T_2 = 47.58 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esto nos da una temperatura en la cara fría  $T_0 =$  Temperatura ambiente, como lo muestra la figura VI:



FIGURA VI  
Caída de temperatura



El calor que cede el incinerador al medio ambiente se calcula de la siguiente manera:

$$Q = \frac{1}{R} (T_i - T_o)$$

donde:

Q = Calor, kcal/h.

R = Resistencia del sistema, h°C/kcal.

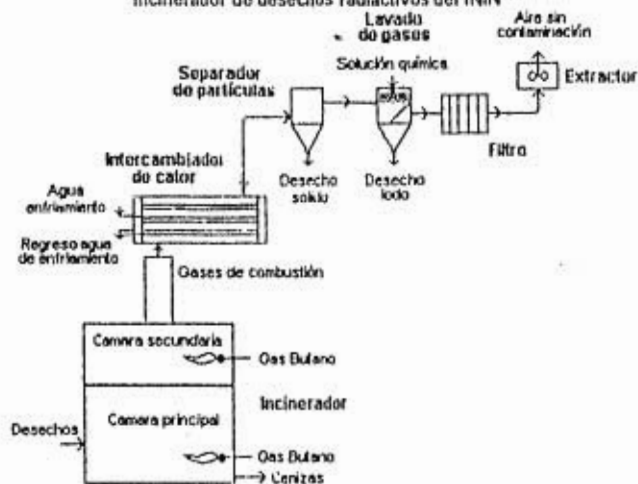
$$Q = \frac{1}{8.842} (1500 - 10)$$

$$Q = 168.52 \text{ kcal/h}$$

Considerando los datos anteriores se analizaron cotizaciones y se llegó a la conclusión de que el material que se acerca más a los requerimientos de temperatura del incinerador es el LADRILLO REFRACTARIO STANDARD ÁLAMO MK CON 46 % DE  $Al_2O_3$  y 57% de  $SiO_2$ . Los datos técnicos de este refractario se encuentran en el anexo A.

El diseño que se propone en base a la literatura y a las condiciones de diseño que nos marca el Organismo Internacional de Energía Atómica y las condiciones de diseño que tiene el incinerador de desechos convencionales, el incinerador que se está rediseñando, debe constar de las siguientes etapas que se muestran en la figura VII, la cual muestra el sistema de incineración proyectado para el tratamiento de desechos radiactivos en forma segura.

FIGURA VII  
Incinerador de desechos radiactivos del ININ



El diseño para el Incinerador que se propuso en base a la literatura y a los requerimientos de diseño antes mencionados que se puede observar en la figura V (Incinerador), debe contar con dos cámaras de incineración, para que la combustión se aproxime al 100%.

En la figura III y VII se muestra las dos cámaras de incineración:

Primaria la cual contendrá:

- Cenicero con charola. (para la fácil recolección de las cenizas). (A)
- Arco parrilla. (para recepción de cenizas). (B)
- Arco parrilla. (para crear turbulencia y provocar que el material sólido contenido en el aire desciendan a la zona de combustión). (C)
- Arco completo. (para crear turbulencia y provocar que el material sólido contenido en el aire desciendan a la zona de combustión y provocar que las cenizas se dirijan a la segunda cámara). (D)

Secundaria:

Para quemar el material sólido y los gases de combustión restantes que no se quemaron en la primera.

Un intercambiador de calor para hacer descender la temperatura de los gases a un rango de temperatura de 300 a 100 °C.

Un separador ciclónico de partículas para captar gran parte del material sólido suspendido en los gases de combustión.

Un sistema de lavado de gases para la eliminación de contaminantes de los gases de combustión expulsados al ambiente.

Un filtro para retención de partículas suspendidas en los gases.

Un sistema de extracción de gases para mantener la presión dentro del incinerador menor a la atmosférica para minimizar los riesgos de fugas de gases.

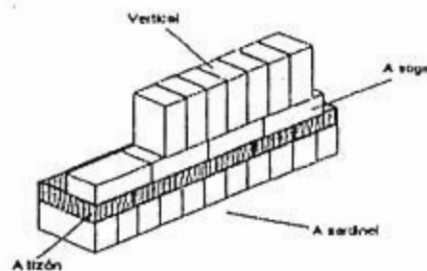
Un punto que influye en la duración del incinerador es la forma de instalación del material refractario, por esta razón ya habiendo delimitado el tipo de ladrillo refractario, necesitamos saber la forma de como se van a instalar estos.

#### c. instalación del material refractario<sup>(5, 6)</sup>.

Anteriormente se menciono que para aumentar la vida útil del incinerador, depende esta no solamente del material refractario ó de la forma de uso, esta depende en gran medida de la forma en que esta instalado.

Para cubrir esta recomendación existen cuatro maneras de colocar los ladrillos refractarios (en forma Vertical, A soga, A lizón y A sardinel); se recomienda que las paredes de mas de 1m de altura se construyan normalmente de la manera llamada a lizón, para evitar inestabilidad con la altura, por esta razón se sugirió colocarlos de la forma a lizón como se muestra en la figura VIII.

FIGURA VIII



Los datos técnicos del mortero que se usará para la instalación de el material refractario se encuentran en el anexo A.

#### Juntas de dilatación

Todas las estructuras refractarias, deben tener un espacio para la expansión al calentamiento. Es necesaria una experiencia considerable para conocer cuántas y de que tamaño deben ser las juntas de dilatación a utilizar.

Una junta de dilatación en una pared puede ser un junta vertical recta, o bien puede ser un junta de separación (como se muestra en la figura siguiente). Cuando se utilizan juntas de expansión en hogares a muy altas temperaturas, deben colocarse estas a no más de 4 a 6 ladrillos de separación, normalmente en las esquinas de los hornos en primer lugar y posteriormente en posiciones intermedias si es necesario.

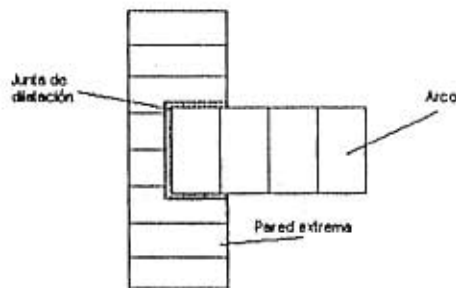
En la figura IX se muestra la disposición de la junta de dilatación, en pared de ladrillo refractario aislante de 22.86 cm de espesor y la anchura en pulgadas por pie de longitud.

FIGURA IX  
Disposición de la cara caliente



Las juntas de dilatación en los extremos de los arcos se deben instalar en el extremo de la pared, dando así una junta de laberinto, como se muestra en la figura X. Todas las juntas de dilatación deben tener un espesor de 1 cm; los datos técnicos de la junta de dilatación se muestran en el Anexo A.

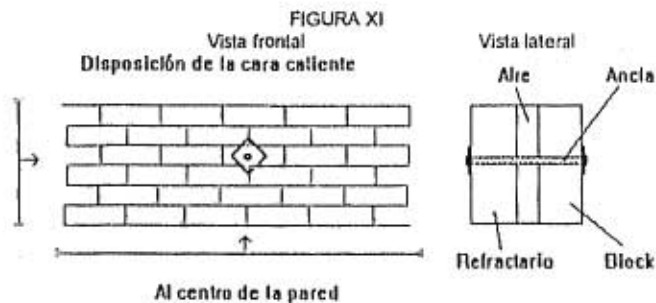
FIGURA X  
Vista superior



#### Anclaje de la pared.

Para evitar un posible alabeo y abombamiento en las paredes se necesita colocar junto con las juntas de dilatación un serie de anclajes a intervalos determinados.

Este tipo de anclaje se consigue normalmente con anclas que están sujetas en algún ladrillo especial, normalmente se colocan al centro de los muros del hogar del incinerador. En la figura XI se indica el método de anclaje de una pared de ladrillo refractario aislante con arcos y parrillas. El material recomendado por la literatura y los fabricantes es el acero inoxidable tipo "316" recomendación hecha por el proveedor.



#### d. Arcos y parrillas.

Cálculo de las tensiones de los tabiques refractarios en la construcción.

Radio hasta el centro del anillo del arco.

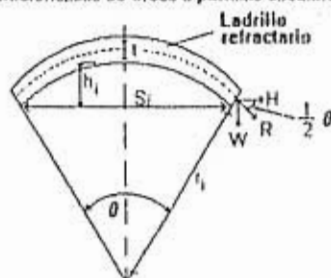
Debido a los calentamientos y trabajo intermitente, se recomienda trabajar con arcos y techos de forma de una catenaria, sin embargo no hay una estandarización entre la abertura o vano y su elevación, ya que en algunos casos se necesita un arco de gran altura para el espacio o zona de combustión y en otros se requiere un arco plano para forzar a que la llama se dirija hacia abajo, sobre los desechos.

Se ha optado por tomar la forma de catenaria por que se ha encontrado que es particularmente satisfactorio para algunos de los arcos más altos, permitiendo así tener una eliminación casi completa de la estructura de hierro para sostenerla.

Con las ecuaciones siguientes calculamos los diversos factores y tensiones, que presentan los arcos circulares durante su uso; la curvatura de un arco se expresa normalmente en pulgadas de flecha por pie de vano o abertura.

Para mejor explicación de estos cálculos podemos apoyarnos en la figura XII con sus dimensiones principales. De este diagrama es fácil calcular estos diversos factores y tensiones.

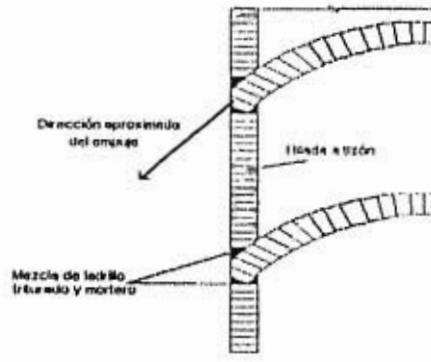
FIGURA XII  
Características de arcos u parrillas circulares



Para calcular los vanos y espesores de los arcos debemos tomar en cuenta la relación entre la abertura y el espesor de los arcos, ya que esta relación depende mucho del tipo de refractario, de la temperatura del incinerador y de las condiciones de funcionamiento; en general, para una construcción de ladrillos de 11.43 cm de espesor no deberán usarse para vanos de más de 152.4 cm.

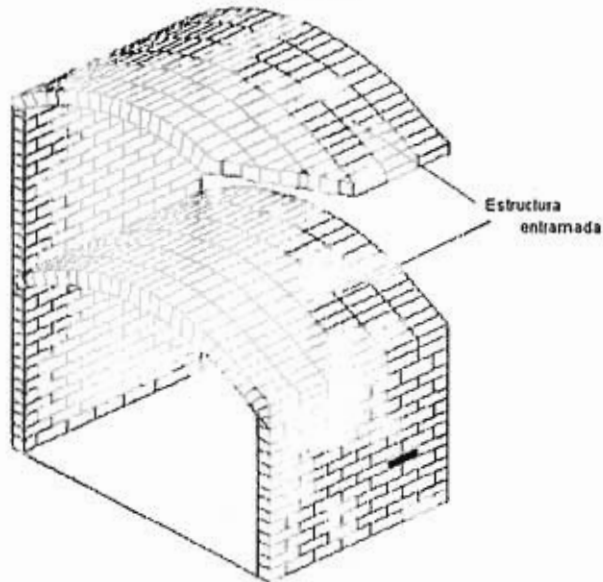
El arranque debe construirse convenientemente para dar un ángulo adecuado en los extremos del arco, y debe tener suficiente superficie para acomodar el espesor del anillo del arco. El método para sujetar las piezas de arranque se indican en la figura XIII. El arco puede apoyarse en la parte de arriba de la pared, siendo este soportado por la pared inferior, evitando que la pared superior tienda a que se arquee.

FIGURA XIII



Los arcos deben construirse en una estructura entramada como la que se indica en la figura siguiente, esta construcción tiene la ventaja de dar una estructura más estable en el caso de ruptura o avería de una de las unidades individuales o cualquier arco puede repararse sin alterar a los demás, lo que en algunos casos es una ventaja real; la desventaja que tiene es que para su colocación se requiere de un poco de habilidad para obtener una carga uniforme en todos los ladrillos.

FIGURA XIV



Conociendo la manera en que se debe instalar los tabiques refractarios, calcularemos los arcos (y parrillas) del Incinerador.

Apoyándonos en la figura XII podemos calcularlos.

### Radio Interior del anillo

$$r_i = \frac{S_i^2}{8 h_i} + \frac{h_i}{2} \dots\dots\dots 13$$

donde:

- $r_i$  = Radio Interior del anillo.
- $h_i$  = La flecha, m.
- $S_i$  = La abertura o vano, m.

sustituyendo datos:

$$h_i = 0.08 \text{ m}$$

$$S_i = 1.5 \text{ m}$$

$$r_i = \frac{(1.5)^2}{8(0.08)} + \frac{(0.08)}{2}$$

$$r_i = 3.56 \text{ m}$$

### La flecha

Ángulo central

$$\text{sen } (1/2 \theta) = \frac{S_i}{2 r_i} \dots\dots\dots 14$$

$$\theta = 2 \text{ sen}^{-1} \frac{S_i}{2 r_i}$$

sustituyendo valores:

$$\theta = 2 \text{ sen}^{-1} \frac{1.5}{2(3.56)}$$

$$\theta = 9.56^\circ$$

### Longitud del arco medio

$$l = 2 \pi r_i \frac{\theta}{360^\circ} \dots\dots\dots 15$$

$\theta$  = Ángulo central,  $^\circ$ .

