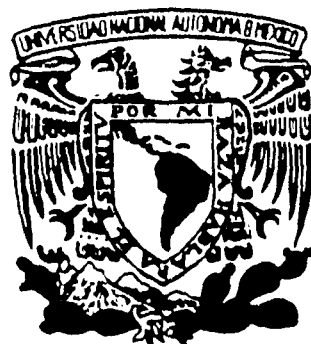


15

28

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



TESIS: *LA INCINERACION DE RESIDUOS INDUSTRIALES
ORGANICOS EN HORNOS DE CEMENTO*

QUE PRESENTA

JOSE RAMON ARDAVIN ITUARTE

PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

México, D.F.

1995



FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE Ing. Eduardo Rojo y de Regil

VOCAL Ing. José Francisco Guerra Recasens

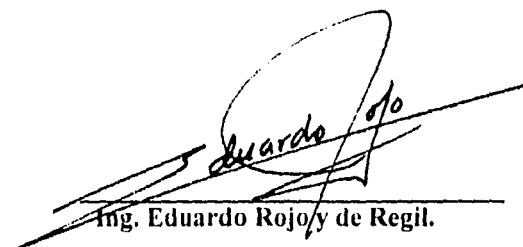
SECRETARIO Ing. Rodolfo Torres Barrera

1er. SUPLENTE Ing. Eduardo Marambio Dennett

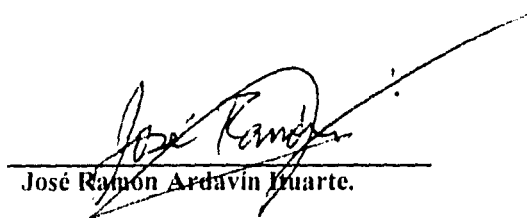
2do. SUPLENTE Ing. José Agustín Texta Mena

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA: *Residuos Industriales Multiquim, S.A de C.V.*

ASESOR DEL TEMA:


Ing. Eduardo Rojo y de Regil.

SUSTENTANTE:


José Ramón Ardavin Duarte.

DEDICATORIA

A Dios, El Señor, Quien me ha concedido innumerables bienes: todos.

A mis padres, con profunda admiración, agradeciéndoles su ejemplo y dedicación infatigables.

A mis hermanos y amigos...

A mis maestros, quienes me han dado lo mejor de ellos: su experiencia, y su tiempo.

AGRADECIMIENTOS

A la entonces *Chemical Waste Management de Mexico, S.A. de C.V.*, quienes me permitieron el acceso a la mayor parte de la información contenida en esta tesis.

A *Residuos Industriales Multiquim, S.A de C.V.*, quienes me facilitaron sus instalaciones para la elaboración de este trabajo.

A *Cementos Apasco, S.A de C.V.*, quienes me permitieron el acceso a la información técnica relacionada con su planta, ubicada en Ramos Arizpe, Coah.

A mis sinodales, familiares y amigos, quienes opinaron y colaboraron con los aspectos gráficos, de contenido y de redacción de esta tesis.

INDICE

INTRODUCCION	i
CAPITULO 1. LOS RESIDUOS INDUSTRIALES CLASIFICADOS COMO PELIGROSOS.	1
1.1. DEFINICION, CARACTERISTICAS Y TIPOS GENERICOS.	1
Propiedades fisicoquímicas de los residuos peligrosos.	3
1.2. EL CORRECTO MANEJO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS.	10
La reducción en la generación y el reciclaje de los residuos: Dos estrategias claves.	11
Métodos de tratamiento fisicoquímico de los residuos peligrosos.	12
El confinamiento controlado de residuos peligrosos.	18
1.3. LA LEGISLACION MEXICANA SOBRE RESIDUOS PELIGROSOS.	19
CAPITULO 2. LA TECNOLOGIA DEL USO DE RESIDUOS ORGANICOS COMO COMBUSTIBLE ALTERNO, EN HORNOS DE CLINKER.	25
2.1. GENERALIDADES.	25
2.2. BREVE DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION DEL CEMENTO PORTLAND.	26
2.3. PROCESO DE FABRICACION DEL CLINKER	29
Reacciones que se llevan a cabo en la formación del clinker.	30
Descripción de la operación de un horno de clinker.	31
Condiciones de operación y características de un horno común.	35
2.4. DESCRIPCION DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS EN HORNOS DE CLINKER.	35
Operación de un horno de clinker que utiliza combustibles alternos.	36
Especificaciones de los combustibles alternos.	37

Logística del uso de residuos orgánicos como combustibles alternos en hornos de clinker.	39
2.5. IMPACTO DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS EN EL PROCESO DE FABRICACION DEL CLINKER.	41
Factores que afectan el control del horno y su operación.	41
Factores que afectan a las emisiones del gas de chimenea.	42
Factores que afectan al clinker.	44
Factores que afectan al polvo de cemento, subproducto del proceso.	45
2.6. BALANCE DE MATERIA.	48
2.7. BALANCE DE ENERGIA.	58
CAPITULO 3. RESIDUOS APTOS PARA SER UTILIZADOS COMO COMBUSTIBLES ALTERNOS EN HORNOS DE CLINKER.	63
3.1. COMPONENTES ADECUADOS PARA FORMULAR COMBUSTIBLES ALTERNOS.	63
3.2. LA FORMULACION DE COMBUSTIBLES ALTERNOS PARA SER UTILIZADOS EN HORNOS DE CLINKER.	67
Casos excepcionales.	68
3.3. EL CONTROL DE CALIDAD DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS FORMULADOS A PARTIR DE RESIDUOS PELIGROSOS.	69
Especificaciones de seguridad e higiene industrial.	69
Especificaciones para el cumplimiento de la legislación.	70
Parámetros de control y aseguramiento de calidad de un programa de combustibles alternos en hornos de clinker.	71
Residuos descritos en la legislación de residuos peligrosos, que pueden ser utilizados como combustibles alternos en hornos de clinker (Tabla No. 7.3).	74

CAPITULO 4. LA APLICACION EN MEXICO DE LA TECNOLOGIA DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS EN HORNOS DE CLINKER.	83
4.1. LA GENERACION DE RESIDUOS SUSCEPTIBLES DE SER COMBUSTIBLES ALTERNOS.	83
4.2. LA INDUSTRIA CEMENTERA EN MEXICO.	89
Consumo de energía de la industria del cemento.	90
Localización de las plantas de cemento en México.	91
4.3. FACTIBILIDAD DE LA APLICACION DE LA TECNOLOGIA DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS EN MEXICO.	94
Factibilidad económica del uso de los combustibles alternos en hornos de clinker.	95
Análisis costo / beneficio.	96
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	102
BIBLIOGRAFIA.	106

INTRODUCCION

En la actualidad, el desarrollo industrial y tecnológico de cualquier país tiene entre sus prioridades, dar respuesta a dos desafíos:

- 1) La producción de bienes y servicios de calidad, a un menor costo; es decir, de una manera eficiente.
- 2) La preservación de los recursos naturales.

Presentar una alternativa para dar respuesta a estos dos retos, es la motivación de la presente tesis. En ella se pretende explicar la utilización de los residuos orgánicos, como fuente de energía alterna, en el proceso de fabricación del cemento.

Dicha utilización de residuos tiene dos objetivos: El ahorro de energía en un proceso que es intensivo en el uso de este insumo; y, la destrucción térmica segura de los residuos empleados como combustibles alternos.

En efecto, se ha encontrado que los hornos utilizados para la producción del clinker -producto intermedio para la fabricación del cemento-, son la unidad térmica idónea para lograr los propósitos mencionados, debido a sus elevadas temperaturas de operación; a la turbulencia de los gases de combustión dentro del horno y, al también elevado tiempo de residencia de dichos gases.

Desde el punto de vista de las técnicas del manejo adecuado de los residuos industriales peligrosos, su destrucción térmica en hornos de clinker tiene una ventaja importante sobre la incineración y el confinamiento subterráneo; y ésta es que, se aprovechan las instalaciones ya existentes, sin necesidad de invertir grandes capitales como los necesarios para la instalación de un confinamiento o de un incinerador. Esta ventaja cobra mayor importancia en los países como México, el décimo productor de cemento a nivel mundial, con 35 plantas en todo el territorio nacional.

Los residuos orgánicos susceptibles de ser utilizados como combustibles alternos en hornos de clinker, son líquidos que incluyen principalmente aceites y disolventes; y también sólidos, como llantas usadas, natas de pintura o estopas impregnadas con grasa.

Por su parte, las industrias principales en la generación de estos residuos, son la automotriz, química, de refinación, metal-mecánica, y de pinturas, entre otras.

Los antecedentes en el uso de los combustibles alternos se remontan a la década de los sesentas, y su primer uso documentado se halla en la década de los setentas. Después de la crisis del petróleo en 1973, los fabricantes de cemento empezaron a buscar combustibles no convencionales más baratos, a los que llamaron *combustibles alternativos*, y se dieron cuenta de que sus hornos podían ser una solución ambientalmente confiable y segura para la destrucción térmica de muchos de los residuos generados en sus comunidades. En Europa, excluyendo a los países que integraron el bloque oriental, más de 80 plantas de cemento queman este tipo de combustibles. Los países en los que se ha demostrado la viabilidad de esta fuente de energía, son Alemania, Canadá, Francia, Suecia, Suiza, y Estados Unidos de América; y un indicador importante del éxito de este concepto es el aumento constante en el número de hornos de cemento que reutilizan (o reciclan) materiales de desecho. Baste decir que datos de 1992, revelan que en el último país mencionado, 56 operadores de hornos de cemento y agregados de piso ligero (27 de los cuales no habían quemado residuos regulados a escala comercial previamente) llenaron solicitudes con la *U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)* para obtener permisos temporales y poder utilizar combustibles alternos formulados a partir de residuos, con el fin de complementar sus sustanciales requerimientos de energía.¹

De acuerdo con la nueva filosofía empresarial llamada "El Desarrollo Sustentable", "Este concepto reconoce que el crecimiento económico y la protección al ambiente están vinculados de modo inseparable, y que la calidad de la vida presente y futura dependen de la satisfacción de las necesidades humanas básicas, sin destruir el ambiente, del que dependen todas las formas de vida." ²

En consonancia con esta filosofía, los programas enfocados al uso de combustibles alternos en hornos de clinker, pueden proporcionar tres funciones vitales a nuestra moderna y compleja sociedad:

- 1.-La producción continua a un menor costo, de un producto necesario, como lo es el cemento.
- 2.-La disminución en la explotación de fuentes de recursos no-renovables, tales como el petróleo.
- 3.-La destrucción térmica de una gran cantidad de residuos peligrosos, principalmente industriales, a través de un método ambientalmente seguro.