$l$  = Longitud del arco medio, m.

donde:

$$r_i = 3.56 \text{ m}$$

$$\theta = 9.56^\circ$$

$$l = 2 \pi (3.56) \frac{9.56^\circ}{360^\circ}$$

$$l = 0.59 \text{ m}$$

**La mitad del peso por cada metro de longitud**

$$w = 1/2 \cdot l \cdot d \quad \dots\dots\dots 16$$

- d = Densidad del ladrillo refractario, kg/m<sup>3</sup>
- l = Espesor, m
- l = Longitud del arco medio, m
- w = La mitad del peso por cada pie de longitud del arco, kg

donde:

$$\begin{aligned}d &= 2314.16 \text{ kg/m}^3 \\l &= 0.06 \text{ m} \\w &= 1/2 (0.59)(0.06)(2314.16) \\w &= 41.30 \text{ kg}\end{aligned}$$

**Esfuerzo resultante en el arranque**

$$R = w \operatorname{cosec} 1/2 q \quad \dots\dots\dots 17$$

reordenando la ecuación 17, tenemos:

$$R = w \frac{1}{\operatorname{sen} 1/2 q}$$

donde:

$$R = (41.30) \frac{1}{\operatorname{sen} 1/2(9.56)}$$

$$R = 41.35 \text{ kg}$$

**Esfuerzo horizontal en el arranque**

$$H = w \operatorname{col} 1/2 q \quad \dots\dots\dots 18$$

H = Esfuerzo horizontal en el arranque por metro de longitud, kg

donde:

$$H = (41.30) \operatorname{col} 1/2(9.56)$$

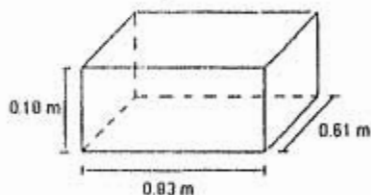
$$H = 56.36 \text{ kg}$$

Tenemos la forma en que se va a instalar este material refractario, ahora necesitamos conocer el volumen que nos queda para poder introducir los desechos.

Tomando en cuenta que nos quedo un espacio de 0.826m x 0.610m x 0.36m aproximadamente, solo tomaremos la mitad de la altura para tener un margen del 50% libre, dándonos este espacio una mayor circulación de aire ayudando a aumentar la turbulencia necesaria dentro de la cámara primaria de incineración, al tomar las dimensiones de 0.826m x 0.610m x 0.18m se tiene un volumen de 0.09 m<sup>3</sup> como se observa en la figura XV, para fines prácticos tomaremos el volumen como 0.1 m<sup>3</sup>, por lo tanto en 0.1 m<sup>3</sup> tendremos aproximadamente 100 kg de desechos.



Figura XV



Conociendo que estos desechos se encuentran compactados en bidones de 200 lt ( $0.2\text{m}^3$ ), tomando en cuenta que estos se encuentran distribuidos homogéneamente dentro de los bidones y que tienen una humedad promedio al 13%, por esta razón consideramos a la densidad como 0.5  $\text{kg/l}$ , tenemos que:

$$\delta = \frac{m}{v} \Rightarrow m = \delta v \quad \dots\dots\dots 19$$

donde:  $\delta$  = Densidad de los desechos,  $\text{kg/l}$ .  
 $m$  = Masa de los productos,  $\text{kg}$ .  
 $v$  = Volumen de los desechos,  $\text{m}^3$ .

sustituyendo valores en la ecuación 19, tenemos que:

$$m = (0.5)(200)$$

$$m = 100 \text{ kg}$$

De acuerdo a que a la zona de combustión solo le podemos introducir aproximadamente 100 kg de desechos, pero para no sobrecargar el incinerador y trabajar mas tiempo este no se va a llenar en su totalidad; anteriormente se menciono que para aumentar la eficiencia debe existir turbulencia dentro del incinerador, por lo que solo vamos a introducir 50 kg de desechos en cada carga.

De acuerdo al espacio restante en la zona de recolección esta es semejante a la de la cámara primaria de incineración, por lo que la charola deberá tener unas dimensiones de 0.79m x 0.56m x 0.30m dándonos un volumen de  $0.13 \text{ m}^3$ .

Teniendo ya la forma en que se colocara el material refractario, necesitamos saber la cantidad de estos.

**Cantidad de material<sup>(4)</sup>.**

Antes de realizar los cálculos para determinar el número de material refractario, debemos tomar en cuenta el grosor de las juntas (de mortero) verticales, horizontales y laterales para los muros; en reglas generales, se cuenta 1 centímetro por junta.

Generalmente existen pequeños percances en el transporte y en la instalación de los materiales refractarios produciendo esto una pérdida del mismo, por esta razón se considera de 15 a 20 % más del material necesario y las paredes como muros sin huecos.

Considerando ladrillos estándar de 0.064 x 0.114 x 0.223 m, determinados anteriormente.

### Altura de los muros

Tenemos una misma altura para los cuatro muros: La altura aproximada del muro es de 4 m donde aproximadamente hay 64 ladrillos enteros o sea:

$$\begin{array}{l} \text{Ladrillos} \\ 64 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Espesor del ladrillo} \\ (0.064) = 4 \text{ m} \end{array}$$

Para los 64 ladrillos hay 64 juntas por lo tanto:

$$\begin{array}{l} \text{Ladrillos} \\ 64 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Espesor de la junta} \\ (0.01) = 0.84 \text{ m} \end{array}$$
$$\text{lo que equivale a } = \frac{0.64}{0.064} = 10 \text{ ladrillos.}$$

Recapitulando:

número de hileras de ladrillos teóricos	64
menos número de hileras de ladrillos equivaliendo a las juntas	10
número de hileras de ladrillos probables	54

verificando

$$\begin{array}{l} 54 (0.064) = 3.46 \text{ m} \\ 54 (0.01) = 0.54 \text{ m} \\ \text{altura} = (3.46) + (0.54) = 4 \text{ m} \end{array}$$

### Largo de los muros

Como se mostró en la figura III dos muros de 2.30 m y los otros dos de 2.03 m, como en la altura se calculan de manera semejante.

Para los muros de 2.30 m.

El largo del muro es de 2.30 donde hay 20 ladrillos enteros o sea:

$$\begin{array}{l} \text{Ladrillos} \\ 20 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Espesor del ladrillo} \\ (0.114) = 2.28 \text{ m} \end{array}$$

Para los 20 ladrillos hay 20 juntas (incluyendo las de dilatación) por lo tanto:

$$\begin{array}{l} \text{Ladrillos} \\ 20 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Espesor de la junta} \\ (0.01) = 0.20 \text{ m} \end{array}$$
$$\text{lo que equivale a } = \frac{0.20}{0.114} = 1.75 \text{ o sea a 2 ladrillos.}$$

Recapitulando:

número de hileras de ladrillos teóricos	20
menos número de hileras de ladrillos equivaliendo a las juntas	2
número de hileras de ladrillos probables	18

verificando

$$18 (0.114) = 2.05 \text{ m}$$

$$18 (0.01) = 0.18 \text{ m}$$

$$\text{Largo} = (2.05) + (0.18) = 2.23$$

falta 0.07 m, sabiendo que esto se compensa con las juntas de dilatación.

Para los muros 2.03 m.

El largo del muro es de 2.03 m donde hay 18 ladrillos enteros o sea:

$$\begin{array}{l} \text{Ladrillos} \quad \text{Espesor del ladrillo} \\ 18 \quad (0.114) = 2.05 \text{ m} \end{array}$$

Para los 18 ladrillos hay 18 juntas por lo tanto:

$$\begin{array}{l} \text{Ladrillos} \quad \text{Espesor de la junta} \\ 18 \quad (0.01) = 0.18 \text{ m} \end{array}$$

lo que equivale a  $= \frac{0.18}{0.114} = 1.58$  o sea 2 ladrillos.

Recapitulando:

número de hileras de ladrillos teóricos	18
menos número de hileras de ladrillos equivaliendo a las juntas	2
	-----
número de hileras de ladrillos probables	16

verificando

$$16 (0.114) = 1.83 \text{ m}$$

$$16 (0.01) = 0.16 \text{ m}$$

$$\text{Largo} = (1.83) + (0.16) = 1.99 \text{ m}$$

faltan 0.01 m, sabiendo que esto se compensa con las juntas de dilatación.

Para los arcos y parrillas (considerando estas como arcos completos).

Para calcular los arcos necesitamos encontrar el número total de ladrillos del arco, tomando la longitud del arco medio y el espesor de los ladrillos refractarios tenemos:

De la ecuación 15, la longitud del arco medio es de 0.59 m

$$\text{N}^\circ \text{ de ladrillos} = \frac{0.59}{0.064} = 9.22 \text{ m}$$

Necesitamos 9 ladrillos en hilera de cada arco; para esto tenemos 7 arcos, los cuales consideraremos como arcos completos de pared a pared de 2.30 m de largo:

- Primer parrilla.
- Segunda parrilla.
- Tercer parrilla.
- Primer arco.

- Segundo arco.
- Tercer arco.
- Cuarto arco

N° total de ladrillos para el largo de cada arco = 9

$(9)(9) = 81$  ladrillos por cada arco.

N° total de ladrillos para los arcos =  $(81)(7) = 567$  tabiques refractarios.

Realizando la suma total de los tabiques de los muros y arcos tendremos:

Muros:  $(54)(18) = 972$  para los 2.30 m

$(54)(16) = 864$  para los 2.03 m

Arcos: 1134

N° de ladrillos =  $972 + 864 + 567 = 2403$

Considerando un 15 % mas por pérdidas tendremos:

N° total de ladrillos =  $2403 \sim 2760$  ladrillos refractarios.

Las características técnicas de estos ladrillos refractarios que fueron verificados en varias casas proveedoras, los cuales se encuentran en el Apéndice.

## 2.2.2 Balance de masa , energía y material radiactivo.

### Balance de masa.

<sup>(1)</sup>Un balance de masa es realmente una repetición de la ley de la conservación de masas. Es importante conocer que el balance lo debemos hacer con respecto a una entidad definida la cual llamaremos "sistema". Este sistema debe estar bien definido para poder resolver el problema. En la figura (XVI) indicamos el sistema ó Incinerador como un cuadrado; este representa una serie de pasos los cuales son el ingreso de desechos, aire y combustible; para identificar los flujos que entran o salen de el, lo representaremos con una línea que limite el sistema.

Este balance nos representa la cantidad de masa que entra y sale del sistema, en la tabla 1 se observa este balance bajo el principio de:

$$\text{La masa (en kg) que entra} = \text{La masa que sale (en kg)} + \text{la acumulación (en kg)}. \quad \dots\dots\dots 24$$

donde la acumulación es la cantidad de masa remanente en el sistema.

**TABLA 1**  
Cantidad de combustible que ingresa al Incinerador  
Celulosa  $C_6H_{10}O_5 + 6O_2 + (6 \cdot 3.76)N_2 \dots\dots\dots 6 CO_2 + 5 H_2O + 22.56 N_2$

	BUTANO		CELULOSA	
	Entran (kg)	Salen (kg)	Entran (kg)	Salen (kg)
$C_6H_{10}O_5$	0	0	43.5	0
$C_4H_{10}$	69.3	0	0	0
$O_2$	240	0	51.5	0
$H_2O$	0.7	100.1	6.5	30.7
$N_2$	817.5	817.5	169.5	169.5
$CO_2$	0	209.9	0	70.8
Total	1135.5	1135.5	271	271

	BALANCE DE MASA			
	Entra		Sale	
	Porcentaje	kg/h	Porcentaje	kg/h
$C_6H_{10}O_5$	3.09%	43.5	0.00%	0
$C_4H_{10}$	4.93%	69.3	0.00%	0
$O_2$	21.29%	299.5	0.00%	0
$H_2O$	0.51%	7.2	9.87%	136.8
$N_2$	70.17%	907	70.17%	907
$CO_2$	0.00%	0	19.96%	280.7
Cenizas	0.31%	4.35	0.31%	4.35
Total	100%	1406.5	100%	1406.5

### Balance de energía.

<sup>(2)</sup>El balance de energía es semejante al balance de masa, puesto que la ley de la conservación también es válida para la energía, se supone que la formulación de un balance de energía es análogo al balance de materiales el cual es representado en la figura (XVII), y lo podemos escribir como:

Entrada de energía = Salida de energía + aumento o disminución de energía dentro del sistema.

$$\text{Entrada de energía} = \text{Salida de energía} + \text{Acumulación de energía} \dots\dots\dots 25$$

donde las energías comprenden a las entalpías y los calores que ilustra el uso de dicho balance.

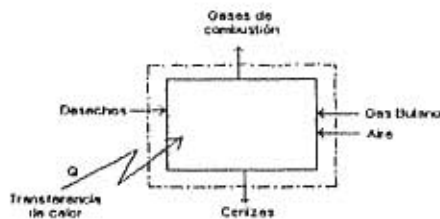
Es evidente que las corrientes de material que entran poseen energía y sabemos que la entalpía de estas corrientes es la forma apropiada de energía para usar en este balance. La cantidad total de entalpía que entra será la suma de los productos de la entalpía específica de cada una de las sustancias por su masa, entonces podemos decir que la entalpía total asociada en la entrada es:

$$\text{Entalpía total a la entrada} = H_{en} = m_A h_A + m_B h_B + m_C h_C + \dots \dots\dots 26$$

Vemos que en la ecuación anterior hay una entrada de energía al sistema en forma de calor, que debemos tener en cuenta. Recordando que el flujo de calor hacia el sistema se toma como positivo, es común considerar el término Q de calor como la entrada de energía. Como no hay más fuentes de energía que entran al sistema, tenemos que:

$$\text{Entrada total de energía} = \text{Entalpía total a la entrada} + \text{intercambio de calor (neto)} = H_{en} + Q$$

FIGURA XVI



Tomando en cuenta hasta ahora todas las entradas y salidas de energía; por lo tanto, podemos escribir el balance de energía como:

$$\text{Entrada total de energía} = (\text{Salida total de energía} + \text{la Acumulación})$$

$$H_{en} + Q = H_{sal}$$

reordenando:

$$H_{sal} - H_{en} = Q \dots\dots\dots 27$$

Esta ecuación nos representa el balance de energía. En la tabla (2) se muestra este balance utilizando la ecuación (27).

**TABLA 2**  
Cantidad de material combustible que ingresa al Incinerador

	BALANCE DE ENERGIA		
	Calor de Combustión [kcal/kg]	Masa [kg/h]	Calor [kcal/h]
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	-3723.06	50	-186153
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-10933.12	70	-765318.4
O <sub>2</sub>	0	299.3	0
H <sub>2</sub> O	-3208.26	130.2	-443301.532
CO <sub>2</sub>	-2.14	280.7	-600.690
Calor retirado por el incinerador		168.52	-168.52
<b>Total</b>		<b>507320.65</b>	<b>[kcal/h]</b>

La tabla 2 y la figura XVIII nos muestran que tenemos un residuo teórico al 5% del volumen original o sea 4.35 kg/h de cenizas y una generación de 507,320.65 kcal/hora.

**Balance de material radiactivo.**

La actividad promedio con la que llegan estos desechos radiactivos de bajo nivel es de  $1.22 \times 10^9$  Bq por bidón.

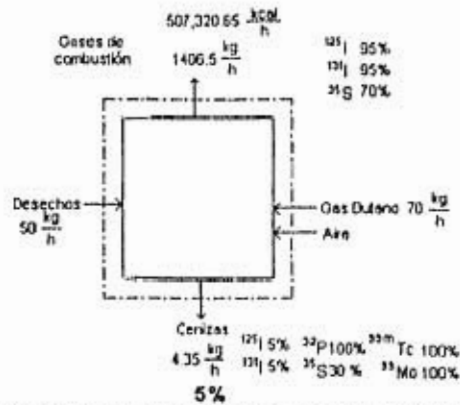
De acuerdo a que cada isótopo tiene una actividad específica dada en gramos, el balance de material radiactivo se estimó<sup>(2)</sup> como se muestra en la tabla 3:

**TABLA 3**  
Balance de material radiactivo  
Cantidad de material radiactivo que ingresa al Incinerador

Isótopo	Actividad [Bq/g]	Específica [Ci/g]	Entrada [g]	Salida		Salida	
				[%] ceniza	[%] gas	[g] ceniza	[g] gas
I-125	6.43E+14	1.74E+04	3.80E-11	5	95	1.898E-12	3.607E-11
I-131	4.60E+15	1.24E+05	5.31E-12	5	95	2.65E-13	5.041E-12
Mo-99	1.78E+16	4.80E+05	1.38E-12	100	0	1.37E-12	0
P-32	1.06E+16	2.86E+5	2.30E-12	100	0	2.30E-12	0
S-35	1.58E+15	4.28E+04	1.54E-11	30	70	4.62E-12	1.079E-11
Tc-99 <sup>m</sup>	1.95E+17	5.27E+06	1.25E-13	100	0	1.25E-12	0

Este balance se puede observar en la figura XVII.

FIGURA XVII



Estos datos son importantes para conocer que cantidad de cenizas se van a inmovilizar y la cantidad de gases que se van a tratar; el balance nos muestra que solo una pequeña parte de estos isótopos están contenidos en los desechos.

Para la inmovilización de las cenizas, estas se van directamente a los bidones de 200 l, para su almacenamiento definitivo en el Centro de Almacenamiento de Desechos Radiactivos (CADER, Maquixco, Mex.).



**CAPITULO III. DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS AUXILIARES DEL INCINERADOR.**

**3.1 Intercambiador de calor de coraza y tubos.**

El intercambiador de calor constituye uno de los equipos más importantes en este proceso, como se menciona en el capítulo II este equipo es necesario para hacer descender la temperatura de los gases de combustión de 1500 a 300 °C (2732 a 572 °F) aproximadamente, para introducirlos al sistema de lavado de gases.

El medio refrigerante es el agua con una temperatura promedio de alimentación de 10 °C (50 °F) y una temperatura máxima de salida del orden de 70 °C (158 °F).

De lo que se establece en la referencia 1 y 2 de este capítulo se siguieron los siguientes pasos:

1. Determinar que fluido va por los tubos y cual por la envolvente, por consideraciones de mantenimiento y el volumen de los gases se optó por los siguiente:

Los gases de combustión circulara por los tubos y el agua por la envolvente, con dos pasos en la envolvente.

2. Cálculo de la carga térmica Q y gasto del refrigerante.

$$Q = W C_p \Delta T \dots\dots\dots 28$$

$$Q = 2'013,048.339 \text{ BTU/h} = 507,320.65 \text{ kcal/h.}$$

$$2'013,048.339 = W C_{pl} \Delta T_l$$

W = Gasto de los tubos, (lb/h).

C<sub>pl</sub> = Calor específico del fluido de los tubos, (BTU/lb°F).

ΔT<sub>l</sub> = Temperatura promedio del fluido de los tubos, (°F).

$$W = \frac{2'013,048.339}{(0.340)(1200)} = 4,933.942 \text{ lb/h} = 2,238.036 \text{ kg/h}$$

3. Calculo de la diferencia media logarítmica de temperaturas ΔT<sub>m<sub>L</sub></sub>.

$$\Delta T_{m_L} = \frac{(\Delta t_1 - \Delta t_2)}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \dots\dots\dots 29$$

$$\Delta T_{m_L} = \frac{(2732 - 158) - (572 - 50)}{\ln \frac{(2732 - 158)}{(572 - 50)}}$$

$$\Delta T_{m_L} = 1,286.078 \text{ °F} = 696.71 \text{ °C}$$

4. Obtener el factor Ft debido al número de pasos (2), para eliminar todos los intercambiadores que tengan un valor menor de 0.85<sup>(2)</sup>.

$$R = \frac{T1 - T2}{I2 - I1} \dots\dots\dots 30$$

$$R = \frac{(2732 - 572)}{(158 - 50)} = 20$$

$$S = \frac{I2 - I1}{T1 - I2} \dots\dots\dots 31$$

$$S = \frac{(158 - 50)}{(2732 - 50)} = 0.04$$

De la figura 24<sup>(2)</sup>, obtenemos Ft.  
Ft = 0.95

5. Cálculo de la diferencia media de temperaturas efectivas LMTD:

$$LMTD = \Delta Tm_e \times Ft \dots\dots\dots 32$$

$$LMTD = (1,286.078)(0.95) = 1221.774 \text{ } ^\circ\text{F} = 660,986 \text{ } ^\circ\text{C}$$

6. Cálculo del área de transferencia de calor mediante la suposición del coeficiente global de transferencia de calor (U<sub>D</sub>) utilizando los valores mostrados en la tabla 1<sup>(2)</sup>.

$$A = \frac{Q}{U_D \text{ LMTD}} \dots\dots\dots 33$$

$$U_D = 20 \text{ BTU/hrft}^2\text{ } ^\circ\text{F} = 97.6 \text{ kcal/hrm}^2$$

$$A = 82.382 \text{ ft}^2 = 7.653 \text{ m}^2$$

7. Fijar las características de los tubos, seleccionando longitud L, diámetro nominal d, arreglo y espesor de pared (BWG).

De acuerdo a <sup>(2)</sup> los tubos deberán ser de 0.019 (3/4 pig), calibre 16 BWG, el arreglo triangular de 1 pig y 2 m (6.562 ft) de longitud.

8. Cálculo del número de tubos.

$$Nt = \frac{A}{ae \text{ L}} \dots\dots\dots 34$$

donde: ae = Área exterior por unidad de longitud del tubo (ft<sup>2</sup>/ft), se obtiene de la tabla 3<sup>(2)</sup>.

$$Nt = \frac{82.382}{(0.1963)(6.562)} = 63.956 = 64$$

## LADO DE LOS TUBOS

1. Cálculo del área de flujo por los tubos  $a_f$ .

$$a_f = \frac{Nt a'_t}{144 \times n} \dots\dots\dots 35$$

$a'_t$  = Área de flujo por tubo ( $ft^2$ ), se obtiene de la tabla 3<sup>(2)</sup>.  
 $n$  = Numero de pasos por los tubos.

$$a_f = \frac{(64)(0.302)}{(144)(2)} = 0.067 \text{ ft}^2 = 0.006 \text{ m}^2$$

2. Obtener el diámetro interior de la envolvente (Di) y diámetro limite de los tubos (Dotl) de la tabla 4<sup>(3)</sup>:

$$Di = 12 \text{ plg} = 0.305 \text{ m}, \text{ Dotl} = 10.75 \text{ plg} = 0.273 \text{ m}$$

3. Cálculo de la masa velocidad  $Gt$ .

$$Gt = \frac{W}{R_t} \dots\dots\dots 36$$

$$Gt = 73,640.925 \text{ lb/h ft}^2 = 359,514.998 \text{ kg/h m}^2$$

4. Cálculo de la velocidad  $V$ .

$$V = \frac{Gt}{3600 \times \delta} \dots\dots\dots 37$$

<sup>(4)</sup>  $\delta$  = densidad del fluido = 33.014,  $lb/ft^3$ .

$$V = \frac{73,640.925}{(3600)(33.014)} = 0.62 \text{ ft/seg} = 0.189 \text{ m/seg}$$

5. Cálculo del número de Reynolds.

$$N_{ret} = \frac{d_i Gt}{\mu} \dots\dots\dots 38$$

<sup>(4)</sup>  $\mu$  = Viscosidad del fluido,  $lb/ft \cdot h$ .  
 $d_i$  = Diámetro interior de los tubos,  $plg$ .

$$N_{ret} = \frac{(0.620)(73,640.925)}{0.168} = 271,770.08$$

8. Obtención del coeficiente individual de transferencia de calor para el lado de los tubos, de la figura 30<sup>(2)</sup>.

$$h_{io} = 860 \text{ BTU/ht}^2 \cdot \text{F} = 4,196.8 \text{ kcal/htm}^2 \cdot \text{C}$$

7. Cálculo de la caída de presión.

a) Obtención del factor de fricción  $f$ , de la figura 31<sup>(2)</sup>.

$$f = 0.00012$$

b) Sección recta.

$$\Delta p_l = \frac{f G^2 L}{\delta \mu} \dots\dots\dots 39$$

$$5.22 \times 10^{10} \text{ dl } \delta \mu$$

$$\Delta p_l = 47.579 \times 10^6 \text{ lb/plg}^2 = 0.326 \text{ Pa.}$$

c) Sección de retorno.

$$\Delta p_r = \frac{4n \times V^2}{\delta \times 2g} \frac{62.5}{144} \dots\dots\dots 40$$

$$g = \text{Aceleración de la gravedad} = 32.2, \text{ ft/h}^2$$

$$\Delta p_r = 0.001 \text{ lb/plg}^2 = 4.299 \text{ Pa.}$$

d) Cálculo de la caída de presión total.

$$\Delta P_T = \Delta p_l + \Delta p_r \dots\dots\dots 41$$

$$\Delta P_T = 47.579 \times 10^6 + 0.001 = 0.001 \text{ lb/plg}^2 = 4.625 \text{ Pa.}$$

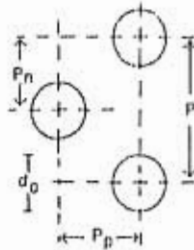
LADO DE LA ENVOLVENTE

a. Cálculo de los parámetro geométricos.

1. Obtención de arreglo de los tubos, mediante la tabla 5<sup>II</sup>.

$P_p = 0.866 \text{ plg.}$        $P = 1 \text{ plg.}$        $P_n = 0.500 \text{ plg.}$        $d_o = 3/4 \text{ plg.}$

FIGURA XVIII.



2. Cálculo del número de hileras de tubos en la sección de flujo cruzado.

$$N_c = \frac{D_i (1 - 2(ic/D_i))}{P_p} \dots\dots\dots 42$$

Escogemos un porcentaje de corte de la mampara (ic) de 16 % que es el mínimo, para obtener la mayor cantidad de tubos en la sección de flujo cruzado y por lo tanto, mayor transferencia de calor.