¹ J.D. Smith, B. Strand. 1992. *Cement and Lightweight Aggregate Kilns 1992*. August diggest. pág. 25-35. Citado por CWM de México, S.A de C.V. 1993. "Presentación a SEDESOL de un Programa de Combustibles Alternos." México, D.F.

² Stephan Schmidheiny with The Business Council for Sustainable Development. 1992. *Changing Course*. Cambridge, Mass. : The MIT Press. pág. xi.

Uno de los problemas más importantes del momento presente es el correcto manejo de residuos peligrosos generados por la industria. La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) reconoció que en la República Mexicana, se generaron durante el año 1991 diariamente, 450,000 toneladas de residuos industriales sólidos. De éstos, 337,500 provienen de la industria minera, extractiva y de fundición; 81,000 de la industria química básica, orgánica e inorgánica; y 31,500 de los procesos agroindustriales.³

Dentro del volumen total mencionado, se estima que aproximadamente entre 14,500 y 20,000 toneladas; ⁴ es decir, entre el 3.3 y el 4.4 % pertenecen al grupo de residuos considerados como peligrosos, de los cuales la mayor parte corresponde a la industria química y petroquímica.

En México existen algunas instalaciones para el tratamiento, reciclamiento y disposición final de los residuos industriales, tales como el *Centro de Tratamientos Especializados y Disposición Final de Residuos Peligrosos* operado por la empresa *Residuos Industriales Multiquim, S.A de C.V. (RIMSA)*, situado en Mina, N.L.; cuatro recicladoras de solventes operados por diferentes empresas privadas, con una capacidad anual de 35 millones de litros; tres recuperadoras de plomo; una recuperadora de zinc con capacidad anual de 24 mil toneladas; cuatro recuperadoras de aluminio; y una recuperadora de níquel.⁵

Sin embargo, hace falta mucha inversión en estos rubros con la finalidad de prestar los servicios necesarios en el manejo de residuos industriales que demanda la industria mexicana. De acuerdo con información proporcionada por un organismo norteamericano, la capacidad para el tratamiento de los residuos peligrosos es de un tercio del volumen total generado en México; pero solamente cerca del 5 por ciento de este volumen es adecuadamente tratado y dispuesto.⁶ Lo anterior se puede confirmar con el hecho de que actualmente se encuentren en operación sólo dos confinamientos de residuos peligrosos en todo el país, y que aún no opere ningún incinerador público.

Dentro este contexto, la tecnología del uso de residuos orgánicos como combustibles alternos en hornos de clinker, ya probada en otros países, ofrece hoy en día a México una alternativa de solución a la demanda de métodos seguros para el manejo de los residuos peligrosos, y una forma de ahorro de combustibles derivados del petróleo.

³ SEDESOL- INE. 1992. Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 1991-1992. México, D.F. pág. 195.

⁴ United States Trade Center . Cerón F.1992. Market Research Summary: Ecología '93, Mexican Market.Solid Waste Handling Equipment. México, D.F. pág. 3.

⁵ SEDESOL- INE. Op. cit., pág.205.

⁶ U.S. Agency for International Development. Office of Energy & Infrastructure, Bureau for Latin America and The Caribbean. 1992. Environmental Market Conditions and Business Opportunities in Key Latin American Countries. Pág. 114.

1.- LOS RESIDUOS INDUSTRIALES CLASIFICADOS COMO PELIGROSOS

1.1 DEFINICION, CARACTERISTICAS Y TIPOS GENERICOS

"Se ha definido como desecho a todo aquello cuyo propietario no considera utilizable y que, en ocasiones, almacena esperando obtener de él un beneficio económico futuro, o bien que desecha o intenta desechos de una manera eficiente".¹ Esta definición general de lo que es un desecho destaca la cualidad de algo que en general es considerado como no utilizable. En efecto, un desecho o residuo es algo que no se puede volver a utilizar en el proceso que lo generó,² o al menos, es inutilizable sin que se le someta a un tratamiento específico que permita volverlo a utilizar, o "reciclar" en el mismo proceso que lo generó; ó bien, en un proceso diferente, o donde las especificaciones de calidad sean menores, y de alguna manera se puedan aprovechar sus propiedades. La definición anterior incluye a los subproductos de reacción de los que no se puede obtener un beneficio económico inmediato; a los residuos resultantes de las operaciones unitarias, como pueden ser los lodos de una destilación, o el fluido de enfriamiento de un intercambiador de calor; y también a aquellas sustancias que sirven para el mantenimiento de la maquinaria y equipo de una instalación cualquiera, tales como las grasas y lubricantes gastados, entre otros.

Cuando se habla de residuos o desechos peligrosos, se alude a aquellos que por sus propiedades físicoquímicas o toxicológicas representan un peligro para el ser humano, el ambiente, o la propiedad. Cada país los define en su legislación. En el caso de México, la *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente* define como residuos peligrosos a aquellos "en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas infecciosas o irritantes, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente".³ Asimismo, la *Norma oficial mexicana NOM-052-ECOL/1993* establece "las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente."⁴

En Estados Unidos de América, la legislación sobre desechos sólidos, hace referencia a su cantidad, concentración o características físicas, químicas o infecciosas, que pueden contribuir significativamente a un incremento de la mortalidad o de enfermedades serias; o plantear un peligro sustancial presente o potencial a la salud humana o al ambiente, cuando son tratados, almacenados, transportados, o eliminados de una manera incorrecta.⁵

¹ Ortiz Monasterio F. et al. 1987. *Manejo de los Residuos Peligrosos en México*. México, D.F. : Fundación Universo Veintiuno, A.C. Vol. 1. pág. 21

² SEDUE. 1988. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación, 28-/I/-88, Art. 3º, fracción XXVI.

³ *Ibid.*, Art.3º, fracción XXVII.

⁴ SEDESOL. 1994. *Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL/93*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación, 29-/XI/-94.

⁵ U.S Congress. 1984. *Solid Waste Disposal Act*. Citado por Ortiz Monasterio F. *loc. cit.*, pág. 23

En Reino Unido, la legislación hace una distinción entre este tipo de residuos por su peligrosidad aguda y riesgo a la salud humana; y por el daño que pueden causar al ambiente en el largo plazo.⁶

Las referencias anteriores sobre la legislación mexicana y de los otros dos países mencionados, coinciden en que los riesgos de los residuos peligrosos se manifiestan en su capacidad de afectar a la salud humana y a los ecosistemas. A este respecto, la legislación de Estados Unidos de América destaca que los riesgos existen cuando los residuos son inadecuadamente manejados, tratados y desechados. Es importante destacar lo anterior porque los residuos clasificados como peligrosos, no difieren en su peligrosidad de muchos de los materiales utilizados como materia prima en la industria. Su riesgo radica en que, debido a que son desechos -inutilizables-, frecuentemente sus generadores no están dispuestos a gastar recursos en su tratamiento, manejo y disposición adecuados, lo cual trae como consecuencia un riesgo al ambiente y a la salud humana.

A continuación se enlistan en el *cuadro 1.1* las etapas generales en las que se generan residuos peligrosos en la industria, y sus posibles causas.

CUADRO 1.1	
ETAPAS DE UN PROCESO INDUSTRIAL EN LAS QUE SE PUEDEN GENERAR RESIDUOS INDUSTRIALES PELIGROSOS	
<i>ETAPA</i>	<i>POSIBLES CAUSAS</i>
MATERIA PRIMA	1.- Caducidad. 2.- Deterioro durante su almacenamiento. 3.- No se utilizó.
PROCESOS DE PRODUCCION	1.- Subproductos de reacción.. 2.- Residuos resultantes de operaciones unitarias tales como destilación, filtración, evaporación o intercambio de calor. 3.- Productos rechazados.
PRODUCTOS FINALES	1.- Deterioro durante su almacenamiento. 2.- Productos no vendidos.

* Fuente: Ortiz Monasterio F. et al. 1987. Manejo de los Residuos Peligrosos en México. México, D.F. : Fundación Universo Veintiuno, A.C. Vol. 1. pág. 22.

⁶ House of the Lords select Comittee on Science and Technology. 1981. Citado por *ibid.*, pág. 23

Propiedades Físicoquímicas de los Residuos Peligrosos.

Los residuos clasificados como peligrosos pueden ser:

- Tóxicos
- Inflamables
- Corrosivos
- Reactivos
- Explosivos
- Biológico-infecciosos.

1.- Residuos Tóxicos:

La Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993 define que un residuo es tóxico cuando se somete a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-053-ECOL/1993; y el lixiviado de la muestra representativa contiene cualquiera de los constituyentes listados en sus tablas 5, 6 y 7 en concentraciones mayores a los límites señalados en dichas tablas.⁷ Lo anterior se presenta en la *Tabla No. 1.1.*

2.- Residuos Inflamables:

La característica de inflamabilidad es de importancia porque estos residuos pueden sufrir ignición durante su almacenamiento, transportación o disposición final.

Los ejemplos típicos de residuos inflamables son los aceites gastados y los solventes. Las propiedades de este tipo de desechos son las siguientes:

- a) Cuando en solución acuosa contienen más de 24% de alcohol.
- b) Cuando son líquidos que tienen un punto de ignición inferior a 60 °C,
- c) Cuando no son líquidos, en condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera de presión) son capaces de una combustión espontánea y sostenida. Pueden provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos .
- d) Pueden ser gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión.

⁷ SEDESOL. 1994. *op.cit.*, 5.5.4.1.