$ic/D_i = 0.16$        $ic = 0.16 (12) = 1.92 \text{ plg} = 0.049 \text{ m}$

$$N_c = \frac{12(1 - 2(0.16))}{0.866} = 9.077$$

3. Fracción de tubos en la zona de flujo cruzado.

$$F_c = \frac{1}{\pi} \left( \pi + 2 \frac{D_i - 2ic}{D_{o1}} \text{sen}(\cos^{-1} \frac{D_i - 2ic}{D_{o1}}) - 2 \cos^{-1} \frac{D_i - 2ic}{D_{o1}} \right) \dots\dots\dots 43$$

$$F_c = \frac{1}{\pi} \left( \pi + 2 \frac{(12 - 2(1.92))}{10.75} \text{sen}(\cos^{-1} \frac{(12 - 2(1.92))}{10.75}) - 2 \cos^{-1} \frac{(12 - 2(1.92))}{10.75} \right)$$

$F_c = 0.863$

4. Cálculo del número de hileras de tubos efectivas sometidas a flujo cruzado.

$$N_{cw} = \frac{0.8 ic}{P_p} \dots\dots\dots 44$$

$$N_{cw} = \frac{0.8(1.92)}{0.866} = 1.774$$

5. Cálculo de la zona de flujo cruzado.

$$S_m = B(D_i - D_{o1}) + \frac{D_{o1} - d_o}{P} (P - d_o) \dots\dots\dots 45$$

B = Distancia entre mamparas adyacentes. (plg): desde 1/5 de  $D_i$  hasta  $D_i$ .

$$B = \frac{D_i}{1} - \frac{12}{1} = 12 \text{ plg} = 0.305 \text{ m}$$

$$S_m = 12(12 - 10.75 + \frac{10.75 - 0.75}{1} (1 - 0.75)) = 45 \text{ plg}^2 = 0.029 \text{ m}^2$$

Total de mamparas a lo largo del Intercambiador = 6.

6. Cálculo de la fracción de área de la zona de flujo disponible para flujo desviado (By-pass).

$$F_{bp} = \frac{(D_i - D_{o1}) B}{S_m} \dots\dots\dots 46$$

$$F_{bp} = \frac{(12 - 10.75) 12}{45} = 0.333$$

7. Cálculo del área de fuga entre tubos y mamparas, para una mampara.

$$S_{1b} = 0.0245 d_o N_l (1 + F_c) \dots\dots\dots 47$$

$$S_{1b} = 0.0245(0.75)(64)(1 + 0.63) = 1.917 \text{ plg}^2 = 0.001 \text{ m}^2$$

8. Cálculo del área de fuga entre la mampara y la envolvente, para una mampara.

$$S_{sb} = \frac{D_i \delta_{sb}}{2} (\pi - \cos^{-1} (1 - 2 ic/D_i)) \dots\dots\dots 48$$

$\delta_{sb}$  = Se obtiene de la tabla Pag. 91<sup>(2)</sup>.

$$S_{sb} = \frac{(12)(0.100)}{2} (\pi - \cos^{-1} (1 - 2(0.16))) = 1.391 \text{ plg}^2 = 0.001 \text{ m}^2$$

9. Cálculo del área de flujo a través de la ventana.

Área total de la ventana.

$$S_{wg} = \frac{D_i^2}{4} (\cos^{-1} (1 - 2 ic/D_i) - (1 - 2 ic/D_i) (1 - (1 - 2 ic/D_i)^2)^{1/2}) \dots\dots\dots 49$$

$$Swg = \frac{(12)^2}{4} (\cos^{-1}(1-2(0.16)) - (1-2(0.16)) (1-(1-2(0.16))^2)^{1/2}) = 11.68 \text{ pi}g^2 = 0.008 \text{ m}^2$$

Área de flujo ocupada por los tubos en la ventana:

$$Swf = \frac{Nt}{8} (1-Fc) \pi d_o^2 \dots\dots\dots 50$$

$$Swf = \frac{64}{8} (1-0.883) \pi (0.75)^2 = 1.937 \text{ pi}g^2 = 0.001 \text{ m}^2$$

Área de flujo a través de la ventana.

$$Sw = Swg - Swf \dots\dots\dots 51$$

$$Sw = (11.68) - (1.937) = 9.743 \text{ pi}g^2 = 0.006 \text{ m}^2$$

b. Cálculo del coeficiente Individual de transferencia de calor.

1. Cálculo del número de Reynolds.

$$NRes = \frac{12 d_o W}{\mu_b S_m} \dots\dots\dots 52$$

<sup>(4)</sup>  $\mu_b$  = Viscosidad del fluido a temperatura de entrada = 2.904, lb/ft<sup>h</sup>.

$$NRes = \frac{12(0.75)(4,933.942)}{(2.904)(45)} = 339.803$$

2. Obtención del factor Jk para un banco ideal de tubos, de la figura 37<sup>(2)</sup>.

$$Jk = 0.034$$

3. Obtención del coeficiente Individual de transferencia de calor, para un banco ideal de tubos.

$$hk = Jk C_p \frac{144W}{S_m} \frac{k}{C_{p\mu b}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \dots\dots\dots 53$$

<sup>(4)</sup>  $\mu_w$  = Viscosidad del fluido a temperatura de salida = 1.016, lb/ft<sup>h</sup>.

$$hk = 0.034(0.009) \frac{144(4,933.942)}{45} \frac{0.343}{(0.009)(2.904)} \left(\frac{2.904}{1.016}\right)^{0.14}$$

$$hk = 31.138 \text{ BTU/hft}^2\text{°F} = 151.953 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

4. Obtención del factor de corrección por el efecto de la configuración de la mampara, de la figura 38<sup>(2)</sup>.

$$Jc = 1.13$$

5. Obtención del factor de corrección por el efecto de fuga en las mamparas, de la figura 39<sup>(2)</sup>.

$$\begin{array}{r} S_{sb} \\ \hline S_{sb} + S_{tb} \end{array} \dots\dots\dots 54$$

$$\begin{array}{r} S_{sb} + S_{tb} \\ \hline S_m \end{array} \dots\dots\dots 55$$

$$\frac{(1.391)}{(1.391) + (1.917)} = 0.4$$

$$J_t = 0.8$$

$$\frac{(1.391) + (1.917)}{45} = 0.1$$

6. Obtención del factor de corrección por el efecto producido por el flujo desviado (By pass) del haz de tubos, de la figura 40<sup>(2)</sup>.

$N_{ss}$  - , de la tabla Pag.94 y fig.41<sup>(2)</sup> ..... 56

$$\frac{N_c}{4} = 0.441 \quad J_b = 0.97$$

$$\frac{4}{9.077}$$

7. Obtención del factor de corrección debido al gradiente adverso de temperatura.

$J_r = 1$  ya que el número de Reynolds es mayor de 100.

8. Cálculo del coeficiente individual de transferencia de calor efectivo.

$$h_s = h_k J_c J_t J_b J_r \dots\dots\dots 57$$

$$h_s = (31.138)(1.13)(0.8)(0.97)(1) = 27.304 \text{ BTU/ht}^2\text{°F} = 133.245 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

9. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor de diseño.

$$U_D = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_{lo}} + R_d} \dots\dots\dots 58$$

$R_d$  = Factor de ensuciamiento,  $R_d = R_{dt} + R_{dc}$  (ht<sup>2</sup>°F/BTU)

$R_{dt}$  y  $R_{dc}$  = Factores de obstrucción.

de la tabla 12<sup>(1)</sup>, tenemos:

$$R_d = 0.01 + 0.002 = 0.012 \text{ ht}^2\text{°F/BTU}$$



$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{27.304} + \frac{1}{860} + 0.012} = 20.085 \text{ BTU/hft}^2\text{°F} = 98.017 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

El valor de  $U_o$  calculado varía muy poco del supuesto, por lo que se toma el supuesto.

c. Cálculo de la caída de presión para el lado de la envolvente.

1. Determinar el factor de fricción para un banco ideal de tubos, de la figura 44<sup>(2)</sup>.

$$f_k = 0.29$$

2. Cálculo de la caída de presión para una sección ideal de flujo cruzado.

$$\Delta P_{bk} = 0.69 \times 10^{-6} \frac{f_k W^3 N_c}{\delta S m^2} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} \dots \dots \dots 59$$

<sup>(4)</sup>  $\delta$  = Densidad del fluido, (lb/ft<sup>3</sup>)

$$\Delta P_{bk} = 0.69 \times 10^{-6} \frac{(0.29)(4,933.942)^2 (9.077)}{(9.746)(45)^2} \left( \frac{1.016}{2.904} \right)^{0.14}$$

$$\Delta P_{bk} = 0.002 \text{ lb/plg}^2$$

3. Cálculo de la caída de presión ideal por la sección de la ventana.

$$\Delta P_{wk} = 1.73 \times 10^{-7} \frac{W^2 (2 + 0.6 N_{cw})}{S_m S_w \delta} \dots \dots \dots 60$$

$$\Delta P_{wk} = 1.73 \times 10^{-7} \frac{(4,933.942)^2 (2 + 0.6(1.774))}{(45)(9.743)(9.746)}$$

$$\Delta P_{wk} = 0.003 \text{ lb/plg}^2$$

4. Obtención de factor de corrección por efecto de fugas en la cámara, de la figura 46<sup>(2)</sup>.

$$\frac{S_{sb}}{S_{sb} + S_{tb}} = 0.4$$

$$R_l = 0.66$$

$$\frac{S_{sb} + S_{tb}}{S_m} = 0.1$$

5. Obtención del factor de corrección debido a las corrientes desviadas (By-pass), de la figura 47<sup>(2)</sup>.

$$R_b = 1$$

6. Cálculo del número de mamparas.

$$Nb = \frac{12 L'}{B} - 1 \quad L = 6.562 \quad L = \text{Longitud efectiva de los tubos, (ft).}$$
$$Nb = \frac{12(6.562)}{12} - 1 \quad B = 12$$
$$Nb = 5.562 = 6$$

7. Cálculo de la caída de presión para el lado de la envolvente.

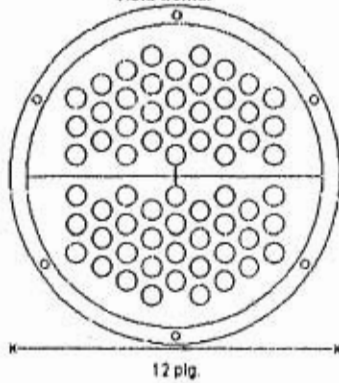
$$\Delta ps = ( ( Nb - 1 ) ( \Delta Pbk ) Rb + Nb \Delta Pwk ) Ri + 2 \Delta Pbk Rb ( 1 + Ncw/Nc )$$

$$\Delta ps = ( ( 6 - 1 ) ( 0.002 ) ( 1 ) + ( 6 ) ( 0.003 ) ) ( 0.66 ) + 2 ( 0.002 ) ( 1 ) ( 1 + ( 1.774 / 9.077 ) )$$

$$\Delta ps = 0.023 \text{ lb/plg}^2 = 159.313 \text{ Pa.}$$

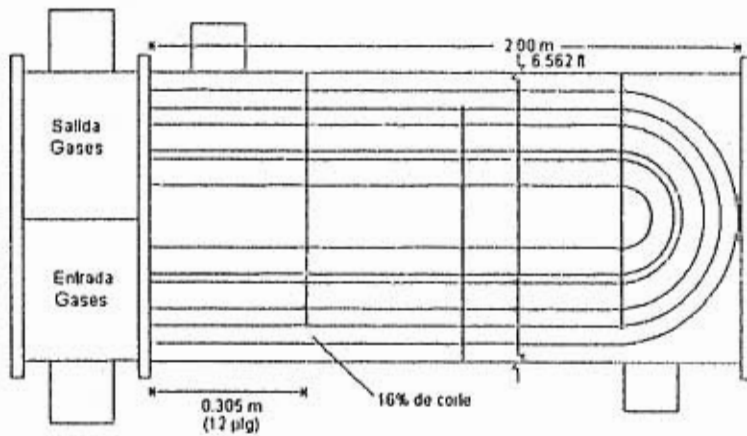
El intercambiador propuesto se muestra en la figura XIX.

FIGURA XIX  
Vista frontal



12 plg.

Corte transversal.  
Intercambiador de coraza y tubo de dos pasos.



### 3.2 Separador ciclónico de partículas.

El separador ciclónico es un equipo de recolección de partículas, en el cual el gas cargado de polvo entra tangencialmente en una cámara cilíndrica ó cónica y sale de la misma a través de una abertura central. En virtud de su inercia, las partículas de polvo tienden a desplazarse hacia la pared exterior del separador, desde la cual son reducidas a un receptor. Este es esencialmente una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional se sustituye con la aceleración centrífuga.

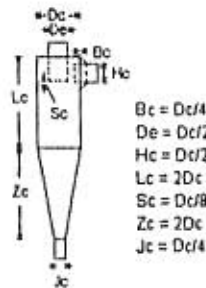
El ciclón se utiliza para eliminar sólidos en los gases y se pueden operar a temperaturas tan elevadas como 1000 °C. En estos la velocidad del gas presenta un doble vórtice, en donde el gas dibuja una espiral descendente en el lado exterior, ascendente en el lado interior y descendentemente con forme se acercan al centro como se muestra en la figura XX.

Para el diseño de el separador ciclónico se tomo como base en la figura 20-106<sup>(7)</sup>, que nos muestra las proporciones de un separador de este tipo; en base a las dimensiones de la tubería que llega desde el intercambiador de calor se presente el siguiente diseño.

El diámetro de la tubería después del intercambiador de calor debe ser de 8 plg (0.203 m) con una área de 50.24 plg<sup>2</sup> (0.032 m<sup>2</sup>), correspondiéndole las siguientes dimensiones.

Dc = 16 plg (0.406m), Bc = 4 plg (0.102m), Hc = 8 plg (0.203m), Lc = 32 plg (0.813m).  
 De = 8 plg (0.203m), Jc = 4 plg (0.102m), Sc = 2 plg (0.051m) y Zc = 32 plg (0.813m).