TABLA No. 1.1
CONSTITUYENTES QUE HACEN PELIGROSO A UN RESIDUO POR SU TOXICIDAD AL AMBIENTE

<i>CONSTITUYENTES INORGANICOS</i>	<i>CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (mg/L)</i>
Arsénico	5.0
Bario	100.0
Cadmio	1.0
Cromo hexavalente	5.0
Níquel	5.0
Mercurio	0.2
Plata	5.0
Plomo	5.0
Selenio	1.0
<i>CONSTITUYENTES ORGANICOS</i>	<i>CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (mg/L)</i>
Acrilonitrilo	5.0
Clordano	0.03
o-Cresol	200.0
m-Cresol	200.0
p-Cresol	200.0
Acido 2,4-Diclorofenoxiacético	10.0
2,4-Dinitrotolueno	0.13
Endrín	0.02
Heptacloro (y su epóxido)	0.008
Hexacloroetano	3.0
Lindano	0.4
Metoxicloro	10.0
Nitrobenceno	2.0
Pentaclorofenol	100.0
2,3,4,6-Tetraclorofenol	1.5
Toxafeno (Canfenoclorado técnico)	0.5
2,4,5-Triclorofenol	400.0
2,4,6-Triclorofenol	2.0
Acido 2,4,5-Tricloro fenoxipropiónico (silvex)	1.0
<i>CONSTITUYENTES ORGANICOS VOLATILES</i>	<i>CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (mg/L)</i>
Benceno	0.5
Eter bis (2-cloro etílico)	0.05
Clorobenceno	100.0
Cloroformo	6.0
Cloruro de metileno	8.6
Cloruro de vinilo	0.2
1,2-Diclorobenceno	4.3
1,4-Diclorobenceno	7.5
1,2-Dicloroetano	0.5

et.seq.

CONTINUACION TABLA No. 1.1

<i>CONSTITUYENTES ORGANICOS VOLATILES</i>	<i>CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (mg/L)</i>
1,1-Dicloroetileno	0.7
Disulfuro de carbono	14.4
Fenol	14.4
Hexaclorobenceno	0.13
Hexaclaro-1,3-butadieno	0.5
Isobutanol	36.0
Etilmetilcetona	200.0
Piridina	5.0
1,1,1,2-Tetracloroetano	10.0
1,1,2,2-Tetracloroetano	1.3
Tetracloruro de carbono	0.5
Tetracloroetileno	0.7
Tolueno	14.4
1,1,1-Tricloroetano	30.0
1,1,2-Tricloroetano	1.2
Tricloroetileno	0.5

* Fuente: SEDESOL. NOM-052-ECOL/93. Anexo 5, tablas 5, 6 y 7.

3.- *Residuos corrosivos:*

Los materiales que son considerados peligrosos debido a su corrosividad son aquellos que presentan cualquiera de las siguientes propiedades:

- a) En estado líquido o en solución acuosa tienen un pH en la escala del agua inferior o igual a 2; o mayor o igual a 12.5; o
- b) En estado líquido o en solución acuosa, corroen el acero al carbón (SAE 1020) en una medida de 6.35 milímetros (un cuarto de pulgada) o más por año, a una temperatura de 55 °C.

Los residuos con un alto o bajo pH pueden reaccionar en forma peligrosa con otros desechos, o causar que migren otros contaminantes tóxicos contenidos en éstos. Los materiales capaces de corroer el acero pueden fluir fuera de sus contenedores y liberar otros desechos.

4.- *Residuos reactivos:*

Un residuo reactivo es aquel que tiene alguna de las siguientes propiedades:

- a) En condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera de presión) es inestable, capaz de reaccionar combinándose o polimerizándose violentamente sin detonar.

- b) En condiciones normales reacciona violentamente con agua formando gases, vapores o humos, existiendo una relación (residuo-agua) de 5:1, 5:3 o 5:5.
- c) Forma una mezcla explosiva con agua.
- d) En condiciones normales cuando se pone en contacto con soluciones de pH ácido (HCl 1.0 N); y básico (NaOH 1.0 N), en relación (residuo-agua) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos.
- e) Posee en su composición cianuros o sulfuros que cuando se exponen a condiciones de pH entre 2.0 y 12.5 pueden generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a 250 mg de cianuro de hidrógeno (HCN) por kg de residuo, o 500 mg de sulfuro de hidrógeno (H₂S) por kg de residuo.
- f) Es capaz de producir radicales libres.⁸
- g) Es capaz de detonar si es sometido a calentamiento bajo condiciones de confinamiento, o si se le somete a un fuerte impacto.⁹

Ejemplos de residuos reactivos incluyen a los solventes de cianuro gastados.

5.- Residuos Explosivos:

Son aquellos que tienen cualquiera de las siguientes propiedades:

- a) Tienen una constante de explosividad igual o mayor a la del nitrobenzeno.
- b) Son capaces de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva en condiciones normales de presión y temperatura.

Un ejemplo de residuo explosivo es el agua proveniente de operaciones con TNT.

A continuación, en la *Tabla No. 2.1* se mencionan ejemplos de residuos industriales de acuerdo a la propiedad que los define como peligrosos.

⁸ SEDESOL. *ibid.* 5.5.2.5

⁹ The World Bank, The World Health Organization and The United Nations Environment Programme. 1989. *The Safe Disposal of Hazardous Wastes. Vol. I.* Washington, D.C: Batstone, Smith and Wilson Editors, pág. 18-19.

TABLA No. 2.1 EJEMPLOS GENERICOS DE RESIDUOS INDUSTRIALES, CLASIFICADOS POR SUS CARACTERISTICAS DE PELIGROSIDAD.				
INFLAMABLES	REACTIVOS	EXPLOSIVOS	CORROSIVOS	MUY TOXICOS
Hidrocarburos alifáticos	Nitratos	Peróxidos	Acidos fuertes	Cianuros
Hidrocarburos aromáticos	Metales alcalinos	Cloratos	Bases fuertes	Arsénico y sus sales
Alcoholes	Fósforo metil-isocianato	Percloratos	Fenol	Plomo y sus derivados
Eteres	Magnesio	Acido pícrico	Bromo	Polifenoles
Aldehídos	Cloruro de acetilo	Trinitrobenceno	Hidracina	Berilio
Cetonas	Hidruros metálicos	Trinitrotolueno		Fenol
Fósforo		Permanganato de potasio		Anilina
Metilaminas		Nitrato de celulosa		Nitrobenceno
				Cloruro de vinilo
				2,3,7,8-TCDD
				Bifenilos policlorados
				Bifenilos polibromados.
				Derivados halogenados orgánicos.

* Fuente: Gordon, A.J. The Chemist Companion. *A Handbook of Practical Data*, Techniques and references. John Wiley and Sons. New York, 1972, pp 537. Citado por Ortiz Monasterio F. *Manejo de los Residuos Peligrosos en México*. México, D.F.: Fundación Universo Veintiuno, A.C. Vol. I, pág. 46.

6.- Residuos biológico-infecciosos:

Se consideran peligrosos a aquellos que tienen alguna de estas propiedades:

- a) Los que tienen bacterias, virus, u otros microorganismos con capacidad de infección.
- b) Cuando contienen toxinas producidas por microorganismos que causen efectos nocivos a seres vivos.

A continuación, en la *Tabla No. 3.1* se muestra una clasificación de residuos peligrosos, de acuerdo a su composición química, al tipo de industria que los genera y a su riesgo específico.

Los principales mecanismos fisicoquímicos con los que los residuos peligrosos se difunden en el ambiente son los siguientes:

- a) Lixiviación.
- b) Absorción/Desorción.
- c) Volatilización.
- d) Bioacumulación.

TABLA No. 3.1
CLASIFICACION DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS DE ACUERDO A SUS PROPIEDADES QUIMICAS;
AL RIESGO QUE REPRESENTAN Y A LA INDUSTRIA GENERADORA.

<i>CLASIFICACION</i>	<i>TIPO DE RESIDUO</i>	<i>RIESGO</i>	<i>PROCESO GENERADOR</i>
A) RESIDUOS INORGANICOS	1.- Acidos y álcalis	Corrosividad, que puede complicarse en toxicidad.	Abundan en muchos procesos industriales. Destacan la terminación de superficies y el acabado de metales.
	2.- Cianuros	Toxicidad aguda.	Acabado de metales y tratamiento térmico de algunos aceros.
	3.- Lodos, polvos y soluciones de metales pesados: Arsénico, cadmio, cromo hexavalente, plomo, mercurio, níquel, cobre y zinc.	Toxicidad	Producción de cloro; de pigmentos; conservación de la madera; producción de baterías; de textiles; plateado de metales; y, procesos de teñido. Los polvos principalmente del beneficio, fundición y acabado de metales.
	4.- Asbestos	Los polvos y fibras de este materia son cancerígenos vía inhalación.	Revestimiento de subestaciones eléctricas, hospitales, escuelas, material sobrante de demoliciones, o de la reconstrucción de vías ferroviarias.
B) RESIDUOS ACEITOSOS	Residuos de lubricación, fluidos hidráulicos, lodos de tanques de almacenamiento, aceites de corte.	Inflamabilidad. Toxicidad: debido a que en ocasiones están contaminados con metales tóxicos.	Principalmente: el uso y almacenamiento de aceites minerales. Lodos de los tanques de almacenamiento de combustibles, de los cuales algunos contienen plomo.
C) RESIDUOS ORGANICOS	1.- Solventes halogenados:	Toxicidad, movilidad, y relativamente alta persistencia en el ambiente.	Lavado en seco; limpieza de metales en la industria de ingeniería; y en menor medida, en procesos de desengrasado en las industrias textil y peletera.

et seq.

CLASIFICACION	TIPO DE RESIDUO	RIESGO	PROCESO GENERADOR
	2.- Solventes no halogenados: hidrocarburos comunes: <i>Thimer</i> , tolueno, metanol, isopropanol y etanol, entre otros.	Inflamabilidad. Toxicidad: varía ampliamente.	Producción de tintas, pinturas, adhesivos, resinas, conservadores de madera base solvente, saborizantes y cosméticos, limpieza de equipos; desengrasantes y diluyentes.
	3.- Residuos de plaguicidas y pesticidas.	Toxicidad.	Agricultura; manufactura y formulación de biocidas.
	4.- Bifenilos policlorados. (PCB's)	Alta persistencia y alto potencial de bioacumulación.	Aceite dieléctrico gastado proveniente de transformadores y capacitores; fluido hidráulico y para la transferencia de calor.
	5.- Residuos de pinturas y resinas. Típicamente, combinaciones de solventes y polímeros, conteniendo a veces metales tóxicos.	Inflamabilidad y toxicidad.	Formulaciones y procesos químicos terciarios; y de la aplicación de pinturas y resinas a productos terminados.
D) RESIDUOS ORGANICOS EN DESCOMPOSICION	Residuos de la producción de aceites comestibles y sobrantes de rastros.	Biológico-infeccioso.	Tenerías y procesos basados en productos animales.
E) RESIDUOS DE MENOR PELIGROSIDAD, PERO GENERADOS EN GRAN VOLUMEN.	Ejemplos: Lodos de la perforación de la extracción de petróleo o de gas natural; y ceniza volátil o "fly ash".	Sus propiedades intrínsecas son poco peligrosas.	Perforación de pozos petroleros y de extracción de gas natural; el "fly ash" proviene de las plantas generadoras de energía en base a combustibles fósiles.
F) OTROS: RESIDUOS VARIOS.	Residuos infecciosos; químicos caducos; residuos de experimentación y residuos explosivos.	Potencial infeccioso. Toxicidad; reactividad y explosividad.	Hospitales; laboratorios; almacenes industriales y comerciales; institutos de investigación y fábricas militares.

* Fuente: The World Bank, The World Health Organization and The United Nations Environment Programme. 1989. The Safe Disposal of Hazardous Wastes. Vol. I, Washington, D.C: Batstone, Smith and Wilson Editors, pág. 19-23.

Después de haber analizado las propiedades de los residuos peligrosos, y sus riesgos particulares, a continuación se tratarán los métodos que garantizan su manejo seguro.

1.2 EL CORRECTO MANEJO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS

De acuerdo al artículo 9o. del Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos, "se entiende por manejo, el conjunto de operaciones que incluyen el almacenamiento, recolección, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de los residuos peligrosos."¹⁰ Por otro lado, el riesgo más grave de su manejo inadecuado se manifiesta en daños a la salud humana. De hecho, cuando se empezó a tener conciencia a nivel mundial del problema de los residuos industriales fue a causa del envenenamiento sufrido por poblaciones enteras afectadas por el mal manejo de este tipo de residuos.

Por lo anterior, a continuación se mencionan los principios generales del correcto manejo de los residuos peligrosos:¹¹

- a) Minimizar los riesgos a la salud.
- b) Maximizar la aceptación pública de las instalaciones para el manejo adecuado de residuos.
- c) Minimizar los impactos ambientales.
- d) Minimizar costos.

Entre las varias opciones para el manejo de los residuos, existe una jerarquía para su aplicación. La jerarquía de estrategias en el manejo de residuos peligrosos es la siguiente:¹²

- 1) Evitar la generación de residuos, o reducirlos desde su fuente.
- 2) Reciclar o recuperar recursos.
- 3) Tratamiento físico, químico o biológico para destruir, transformar, o inmovilizar los constituyentes peligrosos de los residuos.
- 4) Incinerar los residuos orgánicos como medio para su destrucción.
- 5) Disponer en la tierra mediante confinamiento subterráneo.
- 6) Disponer en el mar.

La primera de las estrategias es fundamental, ya que en el largo plazo, es preferible invertir recursos para evitar la generación de residuos, que tener que gastar en la tecnología para su manejo adecuado. La segunda, también es de vital importancia, ya que significa el ahorro de recursos naturales. A continuación, se detalla lo esencial de estas dos estrategias.

¹⁰ SEDUE. 1988. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación del 25/11/88, art. 9°.

¹¹ The World Bank, The World Health Organization and The United Nations Environment Programme. *op.cit.*, pág. 108.

¹² *ibid.*, pág. 97

La Reducción en la Generación y el Reciclaje de los residuos: Dos Estrategias Claves.

La estrategia clave es la reducción del volumen de los residuos, pues esto implica una mayor eficiencia en los procesos de producción, que a la larga redundará en un ahorro de recursos. Adicionalmente, su reciclaje o la recuperación de algunas de sus propiedades, implica también un ahorro de las materias primas y una reducción en los costos del manejo de los residuos.

A) Reducción en la generación de los residuos:

“ Las motivaciones que tiene la industria para reducir la contaminación son variadas e incluyen la reducción de costos, mejoras en el proceso, conservación de recursos, reducción de riesgos, cumplimiento de la reglamentación y del compromiso con las comunidades relacionadas con la planta, mejora de la imagen industrial y de la credibilidad con los empleados, el gobierno y el público.

Randy Price, Director de Asuntos Ambientales de *Du Pont*, indica que en su empresa siguen una estrategia que denominan de *tres filas*. En la primera se tratan de cosechar los frutos fáciles de identificar y alcanzar, y de bajo costo, los cuales generalmente se logran con mejoras en la operación, en el mantenimiento, y al despertar la conciencia del empleado. La segunda fila requiere de 1 a 5 años e incluye cambios en el proceso, y necesita de mayor inversión, pero utiliza tecnología existente. La tercera fila es a largo plazo, toma más de 5 años, y consiste en analizar los fundamentos de química e ingeniería, respecto a cómo los productos son fabricados. Puede involucrar una sustitución de materia prima, rediseño de proceso, o cambio de producto, que traerá como consecuencia la necesidad de modificar la planta existente o la construcción de una nueva. Price comenta que la posibilidad de recuperar la inversión es inversamente proporcional al capital invertido.”¹³

B) Reciclaje de los residuos:

La reutilización o recuperación de alguna de sus propiedades físicoquímicas significa el establecimiento de un *ecosistema industrial*, en el cual, los materiales que una industria genera como residuos o subproductos, pueden ser utilizados por otra, que se verá beneficiada en costos por usar insumos más baratos; al mismo tiempo que beneficiará a su comunidad reduciendo el volumen de residuos que, de no reciclarse, tendrían que someterse a un manejo y disposición adecuados. Finalmente el reciclaje de residuos coadyuva a una utilización más racional de los recursos naturales. Este es el caso de la

¹³ SEDESOL, INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGIA. 1993. Compendio de Notas Ambientales Publicadas en el Extranjero. México, D.F., Ciudad Universitaria: Facultad de Química, pág. 197.

recuperación de los solventes y aceites; y del reciclaje del aluminio o del papel, por citar sólo algunos ejemplos.

El tema de la presente tesis, está íntimamente relacionado con la estrategia de reutilización o *reciclaje*, ya que la combustión de residuos orgánicos en hornos de clinker, como se verá más adelante, significa la recuperación del valor energético de estos residuos, aplicado al proceso de fabricación del cemento.

Sin embargo, en tanto la industria utiliza procesos más eficientes para reducir la generación de residuos; o cuando no es posible lograr una mayor reducción; o no es posible reutilizarlos o recuperar alguna de sus propiedades, es necesario *disponer* de los residuos adecuadamente. El término *disposición final* -que en castellano debería de ser *desecho final*- lo define el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos como la “Acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuados para evitar daños al ambiente”.¹⁴

Métodos de Tratamiento Fisicoquímico de los Residuos Peligrosos.

Antes de la disposición final de los residuos mediante incineración o confinamiento subterráneo controlado, en muchas ocasiones es necesario aplicarles un tratamiento físico, químico o biológico, para modificar sus propiedades fisicoquímicas y que su disposición final sea segura. Estos tratamientos se pueden clasificar de acuerdo a su finalidad en:¹⁵

- 1) Procesos de separación de fases, potencialmente útiles en la reducción del volumen o en la recuperación de recursos.
- 2) Procesos de separación de componentes, capaces de segregar físicamente especies iónicas o moleculares particulares contenidas en mezclas multicomponentes homogéneas.
- 3) Transformaciones químicas que permiten anular el potencial tóxico, recuperar o reducir el volumen de componentes específicos contenidos en las corrientes residuales.
- 4) Transformaciones químicas debidas a la acción biológica de microorganismos.

¹⁴ SEDUE. *op. cit.* Art. 3o.

¹⁵ The World Bank, The World Health Organization and The United Nations Environment Programme. *op. cit.*, vol. II, pág. 270.

1) Métodos Físicos de Tratamiento.

Estos procesos incluyen varios métodos de separación de fases y solidificación.

a) Separación de fases:

El método más sencillo que se utiliza es la separación de fases por gravedad, mediante el almacenamiento prolongado en tanques y lagunas, que sirven para separar los aceites del agua. Otro método físico importante es el secado de lodos en camas. Los tres métodos dependen de la separación de fases por gravedad, y permiten la remoción de líquidos por decantación, drenado y evaporación.

Métodos más complejos incluyen la adsorción con carbón activado, y con resinas de adsorción; el intercambio iónico; la centrifugación; la diálisis; la destilación; la floculación; la ósmosis inversa y la ultrafiltración; y la extracción de orgánicos en fase líquida; entre otros.

b) Solidificación:

El método físico más comunmente usado como tratamiento previo al confinamiento subterráneo es la solidificación de lodos o semilíquidos con un agente absorbente sólido, como la arcilla o la ceniza volátil (fly ash), para producir una mezcla de consistencia granular, que fácilmente pueda manejarse como tierra de relleno en los confinamientos. El principal objetivo de estos procesos es transformar los residuos tóxicos en inertes, físicamente manejables, reduciendo al mínimo su solubilidad en agua y capacidad de lixiviación, y dándoles una resistencia mecánica suficiente para permitirles ser material de relleno de los confinamientos. El resultado ambiental consiste en evitar la difusión de los contaminantes en el agua de los mantos freáticos. Otros procesos implican el *encapsulamiento* mediante el uso de polímeros orgánicos que se endurecen durante el tratamiento de los residuos. Estos procesos físicos de solidificación son adecuados para el tratamiento de los residuos inorgánicos.

A estos tratamientos físicos de solidificación, se les podría denominar como métodos de "estabilización física", aunque, estrictamente, la estabilización es un tratamiento químico que implica la inmovilización de las sustancias tóxicas, sometiéndolas a una reacción química para formar compuestos insolubles con una estructura cristalina.

2) Métodos Químicos de Tratamiento.