FIGURA XX  
Separador ciclónico



La caída de presión se determina de la siguiente forma:

$$\Delta v_t = 0.013 \rho V_c^2 \dots\dots\dots 61$$

donde:

- $\Delta v_t$  = Caída de presión, mm-H<sub>2</sub>O.
- $\rho$  = Densidad de los gases, kg/m<sup>3</sup>.
- $V_c$  = Velocidad promedio del gas, m/s.

despejando a  $V_c$  y dando valores a la ecuación 61, tenemos:

$$\rho = 0.357 \times 10^{-3} \text{ lb/ft}^3$$

$$V_c = 65.927 \text{ ft/s.}$$

$$\Delta v_t = 0.013(0.357 \times 10^{-3})(65.927)^2$$

$$\Delta v_t = 0.02 \text{ plg-H}_2\text{O} = 5.024 \text{ Pa.}$$

Para determinar la eficiencia de recolección, se procedió a calcular el diámetro crítico de la partícula, es decir, el diámetro de la partícula más pequeña que teóricamente se separa de la corriente del gas con una eficiencia de 100 % y el diámetro de corte, que es el diámetro de partícula correspondiente a una eficiencia fraccionaria de 50 %.

Apoyándonos en la ecuación obtenida por Rosin, Rammler e Iselman<sup>(4)</sup> para el diámetro crítico de la partícula, tenemos que:

$$D_{p,cr} = \left[ \frac{9 \mu Bc}{\rho Ntc Vc (\rho_s - \rho)} \right]^{0.5} \dots \dots \dots 62$$

donde:

- Ntc = Numero de vueltas que realiza la corriente de gas dentro del ciclón<sup>(4)</sup>.
- $\rho_s$  = Densidad de la partícula, lb/ft<sup>3</sup>.
- $\rho$  = Densidad del gas, lb/ft<sup>3</sup>.
- $\mu$  = Viscosidad del gas, lb/ft.h.
- Bc = Diámetro de la tubería, plg.

dando valores a la ecuación 62, nos queda:

- Ntc = 6 vueltas.
- $\rho = 0.357 \times 10^{-3}$ , lb/ft<sup>3</sup>.
- $\mu = 0.168$ , lb/ft.h.
- Bc = 8, plg.
- $D_{p,cr} = 0.112$ ,  $\mu\text{m}$

$$D_{p,cr} = \left[ \frac{9 \mu Bc}{\rho Ntc Vc (\rho_s - \rho)} \right]^{1/2} \dots \dots \dots 63$$

de la ecuación 63, despejamos  $\rho_s$ , teniendo que:

$$\rho_s = 6828.463 \text{ lb/ft}^3.$$

Diámetro de corte.

$$D_{pc} = \left[ \frac{9 \mu Bc}{\rho Ne Vc (\rho_s - \rho)} \right]^{1/2} \dots \dots \dots 64$$

donde:

Ne = Numero eficaz de vueltas que realiza la corriente de gas dentro del ciclón, tomamos este valor igual al de Ntc.

dando valores a la ecuación (64), nos queda:

$$D_{pc} = 0.112 \mu\text{m}$$

Eficiencia.

$$\eta = \frac{(D_p/D_{pc})^2}{1 + (D_p/D_{pc})^2} \dots\dots\dots 65$$

sustituyendo valores en la ecuación 65, tenemos:

$$\eta = \frac{(0.112/0.112)^2}{1 + (0.112/0.112)^2}$$

$$\eta = 50 \%$$

El material recolectado por este ciclón debe evacuarse cuando el contenedor de recolección de los polvos llegue al 80% y/o su nivel de exposición no mayor a 50 mR/h a contacto.

### 3.3 Lavador de gases (de rocío auto inducido)<sup>(4)</sup>.

Este equipo es empleado para bajar la concentración de contaminantes en los gases de combustión y su posterior liberación al ambiente.

En los lavadores de gases, el líquido se dispersa en la corriente de gas en forma de rocío y las gotas constituyen el principal recolector de las partículas sólidas. El gas fluye a alta velocidad a través del contactor, en el que se atomiza el líquido en una forma igual a la de un separador ciclónico de partículas. Sin embargo, el líquido se alimenta al contactor y después se recircula por gravedad de la sección del separador de arrastre, en vez de recircularse por medio de una bomba.

Perdida de carga<sup>(5)</sup>.

La pérdida de carga en este tipo de equipos es debida al contacto de los gases de combustión con el líquido empleado como lavador de gases, de acuerdo a la ecuación<sup>(15)</sup> (66) de la pérdida de presión en los lavadores de gases y conociendo que la literatura marca para este tipo de lavadores un rango de 7 a 8 plg c.a., tomamos un valor intermedio que es de 7.5 plg c.a. (1868.115 Pa).

$$\Delta p = \frac{1}{2} V_g^2 \rho_L (Q_L/Q_g) \dots\dots\dots 66$$

de esta ecuación no conocemos el flujo del líquido(Q<sub>L</sub>), despejando a este de la ecuación 66 nos queda que:

$$Q_L = \frac{\Delta p Q_g}{\frac{1}{2} V_g^2 \rho_L}$$

donde:

- $\Delta p$  = Pérdida de carga, kg/ms<sup>2</sup> (Pa).
- $V_g$  = Velocidad de los gases, m/s. (ver sección del extractor)
- $\rho_L$  = Densidad del líquido, kg/m<sup>3</sup>.
- $Q_g$  = Flujo de los gases, m<sup>3</sup>/s.
- $Q_L$  = Flujo del líquido, m<sup>3</sup>/s.

y sustituyendo:

- $\Delta p = 1868.115 \text{ kg/ms}^2$ .
- $V_g = 28.08 \text{ m/s}$ .
- $\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$ .
- $Q_g = 0.908 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$Q_L = \frac{(1868.115)(0.908)}{\frac{1}{2}(28.08)^2(1000)}$$

$$Q_L = 0.004 \text{ m}^3/\text{s}$$

este valor se utilizó en la ecuación empírica de Hesketh, en la cual incluye el área de contacto, donde esta área está definida por las dimensiones de la tubería ( $50.24 \text{ plg}^2 = 0.349 \text{ ft}^2 = 0.032 \text{ m}^2$ ).

$$\Delta p = 190 V_g^2 \rho_v A_c^{0.333} (Q_L/Q_g)^{0.78} \quad 67$$

teniendo:

$$A_c = 0.032 \text{ m}^2$$

$$\rho_v = 0.571 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta p = 190(28.08)^2(0.571)(0.032)^{0.333}(0.004/0.908)^{0.78}$$

$$\Delta p = 786.446 \text{ Pa.}$$

Tiempo de residencia.

El tiempo de residencia de los gases de combustión dentro del contenedor del lavado de gases se determina en base a la ecuación (68); pero se desconoce el área y la forma del contenedor; este contenedor se propone de forma pentágonal<sup>(5)</sup>, teniendo la función de provocar que los gases al estar en contacto con el líquido y se evaporan, los líquidos se condensan al tocar las paredes y desciendan hacia el depósito del líquido.

$$\varphi = \frac{V}{Q_g} \quad 68$$

donde:

$\varphi$  = Tiempo de residencia, s.

$V$  = Volumen del contenedor,  $\text{m}^3$ .

$Q_g$  = Flujo de los gases,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Tomando como base un tiempo de residencia de 4 seg. despejando la ecuación (68) tendremos un volumen de:

$$V = \varphi Q_g$$

$$V = 4 * 0.908$$

$$V = 3.632 \text{ m}^3.$$

Dimensiones del contenedor.

Teniendo el volumen del contenedor podemos calcular la longitud del mismo y ajustar el área del lavado de gases, por medio de la ecuación (69). Para estimar la longitud tomamos como referencia el cálculo de un cubo de lado  $h$ , por tanto  $h = 1.537 \text{ m}$ ; para facilitar la construcción del contenedor consideramos la longitud de 1 m de largo, teniendo:

$$V = A h \quad 69$$

$A$  = Área del contenedor,  $\text{m}^2$ .

$h$  = Altura del contenedor, m.

despejando el área:

$$A = 3.632 \text{ m}^2.$$

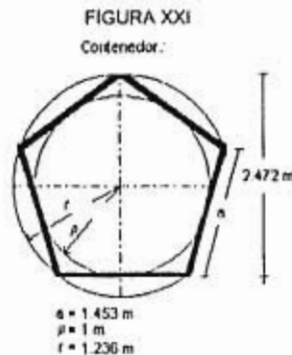
con la ecuación siguiente determinamos el radio del pentágono para poderlo construir, (figura XXI).

$$A = 5/8 r^2 (10 + 2(5)^{1/2})^{1/2} \quad \dots\dots\dots 70$$

donde:

$r$  = Radio del contenedor, m.  
sustituyendo el área:

$$r = 1.236 \text{ m.}$$



Área de contacto.

<sup>110)</sup>Para seguir manteniendo proporcionalidad en el sistema se tomó el área de la tubería como referencia para determinar el área de contacto, la cual tendrá la siguientes dimensiones:

$$A = a \cdot b \quad \dots\dots\dots 71$$

$A$  = Área de la tubería, m<sup>2</sup>.  
 $a$  = Largo del área de contacto, m.  
 $b$  = Altura del área de contacto, m.

despejando la altura, tomando el área para cada lado y dándole valores a la ecuación (71), tenemos, (figura XXII):

$$b = 0.032 \text{ m}$$

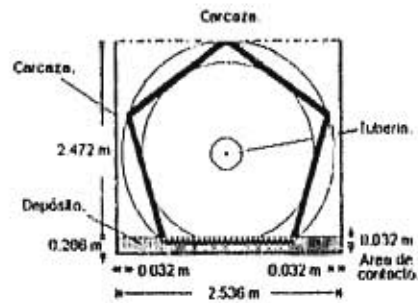
Depósito del líquido.

Tomando en cuenta que los gases estarán solamente 4 seg en el contenedor, se puede con esto determinar el volumen necesario del líquido; considerando que los gases tienen un flujo de 0.908 m<sup>3</sup>/s o sea que en 4 segundos tenemos 3.632 m<sup>3</sup> de gases, por recomendación<sup>110)</sup> el depósito tendrá el 20 % del volumen de los gases, por tanto que este será de 0.7264 m<sup>3</sup>; considerando la separación del contenedor con la carcasa exterior igual a la altura del área de contacto o sea de 0.032 m, con la finalidad de tener una pérdida de carga aproximadamente a cero en esa zona; por lo tanto la amplitud del contenedor será de 2.472 mas 0.032 por lado, por lo tanto será de 2.536 m donde se tendrá una altura del depósito de 0.285 m.

El nivel del líquido debe estar 0.032 m por la parte superior de la base del contenedor, este nivel se determina en base a los radios interno y externo del pentágono<sup>114)</sup>, como se muestra en la figura XXII.



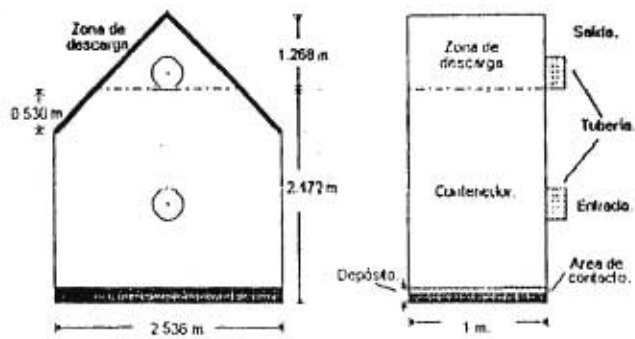
FIGURA XXII



Zona de descarga.

La zona de descarga se propone de la forma de un triángulo isósceles, para que el líquido contenido en los gases de salida, al estar en contacto con las paredes este se deposite en ellas y resbale hacia el depósito del líquido, por esta razón la tubería de descarga debe estar al centro de el triángulo; conociendo la amplitud del contenedor se tiene la base del triángulo de 1.768 m, la altura de este debe ser de 1.268 m, por lo tanto el área de la zona de descarga es de 1.608 m<sup>2</sup>, con un volumen para alojar a los gases de 1.608 m<sup>3</sup>, pero la tubería se debe instalar al la altura del pentágono, por lo que el área que no se utiliza del triángulo es de 0.872 m<sup>2</sup> por lo que el área real en esta zona es de 0.936 m<sup>2</sup> (figura XXIII).

FIGURA XXIII.



Líquido.

(7,8,9,13) La razón de la actividad evacuada al medio ambiente por la chimenea depende de los isótopos presentes. Anteriormente se mencionó que el  $^{129}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  y  $^{35}\text{S}$  son los gases radiactivos liberados comúnmente por la chimenea, se tomó en cuenta que el  $^{129}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  y  $^{35}\text{S}$  al estar a altas temperaturas y entran en contacto con una solución básica fría reaccionan formando moléculas de Yodo (I) sólidas y Yoduro de sodio (NaI) sólido y el azufre formará sulfatos, dispersándose en la solución básica; la reacción correspondiente al yodo y al azufre radiactivos puede mejorarse manteniendo el pH (acidez o basicidad de la solución) del líquido lavado en un valor comprendido entre 7.5 y 10.

Estos líquidos deben ser evacuados a contenedores para su posterior tratamiento, cuando su pH se menor a 7.4 y/o su nivel de exposición no mayor a 50 mR/h a contacto<sup>(11)</sup>.