Se utilizan para descomponer las moléculas tóxicas en gases no tóxicos, y modifican las propiedades químicas de los residuos. Algunos de estos métodos son:

a) Oxidación química:

Un ejemplo característico de este método de tratamiento es la oxidación de los lodos y residuos acuosos del ión cianuro (CN^-), que provienen de los procesos de plateado de metales; y que, por consiguiente, es común que también contengan metales tóxicos. Los residuos de cianuro se oxidan en una solución acuosa a pH alcalino (mayor de 10), con cloro o ión hipoclorito; ambos, oxidantes fuertes. La oxidación transforma el ión cianuro a ión cianato.

b) Precipitación de metales pesados:

Para corrientes residuales que contienen iones metálicos en solución, tales como cobre, níquel o zinc, éstos pueden ser removidos de la solución agregando en exceso cal apagada o hidróxido de sodio, formándose carbonatos o hidróxidos de estos metales, insolubles en agua. Otros precipitantes alternativos son el sulfuro de sodio, la tiourea o los di-tiocarbonatos. Todos estos producen sulfuros insolubles. Generalmente, la precipitación de sulfuros se practica posteriormente al uso de la sosa y de la cal, utilizados en una primera etapa de precipitación.

c) Reducción química:

El ácido crómico (H_2CrO_4) es corrosivo y altamente tóxico. Este es un ejemplo de un residuo al que se le aplica un proceso de reducción. Se utiliza ampliamente en el tratamiento superficial de los metales, y en los procesos de cromado. El cromo hexavalente contenido en el ión cromato (CrO_4^{2-}) es reducido al ión cromo III (Cr^{3+}), relativamente no tóxico. Algunos compuestos que funcionan en forma efectiva como agentes reductores son el dióxido de azufre, los sulfitos, los bisulfitos, y las sales ferrosas.

d) Neutralización:

La industria genera un gran volumen de soluciones acuosas ácidas, del cual, mucho proviene del tratamiento de metales, por lo que esta corriente residual frecuentemente contiene fierro, zinc, cobre, bario, níquel, cromo, cadmio, estaño y plomo. Este residuo ácido es sumamente corrosivo. El agente más barato para su neutralización es la cal apagada, y se utiliza a gran escala. El yeso que se forma como subproducto se puede filtrar y posteriormente confinar.

El caso de las soluciones residuales alcalinas es diferente ya que su composición suele ser mucho más heterogénea que la de los residuos ácidos. Los residuos alcalinos provienen principalmente de la refinación del petróleo, talleres de pintura y firmas especializadas de limpieza. Además de contener sólidos como hidróxidos metálicos, arcilla gastada o catalizadores, pueden contener fenolatos, naftenatos, sulfonatos, cianuros, metales pesados, grasas y resinas entre otros. La tecnología actual sólo permite la recuperación de los metales. Para su neutralización, se utilizan los ácidos sulfúrico y clorhídrico. El primero

produce una mayor cantidad de precipitados insolubles, y por tanto mayor volumen de residuos que el segundo.

3) Métodos Biológicos de Tratamiento.

Sólo ocasionalmente, los residuos industriales peligrosos pueden ser tratados en forma similar a los desechos municipales. Este es el caso de efluentes acuosos con una baja concentración de metales tóxicos. Se han desarrollado microorganismos para degradar en forma selectiva metales tóxicos específicos.

El tratamiento conjunto del desperdicio municipal y de los residuos industriales ha tenido éxito al añadir nutrientes adicionales a los sistemas biológicos.

Es una alternativa económica que ha funcionado en la India con algunos residuos, tales como efluentes de procesos de laminación que contienen fenol con 20,000 a 40,000 mg/l; efluentes con triclorofenol en concentraciones de 2000 a 3000 mg/l; y efluentes con monoclorobenceno en concentraciones hasta de 50 mg/l; entre otros.¹⁶

4) La Incineración.

“La incineración es un proceso de disposición final, aplicado a ciertos residuos que no pueden ser reciclados, reutilizados o depositados de manera segura en un sitio de confinamiento.”¹⁷ La esencia del proceso es la oxidación de los residuos a alta temperatura -que garantice su total combustión-, en presencia del oxígeno del aire, transformándose éstos en gases de combustión emitidos a la atmósfera, y en un residuo sólido incombustible, que debe ser confinado.

La anterior definición difiere con aquella que establece la legislación mexicana en el *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos*. Su artículo tercero define incineración como “Método de tratamiento que consiste en la oxidación de los residuos, vía combustión controlada.”¹⁸ La diferencia estriba en considerar la incineración como método de tratamiento en lugar de método de disposición final de los residuos. El mismo artículo del mencionado reglamento, restringe la definición de *disposición final* (de los residuos peligrosos), a la “acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuados para evitar daños al

¹⁶ The World Bank, The World Health Organization and The United Nations Environment Programme. *op. cit.*, vol. II, pág. 273-274, 313.

¹⁷ *Ibid.* vol. III pág. 653.

¹⁸ SEDUE. 1988. *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos*. México, D.F. Diario Oficial de la Federación del 25 de noviembre de 1988. Art. 3º.

ambiente." Sin embargo, podría ser válido considerar la combustión controlada como un método de *disposición final*, ya que implica la transformación del residuo en gases cuya emisión a la atmósfera es controlada, y en cenizas inertes de fácil manejo, que deben ser confinadas. De esta manera, la atmósfera está siendo un "espacio de disposición final" de los residuos transformados en gases de combustión: principalmente dióxido de carbono y agua.

El proceso de incineración de residuos operado bajo condiciones adecuadas sirve a dos propósitos importantes: el de destruir los residuos, acompañado de una importante reducción en su volumen; y el de generar en su lugar, un residuo sólido inerte. Sin embargo, su operación adecuada requiere de un control riguroso de las emisiones de partículas a la atmósfera, así como de subproductos de gases ácidos y tóxicos. Para ello, y de acuerdo al tipo de residuos que se incineren, se requiere acoplado al incinerador, un sistema de lavado de los gases de combustión, para evitar que su emisión produzca contaminación atmosférica.

Otro inconveniente de los incineradores es que se requiere de un gran volumen de residuos industriales peligrosos para hacer costeable su operación. De acuerdo al *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*, típicamente, arriba de 10,000 toneladas por *billón* (mil millones) de dólares de producto interno bruto ¹⁹ (10 toneladas por millón de dólares de PIB). Este es el volumen de residuos correspondiente a Canadá. Por lo tanto, menos de un tercio de los países del mundo pueden hacer rentable la operación de incineradores. Sin embargo, las estrategias de co-incineración contemplan la posibilidad de utilizar calentadores industriales, hornos de cemento y otras instalaciones para la incineración de residuos, como alternativas más rentables.

El propósito de la presente tesis será demostrar que los hornos para la manufactura de clinker de cemento, se pueden usar como un medio idóneo de co-incineración de muchos residuos peligrosos orgánicos, y que esta tecnología, es especialmente aplicable en México. Sobre ello se abundará en los capítulos posteriores.

La clase de residuos para los que se justifica la incineración son los siguientes:

- Residuos infecciosos o biológicamente peligrosos.
- Aquellos persistentes en el ambiente o resistentes a la biodegradación.
- Aquellos volátiles y por ende con facilidad de dispersión.
- Los que tienen un punto de ignición inferior a 40 °C.
- Los que no pueden ser dispuestos de manera segura en un confinamiento.

¹⁹ The World Bank, The World Health Organization and The United Nations Environment Programme. *op. cit.*, vol. III, pág. 654.

- Aquellos que contengan enlaces orgánicos de halógenos, plomo, mercurio, cadmio, zinc, nitrógeno, fósforo o azufre.

Por lo anterior, los residuos adecuados para ser sometidos a incineración son en general:

- Los solventes residuales.
- Residuos de aceites, emulsiones o mezclas de aceites.
- Plásticos, hule y latex.
- Desechos de los hospitales.
- Desechos de los pesticidas.
- Desechos farmacéuticos.
- Residuos de las refinerías como breas ácidas y arcilla gastada.
- Residuos fenólicos.
- Grasas y ceras.
- Residuos orgánicos que contengan halógenos, azufre, fósforo o compuestos de nitrógeno.
- Materiales sólidos contaminados con compuestos tóxicos (ej: capacitores que contienen bifenilos policlorados).
- Agua contaminada con compuestos químicos peligrosos.

Las condiciones generales óptimas en los procesos de incineración son:

- Alta temperatura: de 900 a 1200 °C.
- Tiempo de residencia en fase gaseosa dentro del incinerador: mínimo 2 segundos.
- Buena turbulencia, mediante un diseño del incinerador que permita rutas de quemado ciclónicas.
- 100% de exceso del oxígeno estequiométrico para la combustión.

Cuando se observan estas condiciones de operación y de diseño del incinerador, se ha comprobado que es posible destruir en forma segura incluso los compuestos más difíciles.²⁰ Tal es el caso de los bifenilos policlorados o BPC's (llamados PCB's en inglés), anteriormente utilizados en los aceites de los transformadores eléctricos.

²⁰ *Ibid.*, vol.III, pág. 657.

El Confinamiento Controlado de Residuos Peligrosos.

Un confinamiento es una instalación donde los residuos peligrosos son enterrados y almacenados en el suelo. Esta tecnología debe utilizarse después de que han sido tratados por alguno de los métodos expuestos anteriormente, para reducir su potencial de peligrosidad debido a sus propiedades fisicoquímicas. Esto se logra en términos generales mediante:

- a) La destoxificación de los residuos,
- b) La separación y concentración de sus constituyentes peligrosos en un volumen reducido, y
- c) La estabilización y solidificación de los residuos para evitar los lixiviados.

La finalidad de un confinamiento controlado es enterrar permanentemente los residuos de manera que no sean un riesgo para el ambiente o la salud pública. Para ello, están provistos de celdas en las que se deposita un volumen determinado de residuos compatibles entre sí. Cada celda está aislada del resto por medio de una capa de tierra, comúnmente arcillas, que evita que los componentes de los residuos migren hacia abajo o lateralmente por un proceso de lixiviación. En la parte más profunda de cada celda, se coloca una capa o cubierta plástica, que constituye una barrera entre la celda y el suelo. Arriba de dicha cubierta, debe haber un conducto para los eventuales lixiviados, que son colectados y almacenados en un depósito destinado a este fin, sobre el cual se realiza un monitoreo permanente.

Los principales cuidados necesarios para la operación de un confinamiento de residuos peligrosos están enfocados a evitar la contaminación del agua de los mantos freáticos. Por esta razón, en su diseño y manejo se hace especial énfasis en prevenir la formación de líquidos susceptibles de convertirse en lixiviados, y en su posterior difusión. Los principales requisitos preventivos incluyen los siguientes:

- a) La eliminación de líquidos libres, que implica el secado de los residuos, su solidificación o estabilización, previos a su confinamiento.
- b) La desviación de las corrientes de agua superficiales, en el sitio destinado al confinamiento.
- c) El uso de una capa impermeable de tierra en la parte superior de las celdas que evite la infiltración del agua de lluvia.
- d) La compactación de los residuos.
- e) El uso de celdas en todo el sitio de confinamiento.
- f) La recolección y tratamiento del lixiviado.
- g) El monitoreo del agua de los mantos freáticos.