### 3.4 Filtro.

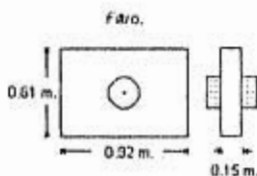
Los gases resultantes de las diferentes etapas de separación sólido-gas, no pueden ser liberados al ambiente puesto que existen residuos sólidos-humedos los cuales son resultado de las reacciones químicas en el lavador; para la eliminación de este tipo de residuos y completar la limpieza de los gases de combustión, deben pasar por un sistema de filtración<sup>(6)</sup> para poder ser liberados al medio ambiente<sup>(7)</sup>.

Este sistema de filtración debe tener ciertas características, puesto que debe trabajar a temperaturas promedio de 150 °C, un tamaño de partícula promedio de 0.112 µm, una caída de presión mínima y una alta eficiencia del tipo filtro HEPA.

(10,12,14,15) De acuerdo a investigaciones realizadas con materiales de filtración de alta eficiencia se seleccionó la fibra de vidrio (Glass paper).

La fibra de vidrio es plegado al rededor de espacios de aluminio corrugado y sellado con cemento contra incendio dentro de un armazón de acero. Estos armazones se instalan en paredes o paneles dándole una resistencia a temperaturas hasta los 500 °C. El modelo que se acopla a estas características es el H-2436A<sup>(12)</sup> con una dimensión de 0.61 x 0.92 x 0.15 m. La velocidad de trabajo es de 29.715 m<sup>3</sup>/min, con una pérdida de presión de 249.082 Pa y una eficiencia de 99.9995 % para un tamaño de partícula de 0.112 µm (figura XXIV).

FIGURA XXIV.



Este filtro debe ser desmontado para su posterior tratamiento, cuando su nivel de exposición sea no mayor a 50 mR/h a contacto<sup>(11)</sup> y/o la presión de extracción sea menor a los 249.082 Pa<sup>(12)</sup>.

### 3.5 Extractor<sup>(3)</sup>.

En el capítulo II se menciona uno de los requerimientos básicos que el Organismo Internacional de Energía Atómica sugiere y es que el incinerador opere con presiones menores a la atmosférica del sitio para minimizar los riesgos de fuga o dispersión de material radiactivo al medio ambiente.

Para cumplir con este requerimiento se necesita un extractor; para la extracción de humos y cenizas es común el uso de extractores de tipo centrífugo, tomándose este como opción.

Para conocer las características del extractor, debemos calcular tres puntos importantes:

- La velocidad del aire de salida en la chimenea.
- La velocidad de transporte de los gases.
- Las pérdidas de carga en el sistema.
- La velocidad del aire de salida en la chimenea.

La velocidad teórica del aire.

Esta velocidad teórica del aire (por tir natural), se calcula mediante la ecuación (72):

$$V_t = 4.48 \left( \frac{h (t_c - t_o)}{273 + t_o} \right)^{1/2} \quad 72$$

donde:

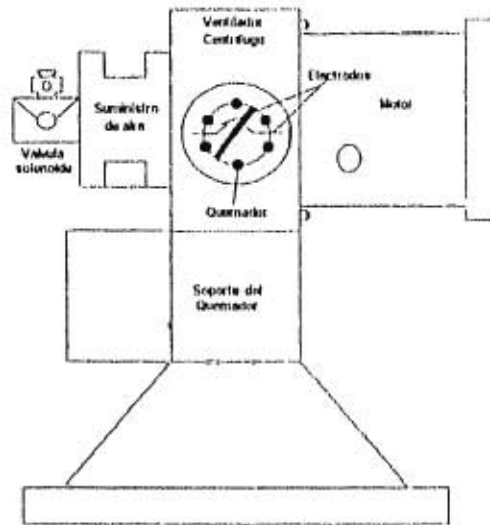
$V_t$  = Velocidad teórica del aire, m/s.  
 $h$  = Altura chimenea, m.  
 $t_c$  = Temperatura del gas caliente, °C.  
 $t_o$  = Temperatura del aire exterior, °C.

dando valores a (72):

$$V_t = 4.48 \left( \frac{3.15(1500 - 10)}{273 + 10} \right)^{1/2}$$
$$V_t = 18.25 \text{ m/s.}$$

En la selección del extractor debemos tener en cuenta la presencia de dos sopladores, estos sopladores (como se muestra en la figura XXV), nos proporcionan una velocidad del aire de 0.917 m/s y un caudal de 0.183 m<sup>3</sup>/s cada uno.

FIGURA XXV



Las características técnicas de los sopladores se muestran en la tabla siguiente:

Tipo	HP	Hz	R.P.M.	Volts	Q (m <sup>3</sup> /s)
Centrífugo	1/4	60	1725	127	0.183

Si los sopladores nos proporcionan una velocidad de 1.834 m/s, esta velocidad se la sumamos a la del transporte de los gases, obteniendo a la salida de la chimenea una velocidad de:

$$V_{sg} = V_s + V_t \quad \dots \dots \dots 73$$

donde:

$V_{sg}$  = Velocidad de salida en la chimenea, m/s.  
 $V_s$  = Velocidad de los sopladores, m/s.

$$V_{sg} = 1.834 + 18.25$$

$$V_{sg} = 20.08 \text{ m/s}$$

de acuerdo al área de la salida de la chimenea (60.84m<sup>2</sup>), y a la ecuación (74) se tiene:

$$Q = Ach V_{sg} \quad \dots \dots \dots 74$$

donde:

Q = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s.  
 Ach = Área de la chimenea, m<sup>2</sup>.

$$Q_{sg} = 60.84(20.08)$$

$$Q_{sg} = 1221.67 \text{ m}^3/\text{s}$$

- La velocidad de transporte de los gases.

Para la extracción de los gases de combustión, se debe considerar; las partículas sólidas suspendidas en ellos y su velocidad de transporte; la velocidad depende del tamaño y densidad de las partículas, conociendo su velocidad de ascenso vertical y su velocidad de transporte horizontal, se puede determinar esta velocidad de transporte ; influyendo esto en el aumento de la pérdida total de carga en los accesorios.

Por medio de la ecuación (75) se determina la velocidad de transporte de los gases.

$$V_{T0} = V_{av} + V_{th} \dots\dots\dots 75$$

$V_{T0}$  = Velocidad de transporte de los gases, m/s.

Velocidad de ascenso vertical, sustituyendo valores en la ecuación (76), tenemos:

$$V_{av} = 10.7 \frac{\rho}{\rho + 1} (dp)^{0.57} \dots\dots\dots 76$$

donde:

- $V_{av}$  = Velocidad ascenso vertical, m/s.
- $\rho$  = Densidad de los gases, kg/m<sup>3</sup>.
- $dp$  = Diámetro promedio de la partícula mayor,  $\mu\text{m}$ .

dando valores a (76), tenemos:

$$\rho = 0.571, \text{ kg/m}^3$$

$$dp = 0.112, \mu\text{m}$$

$$V_{av} = 10.7 \frac{0.571}{0.571 + 1} (0.112)^{0.57}$$

$$V_{av} = 1.117, \text{ m/s}$$

Velocidad de transporte horizontal , sustituyendo valores en la ecuación (77), tenemos:

$$V_{th} = 8.4 \frac{\rho}{\rho + 1} dp^{0.40} \dots\dots\dots 77$$

sustituyendo a (77), tenemos:

$$V_{th} = 8.4 \frac{0.571}{0.571 + 1} (0.112)^{0.40}$$

$$V_{th} = 1.272 \text{ m/s}$$

De acuerdo a la ecuación (75) la velocidad de transporte de los gases será:

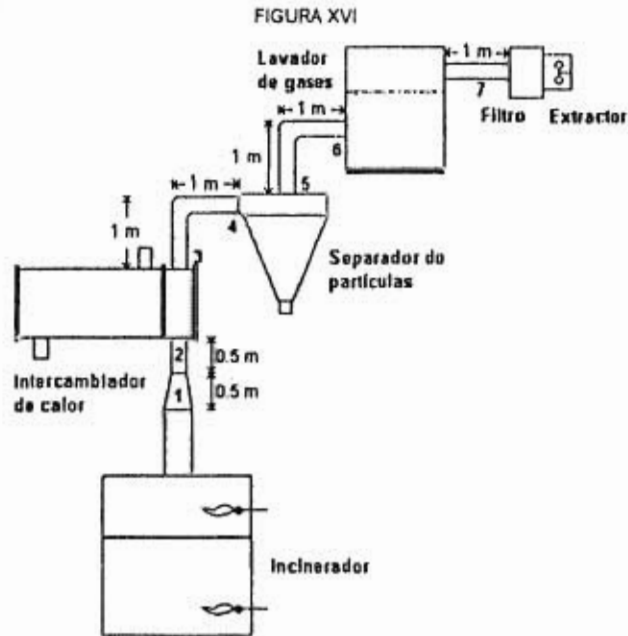
$$V_{T0} = V_{av} + V_{th}$$

$$V_{T0} = 1.117 + 1.272$$

$$V_{T0} = 2.389 \text{ m/s}$$

• Las pérdidas de carga en el sistema.

Las pérdidas de carga en el sistema de purificación de los gases son debidas a las pérdidas por fricción a lo largo de este; mostradas en la figura XVI.



La pérdida de carga en el sistema, la determinamos por medio de la ecuación (78):

$$H = H_1 + H_2 + H_3 \dots\dots\dots 78$$

- H = Pérdida de carga en el sistema, mm c.a.
- H<sub>1</sub> = Pérdida de carga debida a la fricción, mm c.a.
- H<sub>2</sub> = Pérdida de carga debida a los accesorios, mm c.a.
- H<sub>3</sub> = Pérdida de carga debida a los equpos, mm c.a.

Pérdida de carga debida a fricción (H<sub>1</sub>).

De la ecuación (79) se determina la pérdida de carga debida a fricción.

$$H_1 = f \frac{2 Vsg^2}{g D} L \dots\dots\dots 79$$

donde:

- H<sub>f</sub> = Pérdida de carga debida a fricción, mm c.a.
- L = Longitud de la conducción, m
- D = Diámetro de conducción circular, m
- g = Aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>.
- f = Factor de rozamiento.

la chimenea tiene una conducción rectangular, por lo tanto se necesitan calcular un diámetro equivalente "De" por medio de la ecuación(80):

$$De = 1,285 \frac{(ab)^3}{(a+b)} \quad \dots \dots \dots \quad 80$$

- De = Diámetro equivalente, m
- a, b = Lados sección rectangular conducción, m.

de (80), tenemos:

a = 0,78 m  
b = 0,78 m

$$De = 1,265 \frac{((0,78)(0,78))^3}{(0,78 + 0,78)}$$

De = 0,183 m, para fines prácticos de cálculo tomaremos el diámetro de 0,203 m (8 plg) aproximadamente.

Para poder determinar el factor de fricción necesitamos saber si los gases tienen un régimen laminar o turbulento de (80) calculando el Número de Reynolds.

$$Re = \frac{Vsg De \rho}{\mu} \quad \dots \dots \dots \quad 81$$

donde:

- Re = Número de Reynolds.
- ρ = Densidad de los gases, kg/m<sup>3</sup>.
- μ = Viscosidad de los gases, kg/ms.

- Vsg = 20,08 m/s.
- De = 0,203 m.
- ρ = 0,571 kg/m<sup>3</sup>.
- μ = 2,8996 kg/ms.

$$NRe = \frac{20,08(0,203)(0,571)}{2,8996}$$

NRe = 80,243.257 ~ Régimen turbulento.

El factor de fricción (f) para régimen turbulento se determina con la ecuación (82):

$$f = 0,0576Re^{-1,5} \quad \dots \dots \dots \quad 82$$

donde:

$$f = 0.006$$

por lo tanto de (79) nos queda:

$$H_1 = 0.006 \frac{2(20.08)^2}{(9.81)(0.203)} \quad (5.5)$$

$$H_1 = 13.363 \text{ mm c.a.} = 131.048 \text{ Pa.}$$

**Pérdida de carga debida a los accesorios ( $H_2$ ).**

La pérdida de carga en los accesorios se determina realizando la suma de las pérdidas en cada uno de ellos, para esto nos apoyaremos en la ecuación (83) y en la figura XXVI, la cual nos muestra el sistema completo de extracción (enfriamiento, separación, lavado y filtración).

$$H_2 = \Sigma F \frac{V_{sg}^2 \rho}{2g} \quad \dots \quad 83$$

donde:

$H_2$  = Pérdida de carga debida a los accesorios, mm c.a.

$F$  = Coeficiente de resistencia.

se necesita determinar el coeficiente de resistencia el cual esta dado por la tabla de coeficiente de resistencia (pag. X.11)<sup>21</sup>; cada una de las pérdidas de los accesorios tienen un valor de :

Secciones:

$$1-2 = 0.35$$

$$3-4 = 0.5$$

$$5-6 = 0.5$$

$$F = 0.35 + 0.5 + 0.5$$

$$F = 1.35$$

de la ecuación (83), se tiene:

$$H_2 = 1.35 \frac{(20.08)^2 \cdot 0.571}{2(9.81)}$$

$$H_2 = 15.842 \text{ mm c.a.} = 155.354 \text{ Pa.}$$

**Pérdida de carga debida a los equipos ( $H_3$ ).**

Los valores de las pérdidas en los equipos los tomamos de los cálculos anteriores, por lo que tendremos en las secciones:

Equipos:

1	Intercambiador de calor	4.625 Pa.
1	Separador ciclónico de partículas	5.024 Pa.
1	Lavadores de gases	786.446 Pa.
1	Filtro	249.080 Pa.

$$H_3 = 4.625 + 5.024 + 786.446 + 249.08$$

$$H_3 = 1,045.175 \text{ Pa.}$$



sustituyendo valores en la ecuación (78), tenemos:

$$\begin{aligned}H_1 &= 131.048 \text{ Pa.} \\H_2 &= 155.354 \text{ Pa.} \\H_3 &= 1,045.175 \text{ Pa.} \\H &= 1,331.577 \text{ Pa.}\end{aligned}$$

Potencia del extractor.