El confinamiento ideal de residuos peligrosos es aquel que se encuentra sobre una gran capa impermeable de arcilla, en una zona asísmica.²¹

Los confinamientos controlados de residuos peligrosos constituyen una estrategia importante para su disposición final, excepto en lugares cuya hidrología y geología no lo permiten. Los datos de 1983 indicaron que cerca del 68% de los residuos peligrosos manejados en Estados Unidos, y cerca del 47% de los manejados en Europa tenían esta disposición final.²²

A continuación, para finalizar esta parte, en la *Tabla No. 4.1* se indican los métodos de tratamiento y disposición final más recomendados de acuerdo al tipo de residuo.

1.3 LA LEGISLACION MEXICANA SOBRE RESIDUOS PELIGROSOS

La legislación mexicana en materia ecológica se deriva del artículo 27 constitucional, que menciona "...se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas, y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población: para preservar y restaurar el equilibrio ecológico..."²³ Con fundamento en el artículo constitucional mencionado, se expidió el 28 de enero de 1988 la *Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente*, cuyos antecedentes fueron la *Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental*, de 1972; y la *Ley Federal de Protección al Ambiente*, de 1988.

La actual Ley General define "los principios de la política ecológica general y regula los instrumentos para su aplicación",²⁴ da origen a los Reglamentos y a las *Normas Oficiales Mexicanas* - anteriormente Normas Técnicas Ecológicas-, y entre otras cosas, define las tareas que le competen a la Federación, a las entidades federativas y a los municipios respectivamente. Con respecto a esto último, define que lo referente al manejo de los residuos peligrosos es materia de competencia federal; y que corresponde a las entidades federativas lo relacionado a la reglamentación del manejo de los residuos sólidos no peligrosos.

En forma general, los *Reglamentos* de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente definen las materias o aspectos en los cuales las personas físicas y morales debemos cumplir, y

²¹ *ibid.*, vol. II, pág. 451.

²² Hrudey, S.E. 1983. Survey of operating hazardous waste facilities in Europe and North America. *Journal of Environmental Engineering*, 210-217. Citado en *ibid.*, vol. II, pág. 448.

²³ Congreso de la Unión. 1987. Modificación al artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. México, D.F. Diario Oficial de la Federación, 10-VIII-1987.

²⁴ SEDUE, *op.cit.*, Art. 1º, fracción I.

TABLA 4.1
METODOS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICION FINAL RECOMENDADOS DE ACUERDO AL TIPO DE RESIDUO

RESIDUO	RECUPERACION	INCINERACION	TRATAMIENTO	INMOBILIZACION	CONFINAMIENTO
			FISICO QUIMICO, O BIOLOGICO	QUIMICA FIJACION ENCAPSULAMIENTO	
EFLUENTES, AGUAS DE LAVADO			***		
ACIDOS Y ALCALIS			***		
METALES PESADOS			***	***	SUS RESIDUOS
INORGANICOS TOXICOS			***	***	SUS RESIDUOS
DESECHOS REACTIVOS			***		
INORGANICOS NO-TOXICOS	***				***
SOLVENTES, ACEITES	***	***			
RESINAS, PINTURAS Y LODOS ORGANICOS	***	***			
QUIMICOS ORGANICOS	***	***	***		
PESTICIDAS		***	***		
BIFENILOS POLICLORADOS E HIDROCARBUROS CLORADOS		***			
RESIDUOS EN DESCOMPOSICION, BIODEGRADABLES		***	***		

Fuente: Environmental Protection Authority of Victoria. 1985. Draft Industrial Waste Strategy for Victoria. "Recommended Disposal Methods in the State of Victoria, Australia" Melbourne. Citado por The World Bank et al. 1989. The Safe Disposal of Hazardous Waste. Washington, D.C. Batstone, Smith and Wilson Editors. vol. I. pág. 99.

los procedimientos conducentes a este cumplimiento. Por su parte, las *Normas* determinan los parámetros específicos que sirven para el control del cumplimiento de la legislación ambiental.

A continuación en el *cuadro 1.1* se muestran los principales documentos de la legislación mexicana en materia de la protección al ambiente, por orden de jerarquía.

CUADRO 1.1				
LA LEGISLACION MEXICANA EN MATERIA DE PROTECCION AL AMBIENTE				
ARTICULO 27 CONSTITUCIONAL				
LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y PROTECCION AL AMBIENTE				
<i>REGLAMENTO EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL</i>	<i>REGLAMENTO PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.</i>	<i>REGLAMENTO PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION DE AGUAS.</i>	<i>REGLAMENTO PARA LA PROTECCION DEL AMBIENTE POR LA EMISION DE RUIDO</i>	<i>REGLAMENTO EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS.</i>
NORMAS OFICIALES MEXICANAS				
LEYES ESTATALES				
BANDOS MUNICIPALES.				

Las Normas Oficiales Mexicanas referentes a los residuos peligrosos fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación el día 29 de noviembre de 1994. Sus antecedentes fueron las Normas Técnicas Ecológicas, que tuvieron vigencia desde el 6 de junio de 1988 hasta el 21 de octubre de 1993; y las Normas Oficiales Mexicanas para el Control de los Residuos Peligrosos, cuya nomenclatura fue vigente desde el 23 de octubre de 1993 hasta el 29 de noviembre de 1994. A partir de esta fecha, su nombre definitivo es el que a continuación se indica:

* NOM-052-ECOL-1993 (Antes: NOM-CRP-001-ECOL/1993) : que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

* NOM-053-ECOL-1993 (Antes: NOM-CRP-002-ECOL/1993): que establece los procedimientos para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

* NOM-054-ECOL-1993 (Antes: NOM-CRP-003-ECOL/1993): que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más de los residuos considerados como peligrosos en la norma NOM-052-ECOL-1993, mencionada anteriormente.

* NOM-055-ECOL-1993 (Antes: NOM-CRP-004-ECOL/1993): que establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto de los radiactivos.

* NOM-056-ECOL-1993 (Antes: NOM-CRP-005-ECOL/1993): que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento de residuos industriales peligrosos.

* NOM-057-ECOL-1993 (Antes: NOM-CRP-006-ECOL/1993): que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.

* NOM-058-ECOL-1993 (Antes: NOM-CRP-007-ECOL/1993): que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.

1.4 SITUACION ACTUAL EN MEXICO CON RESPECTO AL MANEJO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS

Como se describió anteriormente, la definición del término *manejo* de los residuos peligrosos es muy amplia, ya que abarca todo lo que se debe hacer con ellos, desde que son generados, hasta su disposición final. Con aquella definición como marco de referencia, se intentará describir el perfil de México en esta materia.

En primer lugar, es necesario establecer los requisitos indispensables para llevar a cabo exitosamente un programa de manejo de residuos peligrosos en cualquier país. Estos requisitos comprenden en forma general lo siguiente:

- 1.- Que la industria local sea consciente de su responsabilidad en el manejo adecuado los residuos que genera.
- 2.- Que existan instalaciones adecuadas para el tratamiento y disposición final de los residuos industriales peligrosos. Independientemente de que dichas instalaciones sean de la iniciativa privada, del gobierno, o producto de un convenio entre ambos.
- 3.- La existencia de una legislación que regule el manejo adecuado de los residuos, con reglamentos, normas, convenios, etc.
- 4.- Un sistema de control que asegure y facilite el cumplimiento de la ley.

Respecto a estos requisitos, México ha dado un paso importante y esencial que es tener una legislación específica sobre esta materia. Existe una legislación que ha evolucionado. En un principio, sólo estaba enfocada al control de la contaminación atmosférica y del agua. Posteriormente, incluyó la planeación y los estudios de impacto ambiental; finalmente, incorpora además, los estudios de riesgo, la descentralización de funciones en lo que se refiere a los residuos no peligrosos; un sistema de procedimientos, como son los Reglamentos; y de parámetros de cumplimiento, como lo son las Normas.

Sin embargo, tenemos muchas carencias, como las que se mencionan a continuación:

1.- Falta de conciencia en la industria; de conocimiento de la legislación, y de educación de la población en general en materia de un adecuado manejo de los residuos. Existen industriales que no están dispuestos a pagar los costos de un manejo adecuado de los residuos; ni tienen considerados estos costos dentro de su presupuesto anual. Acuden a empresas especializadas en el manejo de residuos peligrosos sólo cuando la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente los amenaza con cerrarles sus instalaciones o con multarlos por una elevada suma. Por otro lado, existen empresas trasnacionales que en México manejan sus residuos de manera inadecuada, en comparación con el manejo que les dan en sus países de origen o en otros de mayor desarrollo y exigencia que el nuestro. En lo que se refiere a la población en general, no hay una cultura de segregación de los desperdicios; ni una plena conciencia sobre la necesidad de preservar la naturaleza y de mantener limpios los lugares públicos.

2.- No existen suficientes instalaciones para el tratamiento, disposición, y reciclaje de los residuos. Baste mencionar que sólo existen dos confinamientos de residuos peligrosos en operación: uno en Mina, Nuevo León; y el otro en Las Víboras, Sonora. Y todavía ningún incinerador, excepto aquellos para el uso privado de las empresas propietarias, específicamente de la industria farmacéutica. Por otro lado, en algunos aspectos, las empresas que se dedican al manejo de los residuos no cumplen con *estándares* de calidad internacionales. Un ejemplo claro es la transportación de los residuos. La gran mayoría de los transportistas no cumplen con todas las normas de seguridad que exige la legislación nacional; y menos con las

especificaciones internacionales. Entre otras carencias, una de las importantes es la inadecuada capacitación de su personal.

La insuficiencia de infraestructura para el manejo de los residuos tanto industriales como municipales dificulta el cumplimiento de la normatividad ambiental y ocasiona que los costos de este manejo sean más elevados.

3.- Hay un limitado sistema de control y monitoreo sobre el cumplimiento de la ley. Lo anterior está íntimamente relacionado con el centralismo que existe en materia de residuos peligrosos, ya que la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente otorga competencia a las entidades federativas y municipios solamente en lo que se refiere a la regulación del manejo de los residuos no peligrosos, y reserva a la Federación todo lo relacionado con el manejo de los materiales y residuos peligrosos.²⁵ Asimismo, hay una insuficiencia de recursos humanos bien formados en las disciplinas ambientales, y los que alcanzan un nivel de preparación superior, como los que se forman en el extranjero con conocimientos de vanguardia, a su regreso a México no reciben un sueldo satisfactorio y prefieren trabajar en la iniciativa privada en lugar de en el sector público. Esto impide la formación de cuadros dedicados al control del cumplimiento de la legislación, y a su mejoramiento y actualización.

La insuficiencia en la capacidad de inspección y control, y la falta de infraestructura entre otras causas, impiden o dificultan el cumplimiento de la legislación vigente, y la existencia de una política ambiental segura y eficiente a nivel nacional.

A pesar de nuestras carencias, existen signos de mejoría motivados por una conciencia creciente de los industriales respecto al cuidado de la ecología, y también, por la crisis económica por la que atraviesa el país. Estos signos se reflejan en la tendencia de las industrias a reducir su generación de residuos; y a reutilizarlos en sus propios procesos productivos, o en otros. En este sentido, es alentadora la función de los recicladores de solventes, y la recuperación de energía a partir de residuos orgánicos, utilizados como combustibles alternos en hornos cementeros, tema específico de esta tesis, sobre el que se abundará más adelante.

Se espera que, entre otras causas, El Tratado de Libre Comercio de América del Norte, aliente en el corto plazo al mejor cumplimiento de los requisitos de un manejo adecuado de los residuos peligrosos; y a que, en el mediano plazo, exista en México una infraestructura más amplia y moderna; y una cultura industrial acorde con la preservación y el mejoramiento del ambiente.

²⁵ SEDUE, *op.cit.*, Art. 5º, fracción XIX.

2.- LA TECNOLOGIA DEL USO DE RESIDUOS ORGANICOS, COMO COMBUSTIBLE ALTERNO EN HORNO DE CLINKER.

2.1. GENERALIDADES

Como se describió en el capítulo anterior, el confinamiento de los residuos orgánicos requiere de un tratamiento previo de encapsulamiento o estabilización. Sin embargo, aun cuando se les apliquen estos tratamientos, existe el riesgo de que se filtren al subsuelo, debido a la movilidad de sus moléculas. Por estas razones, aunado a que los materiales orgánicos son combustibles, es preferible destruirlos térmicamente mediante incineración. De hecho en Estados Unidos de América, desde 1980 tomó el carácter de ley el *Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)*. A partir de ese año, se definió en aquel país que una gran cantidad de residuos tendrían que ser destruidos térmicamente¹. Y a partir de 1986 se estableció la primera prohibición expresa para confinar los residuos provenientes de disolventes gastados, clasificados en los códigos F001 al F005 del mencionado *RCRA*, tales como hidrocarburos clorados, alcoholes y compuestos aromáticos entre otros (ver listado de residuos en el Capítulo 3 de la presente tesis). La prohibición se aplicó a los residuos que entraban dentro de esta clasificación, excepto a aquellos cuya baja concentración permitiese su tratamiento y posterior confinamiento. Dicha prohibición se llamó *Landban*, y surgió a raíz de la contaminación del suelo en confinamientos de residuos peligrosos. Empresas que habían confinado residuos como los mencionados, cuyo tratamiento no fue el adecuado para evitar la contaminación del suelo, tuvieron que desenterrarlos y pagar los costos de la remediación de los suelos dañados.

Por su parte, el reciclaje de solventes es una práctica ambiental benéfica, pero que sólo es rentable para los recicladores cuando se trata de sustancias con un valor relativamente alto en el mercado. Ejemplos de este tipo de solventes son : Tolueno, acetato de etilo, metil-isobutil-cetona (MIBK), cloruro de metileno, dicloroetano y tricloroetano, entre otros.

Cuando no es rentable reciclar los residuos orgánicos, su destrucción térmica es el método de disposición final más adecuado desde el punto de vista ambiental; sin embargo, es de los métodos más caros debido al combustible que es necesario quemar como fuente de energía, y a los costos de construcción y operación de un incinerador.

Un método que combina las ventajas de la incineración a un costo mucho menor, consiste en aprovechar el calor de combustión de algunos residuos orgánicos y utilizarlo como fuente de energía de

¹ CHEMICAL WASTE MANAGEMENT, INC. 1992. CWM Basics on Selling Fuels. Chicago, Ill.: CWM INC. pág. 3.

algún proceso productivo, sustituyendo el combustible convencional derivado del petróleo. Este el caso de la tecnología para quemar residuos orgánicos en hornos de clinker. La aplicación de esta tecnología permite la destrucción completa de los residuos debido a las altas temperaturas de operación de dichos hornos; y significa un considerable ahorro de energía, para una industria intensiva en el uso de este insumo. El *clinker*, como se describirá más adelante, es un producto intermedio previo al cemento, resultante de la calcinación de las materias primas en un horno a una temperatura del orden de 1200 °C.

Adicionalmente a la ventaja que representa el ahorro de energía, desde el punto de vista de las estrategias del manejo seguro de los residuos peligrosos, su combustión en hornos de clinker implica un método de *reciclamiento*, puesto que se aprovecha su calor de combustión. Por lo mismo, significa también participar en las estrategias de minimización de residuos; ya que al sustituir combustible convencional, se deja de utilizar un recurso energético no- renovable que también genera residuos en forma de gases de combustión y de cenizas.

El uso de los residuos orgánicos como combustibles en hornos de cemento se remonta a la década de los años 60; y su primer uso documentado se verifica después de la crisis del petróleo en 1973, cuando los fabricantes de cemento empezaron a buscar combustibles no convencionales más baratos, a los que llamaron "combustibles alternativos". Siendo el móvil el ahorro de energía, posteriormente se dieron cuenta de que sus hornos podían ser una solución ambiental segura para la destrucción de muchos de los residuos orgánicos generados por sus comunidades.

La prueba de la viabilidad de esta tecnología ambiental y energética, es que sólo en la parte de Europa que antes se llamaba Occidental, más de 80 plantas cementeras la utilizan. Por su parte, en Estados Unidos la utilizaban 25 de las 98 cementeras activas; y existe una proyección que indica que en 1995 el número ascenderá a 56.²

2.2. BREVE DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION DEL CEMENTO PORTLAND.

El proceso de manufactura del cemento en forma resumida, se define como la calcinación hasta el punto de fusión, de la mezcla de materias primas rigurosamente homogeneizada, consistente en caliza, arcilla y óxido de fierro. De tal calcinación, se obtiene un producto intermedio denominado *clinker*, mismo que mezclado con yeso, da por resultado el cemento *Portland*.

² J.D. Smith, B. Strand. 1992. *Cement and Lightweight Aggregate Kilns 1992*. August Digest. pág. 25-35. Citado por CWM de México, S.A de C.V. "Presentación a Sedesol de un Programa de Combustibles Suplementarios". México, D.F. 1993.

A continuación se enlistan las etapas de este proceso de manufactura; desde la obtención de las materias primas, hasta su empaque para su posterior venta en el mercado. Dentro de estas etapas, se destaca la denominada *clinkerización*, que constituye el “corazón” del proceso, y en la cual se aplica la tecnología sobre la que versa la presente tesis.

1) *Selección de las canteras* de las dos materias primas básicas: caliza y arcilla. Se realizan pruebas con rayos X para garantizar la calidad de la piedra caliza y de la arcilla respectivamente.

2) *Barrenación y Explosión de las canteras*: Una vez seleccionadas las canteras, se barrenan; esto es, se perforan con orificios de 12 centímetros de diámetro por 9 metros de profundidad, utilizando equipos neumáticos de alta potencia. Dentro de los barrenos, se colocan explosivos con capacidad para derribar paredes de roca de hasta 7 metros de ancho. Los explosivos utilizados son de tecnología avanzada y generan gases que presionan, fraccionan y derriban los bloques de cantera, convirtiéndolos en piedras de diferentes tamaños. Estas son transportadas hasta las plantas en camiones tipo *trailers* de 30, 40 y hasta 50 toneladas de capacidad.

3) *Trituración y prehomogeneización de las materias primas*: Una vez que las materias primas han llegado a la planta, en instalaciones separadas, se reduce su tamaño a piedras de máximo de 2.5 cm. Para ello se utilizan trituradores de martillos. Posteriormente, las piedras pequeñas resultantes se transportan mediante bandas. La arcilla se somete a un proceso de prehomogeneización, que consiste en la combinación proporcional de sus diferentes tipos. Después de esta operación, mediante secado se elimina la humedad que contiene desde la cantera.

4) *Alimentación dosificada de materias primas*: A la caliza y a la arcilla se añade una nueva materia prima, el óxido de hierro. Las tres materias primas son almacenadas por separado en silos. Debajo de cada silo hay una banda transportadora. Estas avanzan a distinta velocidad, depositando los materiales proporcionalmente en una banda común. Para el cemento de uso normal, la proporción de las materias primas es 59% de caliza, 40% de arcilla, y 1% de óxido de hierro.

5) *Molienda de la “harina cruda”*: Una vez combinadas la caliza, la arcilla y el óxido de hierro en forma proporcional, se introducen en un molino rotatorio de bolas de acero. En éste, debido a su movimiento, las bolas de acero chocan entre sí y contra las paredes del molino, pulverizando y mezclando las materias primas. Al polvo resultante de esta molinada se le llama “harina cruda”. Esta es almacenada en silos llamados de homogeneización, previamente a su calcinación. Mediante un espectrómetro de rayos X se controla su calidad. Dependiendo de este análisis, se ajusta la proporción de materiales antes de entrar al molino.

6) *Formación del clinker:* De los silos de homogeneización, la harina cruda es transportada hasta un precalentador, y posteriormente es precalcinada y calcinada en el horno rotatorio que constituye el corazón del proceso. Este horno es un enorme cilindro de acero, de 60 a 100 metros de largo, cuyo interior se encuentra totalmente recubierto de ladrillo refractario. Su giro es permanente y su ligera inclinación hace que la harina cruda introducida por el lado más elevado se desplace por gravedad hacia la parte baja. El interior del horno tiene diferentes zonas de calor, la más elevada llega a los 1450 °C, aquí la materia prima es transformada en distintos compuestos, predominando los silicatos cálcicos, principales componentes del cemento. Los gases del horno, cargados de polvo, pasan por un colector de polvos, y éstos son enviados nuevamente al horno.