Para poder determinar la potencia hidráulica del extractor se debe tomar en cuenta todos y cada uno de los factores que influyen en las pérdidas de carga en el sistema.

Tenemos:

$$\begin{aligned}\text{Velocidad de salida en la chimenea} &= 20.08 \text{ m/s} \\ \text{Velocidad de transporte de los gases} &= 3.87 \text{ m/s} \\ \text{Pérdida de carga en el sistema} &= 1,331.577 \text{ Pa.}\end{aligned}$$

la velocidad final de los gases de combustión se determina con la ecuación (84), considerando una tubería de diámetro igual a 0.203 m ( 8 plg), una distancia entre cada equipo de 1 m y una área de 0.032 m<sup>2</sup>.

$$V = V_{sg} - V_{Tg} \dots\dots\dots 84$$

$$V = 20.08 - 3.87$$

$$V = 16.21 \text{ m/s}$$

con un caudal de:

$$Q = (0.032)(16.21) = 0.525 \text{ m}^3/\text{s.}$$

Conociendo las pérdidas de carga en el sistema, la velocidad de los gases y su caudal, podemos calcular la potencia requerida por el extractor mediante la ecuación (85).

$$P_E = \frac{Q H}{75 \eta} \dots\dots\dots 85$$

donde:

- P<sub>E</sub> = Potencia del extractor, CV
- Q = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s
- H = Caída de presión total en el sistema, mm c.d.a.
- η = Rendimiento (entre 0.4 y 0.5)

dando valores a (85):

$$\begin{aligned}Q &= 0.525 \text{ m}^3/\text{s.} \\H &= 1,331.577 \text{ Pa} = 135.782 \text{ mm c.d.a.}\end{aligned}$$

$$P_E = \frac{(0.525)(135.782)}{75 (0.5)}$$

$$P_E = 1.901 \text{ CV} = 1.876 \text{ HP} \sim 2 \text{ HP}$$

Para poder extraer los gases de manera constante se requiere un extractor con una potencia de 2 HP; considerando un factor de protección del 50% se requerirá un extractor de 3 HP para una pérdida de carga de 2,000 Pa.

Este extractor y los demás equipos deben ser desmontados para su posterior tratamiento, cuando sus niveles de exposición sean no mayores a 50 mR/h a contacto<sup>(11)</sup> y/o la presión de extracción sea igual a la calculada de 1,332 Pa aproximadamente<sup>(12)</sup>.

### **3.6 Monitor de gases con material radiactivo.**

De acuerdo a los equipos existentes de monitoreo de gases con materiales radiactivos se seleccionó el BAI 9850-171, el cual consiste en un sistema de detección de Yodo y un sistema de detección de gases nobles.

1. Este equipo aspira los gases pasándolos a través de un filtro donde las partículas son atrapadas.
2. Los gases aspirados pasan por un carlucho de carbón activado donde la mayoría del Yodo es atrapado.
3. Finalmente, los gases restantes pasan a través del monitor de gases nobles

Al finalizar este proceso el detector nos muestra la actividad resultante de cada isótopo radiactivo en los gases y de esta manera se monitorea y controla la emisión de material radiactivo al ambiente.

## CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### IV.1 Conclusiones:

El material refractario calculado para las temperaturas de operación recomendadas para la incineración de los desechos radiactivos y su forma de instalación, son partes determinantes para la vida útil del incinerador.

Teóricamente al incinerar los desechos radiactivos de bajo nivel obtendremos una reducción del 11% del volumen original.

De acuerdo a que el Departamento de Desechos Radiactivos recibe  $1 \text{ m}^3$  (aproximadamente 5 bidones) de desechos sólidos al mes, el incinerador debe operar (teóricamente) un promedio de 10 horas en el mes, incinerando  $1 \text{ m}^3$  resolviendo así el problema del aumento indiscriminado del volumen y peso de los desechos radiactivos en los almacenes provistos para este fin.

Teóricamente los equipos periféricos calculados para la limpieza de los gases de combustión, se apegan a los requerimientos internacionales establecidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), para reducir al mínimo las emisiones de materiales contaminantes al medio ambiente.

Las emisiones de materiales radiactivos liberados al medio ambiente y los que son inmovilizados; de acuerdo a los reglamentos nacionales e internacionales de seguridad radiológica generalmente son menores a los establecidos por estos, ya que por el tiempo de vida media de los radioisótopos manejados y al balance de material radiactivos resultante en los gases, son prácticamente nulos.

El Departamento de Desechos Radiactivos se vería ampliamente beneficiado si el proceso de incineración que se diseñó en este trabajo se estableciera y se llevara a la práctica, ya que antes de éste no se cuenta con un tratamiento eficiente de desechos radiactivos sólidos de bajo y medio nivel; ya que actualmente estos desechos solo se compactan en bidones de 200 litros y se almacenan.

Con el proceso de incineración se conseguiría diversificar lo que se conoce como la Gestión de Desechos Radiactivos en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, específicamente en las partes de tratamiento y disposición de estos desechos, tomando en cuenta la protección del medio ambiente al considerar la reducción de material radiactivo descargado a éste.

## ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

### IV.ii Recomendaciones.

Debe hacerse una selección precisa de los desechos, de acuerdo a su isótopo, para poder inmovilizar las cenizas de acuerdo a éste y no tener una mezcla de diferentes isótopos ya que cada uno de éstos tiene un tiempo de decaimiento diferente.

Solo deben introducirse desechos radiactivos de bajo nivel, no deben introducirse desechos que no hayan estado en contacto con materiales radiactivos, para evitar trabajos innecesarios del incinerador y por las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica.

Evitar cambios bruscos de temperatura dentro de las cámaras de incineración, para evitar el deterioro del material refractario y consecuentemente aumentar su vida útil.

Recolectar las cenizas al término de la jornada de trabajo, humedecéndolas para crear una masa y evitar que éstas se liberen al ambiente, posteriormente mandarlas al proceso de inmovilización y disposición que corresponda.

Instalar un sistema de monitoreo de temperaturas para conocer si se está trabajando efectivamente en los rangos deseados a lo largo del proceso y evitar un sobrecalentamiento y deterioro de los equipos.

Monitoreo constante de los niveles de exposición no sean mayores a los 50 mR/h dentro del edificio del incinerador.

Aplicar en todo momento el principio ALARA, que cuando uno este en contacto con material radiactivo se manejen los niveles de exposición tan bajos como razonablemente sea posible.

**APÉNDICE.**

**A. Características técnicas.**



# REFRACTARIOS GREEN, S.A. de C.V.

8905.

sumin. y 0807

## DATOS DE PRUEBA DE LABORATORIO

Estos son resultado promedio de control y están sujetos a normas normales en pruebas individuales. Estos resultados no ser tomados como requerimientos máximos o mínimos para propósitos de especificación.

### LADRILLO REFRACTARIO 42-M

ALAMO.

Temperatura al Cono Pirométrico Orton C-3 (ASTM-C-24)		33 - 34
Temperatura de calentamiento		1745 - 1760°C 3173 - 3200°F
Desviación lineal permanente C-79 (ASTM-C-113)	1600°C %	1.00 - 0.5E
Comacción bajo carga C-20 (ASTM-C-16)	1450°C %	2 - 4
Pérdida de disgregación C-25 (ASTM-C-122)	1650°C %	0.5 - 3.0
Porosidad aparente C-24 (ASTM-C-20)	%	14 - 18
Fuerza de ruptura C-15 (ASTM-C-133)	kg/cm <sup>2</sup> lb/pulg <sup>2</sup>	70 - 112 1000 - 1600
Resistencia en plano C-15 (ASTM-C-133)	kg/cm <sup>2</sup> lb/pulg <sup>2</sup>	267 - 352 3800 - 5000
Densidad C-24 (ASTM-C-20)	g/cm <sup>3</sup>	2.25 - 2.35
Análisis químico: C-27 (ASTM-C-57)		
Sílice	SiO <sub>2</sub>	51.0 - 54.0 %
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42.0 - 45.0 %
Oxido de Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 - 1.0 %
Oxido de Calcio	CaO	0.0 - 0.5 %
Oxido de Magnesio	MgO	0.0 - 0.5 %
Oxido de Titanio	TiO <sub>2</sub>	0.5 - 1.0 %
Alcalis	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0.5 - 1.0 %



REFRACTARIOS GREEN, S.A. DE C.V.



R.P. GREEN

DATOS DE PRUEBA DE LABORATORIO

9008/9308

Estos datos son resultado promedio de pruebas de control y están sujetos a variaciones normales en pruebas individuales. Estos resultados no pueden ser tomados como requerimientos máximos o mínimos para propósitos de especificación.

MORTERO No. 36  
HUMEDO DE FRAGUADO AL AIRE

Temperatura máxima recomendada	1760°C - 3200°F
Temperatura a la cual se desarrolla su fraguado	Temperatura ambiente
Cantidad necesaria para colocar 1000 ladrillos rectangulares de 229x114x64 mm en pared de 229 mm (9") (kg).	170 - 210
Agua necesaria para usarlo Lts. por 100 Kgs. con cuchara de albañil	0 - 1
Inmersión del ladrillo	4 - 5
Refractabilidad NOM-0-41 (ASTM-C-199)	1600°C No reblandecimiento o escurrimiento
Módulo de ruptura Los extremos de los ladrillos pegados con mortero de consistencia para usarse con cuchara de albañil NOM-0-22 (ASTM-C-198)	Kg/cm <sup>2</sup> lb/pulg <sup>2</sup>
Secado a :                      105°C (220°F)	43 - 63      600 - 900
Queimado a :                    1370°C (1500°F)	56 - 84      800 - 1200
Retención de agua según boletín técnico de la American Refractories Institute No. 60	Más de 10 minutos



REFRACTARIOS GREEN, S.A. DE C.V.



...2

MORTERO No. 36

Tamaño de las partículas  
NOM-0-32 (ASTM-C-92)  
Retenido en malla 20  
Retenido en malla 35

0.5 % máximo  
5.0 % Máximo

Análisis Químico  
NOM-0-27 (ASTM-C-513)

Sílice	$SiO_2$	23 - 26 %
Alúmina	$Al_2O_3$	63 - 67 %



## CONCRETOS CONVENCIONALES, BAJO Y ULTRABAJO CEMENTO.

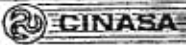
	TEMP. MAX DE OPERACION	% H <sub>2</sub> O	KG/M <sup>3</sup>	MOR KG/CM <sup>2</sup>			CCS KG/CM <sup>2</sup>			CLP %			POROSIDAD %	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% SiO <sub>2</sub>	% ALCALIS CaO	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% OTROS
				170 °C	816 °C	1370 °C	110 °C	816 °C	1350 °C	110 °C	816 °C	1350 °C						
<b>BASE ARCILLA</b>																		
MOLDIT D	1320	10-13	2.020	68	30	24	282	155	-	-	-0.1	-125	25	39.7	36.9	13.3	7.7	BALANCE
MOLDIT HT	1590	10-12	2.080	74	49.2	66	150	110	-	-	-0.2	0.00	25	48.5	43.2	6.0	0.9	BALANCE
AR-153	1290	10-12	2.160	116	91	162	590	440	540	-	-0.2	-2.0	18	56.9	34.5	6.5	0.6	BALANCE
<b>ALUMINA SILICA</b>																		
AR-400	1320	9-10	2.720	130	112	160	830	870	-	-	+0.3	-	17	62.0	7.2	6.3	0.5	23.2 (
<b>ALTA ALUMINA</b>																		
SUPER CASTABLE 32. Y/O	1650	10-12	2.160	47	34	122	168	158	263	-	-0.2	+1.0	16	57.8	35.6	2.9	0.8	BALANCE
CINACAST ES	1371	11-12	2.200	100	60	150	-	-	-	-	-	-0.03	-	65.6	1.0	6.7	1.0	BALANCE
CINACAST 80	1700	10-12	2.550	40	-	85	360	-	400	-	-	-0.3	25	82.0	5.1	6.0	1.5	BALANCE
CINAX AL 66	1815	8.0-9.6	2.725	100	80	200	230	160	300	-	-0.1	-0.2	16	96.0	0.1	3.0	0.1	BALANCE
CINAX AL 66-A	1815	7.0-8.5	2.804	110	75	200	747	420	750	-	-0.1	-0.3	15	91.9	1.9	4.2	0.6	BALANCE
CINAX AL 94	1815	8.0-10	2.700	70	50	120	320	280	800	-	-0.2	-0.3	16	84.0	1.9	4.0	0.5	BALANCE
<b>ESPECIALES</b>																		
REF-SiC 11 LI	1482	9.0-11	2.323	40	70	110	80	140	220	-	-0.2	-0.3	-	12.0	1.5	2.9	0.5	82.5 (
<b>CONCRETOS AISLANTES</b>																		
LITE WATE 58 LI	1175	34.0	918	15	10.1	20	69	45	40	-	-0.3	-	48.0	48.0	33.7	14.3	1.0	BALANCE
LITE WATE 70	1260	31.2	1.250	24.6	14	-	112	42	-	-	-0.4	-	-	33.6	41.6	12.4	7.2	BALANCE
LITE WATE 80	1370	32.5	1.330	27	25	27	84	70	50	-	-0.1	-0.7	-	43.8	39.1	11.9	2.4	BALANCE
LITE WATE 80 ES	1370	34.7	1.315	27	61	-	67	61	-	-	-0.1	-0.7	-	46.7	36.0	12.1	2.0	BALANCE
CERLITE 75	1510	27.7	1.282	53	49	-	175	159	-	-	-0.1	-0.1	-	50.7	41.0	4.4	1.0	BALANCE
LINS 50	1250	35.7	800	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	69.4	19.0	8.4	0.5	BALANCE
<b>BAJO Y ULTRABAJO CEMENTO</b>																		
CRITERION 50	1538	5.0-5.8	2.450	111	143	179	484	725	742	-	0.00	-0.20	16.3	51.0	44.0	1.9	0.8	BALANCE
CRITERION 60	1650	4.8-6.0	2.540	143	187	291	638	682	809	-	-0.13	-0.23	16.1	59.5	35.4	1.7	1.1	BALANCE
CRITERION 70	1760	4.8-6.0	2.620	136	183	256	449	485	700	-	-0.18	-0.08	16.7	70.0	24.6	1.7	1.2	BALANCE
CRITERION 92 C	1870	4.5-5.5	3.200	72.3	55	115	440	310	700	-	-0.01	-0.07	18.3	92.4	0.07	1.7	-	5.0 (
CRITERION 98	1760	4.2-5.2	3.200	128	108	150	373	530	630	-	0.00	-0.1	15.0	97.8	Tr	1.7	Tr	BALANCE
CRITERION 60 XL	1650	4.0-5.0	2.620	52	96	254	236	397	1100	-	+0.04	+0.21	15.7	61.3	35.0	0.6	1.0	BALANCE
CRITERION 70 XL	1750	4.0-5.0	2.700	63	91	302	295	323	843	-	-0.3	-0.02	18.0	68.3	27.0	0.7	1.2	BALANCE
CRITERION 80 XL	1760	4.0-5.0	2.850	100	85	200	750	642	1000	-	-0.01	-0.02	15.0	80.3	14.5	0.6	1.6	BALANCE
NCM S25	1750	4.5-5.8	2.85	30	-	30	170	-	200	-	-	-0.15	20.0	70.0	3.5	0.4	0.1	20.3 (

① ZrO<sub>2</sub>

② SiC

③ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## MORTEROS.

 <small>SA NACIONAL DE ARMAZÓN, S. A. DE C. V.</small>	TEMP. MAX. DE OPERACION	TEMP. MINIMA VITRIFICADA	TIPO LIGA	% SiC	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% SiO <sub>2</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% OTROS	MATERIAL REQ POR 1000 TABIQUES EQ. 9"	ENVASE	
										B	C
<b>REF-SIC</b>											
REF-SIC 4	1750	1343	H	85.0	3.7	8.2	0.8	BAL	150-180 KG.	B	40 KG.
REF-SIC 4-A	1600	25	A	75.0	6.0	14.5	0.9	BAL	150-180 KG.	B	40 KG.
REF-SIC 4-S	1600	25	A	85.0	2.8	9.0	0.7	BAL	150-180 KG.	B	40 KG.
REF-SIC 6	1600	982	H	84.0	3.6	9.0	0.8	BAL	150-180 KG.	B	40 KG.
REF-SIC 34 45	1600	316	C	95.0	-	-	-	BAL	150-180 KG.	B	40 KG.
<b>MULLITA</b>											
REF-MULL 36	1750	1204	H	-	70.0	28.0	0.3	BAL	150-180 KG.	B	40 KG.
REF-MULL 3463	1790	1232	H	-	89.5	9.5	0.2	BAL	150-180 KG.	B	40 KG.
<b>ALUMINA SILICA</b>											
CINAFIRE 1	1650	25	A	-	42.0	51.0	1	BAL	130-160 KG.	C	35 KG.
CINAFIRE 1-D	1650	25	A	-	43.4	51.4	0.9	BAL	130-160 KG.	B	40 KG.
CINASET	1500	25	A	-	-	-	-	-	130-150 KG.	C	35 KG.
CINAX AL 17	1800	1204	H	-	89.5	6.8	0.3	BAL	180-200 KG.	B	40
CINAX AL 17-A	1350	677	H	-	84.0	7.6	0.3	BAL	180-200 KG.	B	40
CINAX AL 17-S	1750	25	A	-	85.5	10.0	0.2	BAL	180-200 KG.	B	40
CINAX AL 66 XF.	1800	25	HI	-	95.0	-	-	BAL	180-200 KG.	B	40 KG.
MORTERO HMS	1750	25	H	-	90.3	4.8	0.13	BAL	180-200 KG.	B	40 KG.
CINACAST Cr.	1750	25	A	-	80.0	12.0	0.3	22 U	200-220 KG.	C	35 KG.
<b>PREMIER</b>											
SUPER 3000	1680	25	A	-	52.2	44.0	0.2	-	130-160 KG.	C	35 KG.
SUREBOND 70	1700	25	A	-	71.4	22.9	0.8	-	130-160 KG.	B	40 KG.
SUREBOND 85 P *	1750	25	C	-	81.1	10.0	0.4	-	130-160 KG.	B	40 KG.
SUREBOND ER.	1870	25	C	-	81.6	2.5	-	10.4 U	200-230 KG.	C	35 KG.
SUREBOND 88 SC.	1400	350	H	88.0	2.7	5.0	0.5	BAL	150-180 KG.	B	40 KG.

① CROS.

### TIPO DE LIGA.

A FRAGUADO AL AIRE  
 H FRAGUADO EN CALIENTE.  
 C QUIMICO  
 HI HIDRAULICO.

### ENVASE:

B BOLSA  
 C CUBETA

## BIBLIOGRAFÍA.

### CAPITULO I.

1. Reglamento Interno de Seguridad Radiológica.  
Revisión 2. Centro Nuclear, (Febrero de 1993). ININ.
2. IAEA-TECDOC-354/S.  
Glosario OIEA sobre Términos de Almacenamiento de Combustible Gastado.  
Documento técnico publicado por el Organismo Internacional de Energía Atómica.  
VIENNA. (1988).
3. Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.  
Reglamento General de Seguridad Radiológica.  
Publicado en el DF (22 de Nov. de 1988).
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Technical Reports Series, No. 370.  
VIENNA. (1994).
5. Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs.  
La Gestion des Déchets Radioactifs.  
ANDRA. (1991).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Technical Reports Series, No. 350.  
VIENNA. (1993).
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Technical Reports Series, No. 230.  
VIENNA. (1983).
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Technical Reports Series, No. 204.  
VIENNA. (1989).
9. K.W. Carley-Mcauly, et. al., Harwood  
Advanced Management Methods for Medium Active Liquid Waste.  
Acad., Publishers.  
EUR 7037, 1981
10. American Machine & Foundry Company.  
AMF, ATOMICS "Ray-Di-Pak waste concentrates model 504"  
York, Pennsylvania. USA.
11. Emeterio H. Miguel.  
Puesta en Marcha del Evaporador Ray-Di-Pak.  
Centro Nuclear de México, Dirección de Servicios Técnicos.  
Gerencia de Seguridad Radiológica, DDR.  
(Octubre, 1993).
12. M. Freeman Harry.  
Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal.  
Mc Graw-Hill Book Company  
Vol. 1 y 2. (1988).

13. Metcalf & Eddy.  
Wastewater Engineering, Treatment Disposal Reuse  
Mc Graw-Hill International Editions.  
3a. Edición. (1991).
14. Baehr W.  
Management of Radioactive Wastes with Regard to Radioisotope Application.  
Karlsruhe Nuclear Research Center.  
Interregional Training Course.  
IAEA, (1989).
15. Dietrich M.J., Randall T.L. and Canney P.J.  
Environmental Progress.  
Vol.4 No. 3  
August, (1985).
16. Radiological Health Handbook.  
Bureau of Radiological Health, US Department of Health,  
Education and Welfare, Rockville, Maryland.  
Food and Drug Administration.  
Enero, (1970).
17. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Technical Reports Series, No. 307.  
VIENNA, (1989).
18. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Technical Reports Series, No. 183.  
VIENNA. (1992).
19. Robert E. Berlin, Catherine C. Stanton.  
Radioactive Waste Management.  
John Wiley & Sons.  
New York, USA.
20. Norma NOM-004-NUCL-1994. "Clasificación de los Desechos Radiactivos"
21. ALARA "As Low As is Reasonable Achievable",  
Tan bajo como razonablemente pueda alcanzarse.  
POE, Personal Ocupacionalmente Expuesto.  
Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.  
Reglamento General de Seguridad Radiológica.  
Publicado en el DF ( 22 de Nov. de 1988).
22. IF.DR-01 "Informe de Seguridad de la Planta de Tratamiento de Desechos Radiactivos".  
Revisión 1. ININ.  
(Febrero, 1996).
23. ID.CAD-01 "Informe de Seguridad del Centro de Almacenamiento de Desechos  
Radiactivos". Revisión 1. ININ.  
(Octubre, 1995).

## CAPITULO II.

1. Robert E. Berlin, Catherine C. Stanton.  
Radioactive Waste Management.  
John Wiley & Sons,  
New York, USA. (1990).
2. Brunner, Calvin R.  
Incineration Systems  
Nostrand Rehynd  
USA. (1989).
3. Walter R Niessen.  
Combustion and Incineration Processes,  
Marcel Dekker, INC.  
U.S.A. (1978).
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Technical Reports Series, No. 294.  
VIENNA. (1989).
5. NORTON, F. H.  
Refractorios,  
Mc Graw-Hill,  
New York, U.S.A. (1986).
6. René Hiller.  
Guía Práctica de Albañilería.  
EVERGRÁFICAS, S. L.  
ESPAÑA. (1995).
7. Edward N. Thompson, William H. Cockler  
Introducción a la Ingeniería Química.  
Latinoamericana S.A.  
BOGOTÁ, COLOMBIA. (1979).
8. HEALTH PHYSICS, OFFICIAL JOURNAL OF THE HELATH PHYSICS SOCIETY  
The fate of Radioactive Materials Burnt in an Institutional Incinerator,  
May 1973, Volume 24, Number 5.  
Solubility of Radionuclides in Ash from the Incineration of Animals,  
Volume 49, Number 6, (December 1985).
9. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Safety Series, No. 108.  
VIENNA. 1992.

## CAPITULO III.

1. Donald Q. Kern  
Process Heat Transfer  
International Student Edition  
Kogakusha Company, LTD. (1950).

2. Jorge A. Herrera Figueroa  
Curso de Diseño de Equipos,  
I.P.N., México, D.F. (1980).
3. Jhon Porges, Fred Porges.  
Prontuario de Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado.  
Marcombo,  
Barcelona, ESPAÑA.
4. Jhon H. Perry.  
Chemical Engineers Handbook,  
Mc Graw-Hill, Fourth Edition,  
U.S.A.
5. Manual de Fórmulas Técnicas  
Kurt Gleck, 18a Edición,  
Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. México
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Safety Series, No. 108.  
VIENNA, 1992.
7. HEALTH PHYSICS, OFFICIAL JOURNAL OF THE HELATH PHYSICS SOCIETY  
Solubility of Radionuclides in Ash form the Incinerator of Animals,  
Volume 49, Number 6, (December 1985).
8. HEALTH PHYSICS, OFFICIAL JOURNAL OF THE HELATH PHYSICS SOCIETY  
The fate of Radioactive Materials Burnt in an Institutional Incinerator,  
Volume 24, Number 5, (May 1973).
9. Colección de Seguridad.  
Tratamiento y evacuación de desechos radiactivos producidos por los usuarios de  
radioisótopos, Numero 12,  
Organismo Internacional de Energía Atómica.  
VIENNA, (1966).
10. Colección de Seguridad.  
The Management of Radioactive Wastes Produced by Radioisotope Users, Number 19,  
International Atomic Energy Agency  
VIENNA, (1966).
11. Licencia de Operación de la Planta de Tratamiento de Desechos Radiactivos, Instituto  
Nacional de Investigaciones Nucleares. Num: A00.200/604/96, Exp. 1604,  
Fecha de expedición: 21 de Agosto de 1996,  
Fecha de vencimiento: 21 de Agosto de 1998.  
Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, México.
12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Technical Reports Series, No. 302.  
VIENNA, (1989).
13. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.  
Technical Reports Series, No. 106.  
VIENNA, (1989).

14. HEALTH PHYSICS, OFFICIAL JOURNAL OF THE HELATH PHYSICS SOCIETY  
Evaluation of a Small, Inexpensive Incinerator for Institutional Radioactive Waste,  
Volume 44, Number 6, June. (1983).
15. HEALTH PHYSICS, OFFICIAL JOURNAL OF THE HELATH PHYSICS SOCIETY  
Measurements of Effluent Radioactivity During the Incineration os Carcasses Containing  
Radioactive Microspheres,  
Volume 48, Number 3, March. (1985).
16. Introduction to Industrial Gas Cleaning,  
F. A. L. Dullien,  
ACADEMIC PRESS, INC  
San Diego, California. U. S. A. (1989).
17. Muestrario de Filtros,  
División Filtros de Aire, Industrial Teletecnik S.A. de C.V.,  
México. (1995).
18. José Roldan Vitoria.  
Neumática, Hidráulica y Electricidad Aplicada. Física aplicada. Otros fluidos.  
Tercera Edición. Paraninfo.  
Madrid, ESPAÑA. (1993).