El *clinker* es un producto intermedio del proceso, resultante de la calcinación de las materias primas. La elevada temperatura dentro del horno hace que la *harina cruda* se funda y se transforme en *clinker*, en forma de bolas de hasta 3 cm de diámetro, mismas que al salir del horno y enfriarse adquieren un color gris verdoso.

El proceso de clinkerización dentro del horno se controla a través de un sistema de control distribuido, ubicado en una sala de control del proceso.

7) *Trituración del Clinker:* Después de que el clinker sale del horno, es enfriado y transportado a un triturador que separa las bolas de clinker que vienen adheridas entre sí. Algunas muestras de este material son analizadas en un laboratorio donde se comprueba su calidad.

A partir de esta etapa del proceso, el clinker puede ser transportado a otras plantas nacionales o hacia los mercados de exportación.

8) *Incorporación del yeso en la manufactura del cemento:* La última materia prima que se incorpora al proceso es el yeso, cuya función es alargar el tiempo de fraguado del cemento. Los bloques de yeso se trituran, y el polvo resultante se muele junto con el clinker.

9) *Dosificación del clinker y del yeso:* El clinker y el yeso son conducidos desde sus respectivos silos, a unas tolvas separadas entre sí. Desde allí, ambos materiales son alimentados en proporciones muy diferentes a una banda común. El clinker en proporciones de 94 a 95%; y el yeso, en proporciones de 5 a 6%. La banda lleva ambos materiales al molino de cemento.

10) *Molienda de cemento:* El clinker y el yeso pasan a un molino igual al de harina cruda, que contiene dos compartimentos. Uno con bolas de acero de 50 a 80 milímetros de diámetro, y el otro con bolas de 20 a 25 milímetros. El molino, en forma de cilindro gira a gran velocidad, convirtiendo en polvo los materiales contenidos. Las plantas cuentan con molinos capaces de moler un promedio de 160 toneladas por hora.

11) *Transporte y ensacado del cemento Portland*: De los silos de cemento, el destino del producto final depende de su venta. Si esta se hace a granel, el cemento es transportado en buques mercantes, carros tanque de ferrocarril y camiones pipa. En estos dos últimos casos, los contenedores de estos vehículos se colocan directamente debajo del silo de cemento para ser llenados. Después se cierran herméticamente, permitiendo que el producto se conserve en perfecto estado. Sin embargo, gran parte del cemento se vende en sacos de 50 kilogramos. Para el ensacado, los operadores accionan las máquinas que automáticamente descargan el contenido exacto en cada saco, lo cierran y lo envían a las bandas conductoras, cuyo destino final son los medios de transporte³.

2.3. PROCESO DE FABRICACION DEL CLINKER.

Una vez que las materias primas son molidas y homogeneizadas de acuerdo con la descripción anterior comprendida en los puntos (1) a (5), se calcinan en el horno. El producto de esta calcinación es el material llamado *clinker*.

Los cuatro pasos en el proceso de formación del clinker son:

- Deshidratación.
- Descarbonatación
- Calcinación y *clinkerización*
- Enfriamiento.

Las principales reacciones químicas se detallarán más adelante.

El clinker es un material intermedio entre las materias primas y el cemento. Consiste principalmente de silicatos cálcicos.

Los principales componentes del clinker son los siguientes:

Silicato tricálcico (Alita):	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Silicato dicálcico (Belita):	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Aluminato tricálcico :	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
Aluminoferrita tetracálcica:	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

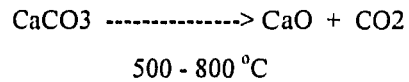
³ Grupo Cementos Mexicanos. Proceso de Fabricación del Cemento Portland.

A continuación se presentan los porcentajes de los compuestos que dan origen a los silicatos cálcicos y a otras sales minoritarias, de acuerdo a especificaciones generales de calidad del clinker⁴:

Oxido de calcio	CaO	65 - 68%
Dióxido de silicio	SiO ₂	20 - 23%
Oxido de aluminio	Al ₂ O ₃	5 - 6.5%
Oxido de fierro (III)	Fe ₂ O ₃	3 - 4%
Oxido de magnesio	MgO	1.3 - 2%
Oxido de níquel.	Ni ₂ O	0.7 - 1.2%
Oxido de potasio.	K ₂ O	0.7 - 1.2%

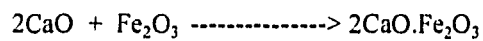
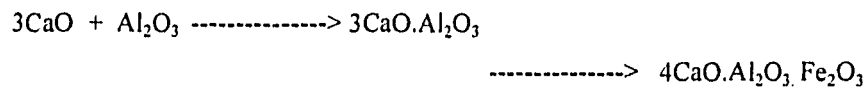
Reacciones que se llevan a cabo en la formación del clinker:⁵

1.- Decarbonatación de la calcita:



(Fuertemente endotérmica, calor de reacción estándar: 425 kcal / kg)

2.- Calcinación (neutralización rápida de la cal):



Fusión de ambos a más de 1230 °C



3.- Calcinación (formación de alita: reacción lenta).



⁴ Chemical Waste Management de México, S.A. de C.V. 1993. El Uso de Residuos Industriales Peligrosos Como Combustibles Alternos en el Proceso de Manufactura del Cemento. México, D.F.

⁵ Gossman, D. 1989. Excerpt From the Review of New EPA Proposed Regulations on Organic Emissions from Cement Kiln Burning Hazardous Waste Fuels. Hampshire, Ill. : Gossman Consulting Inc.

Descripción de la operación de un horno de clinker:

Un horno de clinker es una unidad térmica rotatoria con forma de cilindro acostado, que tiene una ligera inclinación, de 3 a 4 grados con respecto a la horizontal; y con una rotación de una a cuatro revoluciones por minuto. El cilindro está recubierto en su interior por ladrillo refractario. Mide aproximadamente 60 metros de longitud; con diámetros que oscilan entre 4 y 5 metros. Existe una gran variedad de hornos. En México, la inmensa mayoría cuentan con una sección vertical, anterior al cilindro llamada *precalentador*, y por ello, dicho cilindro tiene dimensiones semejantes a las mencionadas. Hornos de tecnología más antigua, como muchos de los que existen en Estados Unidos de América, constan de un cilindro rotatorio que tiene incluida la sección equivalente al precalentador; y por ello sus dimensiones son mucho mayores: longitudes de 150 a 200 metros, y diámetros del orden de 6 metros.

La materia prima llamada *crudo*, típicamente piedra caliza, arena y arcilla provenientes de un proceso de molienda y homogeneización, se almacenan en un silo, tal como se describió anteriormente. De dicho silo se alimentan al precalentador, donde se lleva a cabo la etapa de deshidratación. Posteriormente, ya deshidratada, ingresa a la parte alta del horno. Su acción rotatoria y su inclinación hacen que el crudo se mueva a lo largo del cilindro hacia el extremo bajo, de mayor temperatura. Conforme la materia prima se mueve a lo largo de horno es sometida a calentamiento por la acción de combustión.

En primera instancia, el crudo es deshidratado, desprendiendo vapor de agua. Posteriormente, en la etapa de descarbonatación desprende dióxido de carbono, formándose el óxido de calcio; y finalmente, en el extremo más caliente del horno, en la etapa de calcinación, ocurren las reacciones químicas de formación de las moléculas complejas de silicato de calcio, principal constituyente del clinker. El calor de combustión de los combustibles utilizados es la fuente de energía que permite que se lleven a cabo las reacciones de formación del clinker. De Todo el proceso, la principal en el consumo de energía es la de descarbonatación, por la que se forma el óxido de calcio, constituyente principal de los silicatos cálcicos que componen el clinker.

Las condiciones de temperatura del proceso de formación del clinker, en sus diferentes etapas, son las siguientes:

ETAPA	SECCION DEL HORNO	INTERVALO DE TEMPERATURA
1.- Deshidratación	Precalentador (previo al horno)	30-400 °C
2.- Descarbonatación	Extremo frío	500-800 °C
3.- Calcinación	Parte media	1,100-1,300 °C
4.- Clinkerización	Extremo caliente	1,400-1,500 °C

La etapa de *clinkerización*, que a decir de los expertos es un término cuyo uso depende de los autores especializados en el tema, es aquella en la que se mezclan los silicatos cálcicos para formar el clinker.

Posteriormente a la clinkerización, antes de que el clinker formado salga del horno, se enfría de 1500 a 1,200 °C aproximadamente. Esto se debe a que la zona final del horno es más fría, debido a que se encuentra debajo de la flama y no recibe directamente el influjo de la radiación.

Una vez que el clinker ha salido del horno, existe una sección del proceso específicamente destinada al enfriamiento por medio de aire. Este enfría al clinker desde 1200 hasta 150 °C. El aire caliente se aprovecha en el horno como aire secundario de combustión.

Por su parte, los gases de combustión alcanzan temperaturas máximas de 2,200 °C en el extremo caliente; de 1,300 °C en la parte media; y de 600 °C en el “extremo frío” del horno.

Los combustibles son alimentados al horno por el extremo opuesto, a contracorriente con respecto a la materia prima; es decir, por el de menor altura debido a la inclinación del horno. Estos pueden ser :

- Carbón
- Gas natural
- Combustóleo
- Combustibles alternos derivados de residuos

Estos últimos sustituyen a una fracción del requerimiento total de los energéticos mencionados. Esta sustitución comunmente oscila entre el 10 y el 15% en México.

Los gases de combustión, principalmente dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, fluyen hacia el extremo de baja temperatura (la parte alta del horno), precalentando la materia prima. Los gases ácidos son neutralizados por la cal que entra como materia prima.

El polvo de cemento es un subproducto del proceso arrastrado por los gases de combustión. Es clinker que reaccionó parcialmente. Los hornos están diseñados para recircular la mayor parte, y que pase a formar parte del clinker. El resto es colectado por un filtro de bolsas que evita sea emitido a la atmósfera.

A continuación, en la *Figura 1*, se presenta en forma simplificada el diagrama de flujo de un horno común para la manufactura de clinker. En la *Figura 2*, se presenta un horno especial, cuya combustión es más eficiente debido al equipo adicional llamado precalcinador.

FIGURA 1

DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DE UN HORNO ROTATORIO PARA LA FABRICACION DE CLINKER

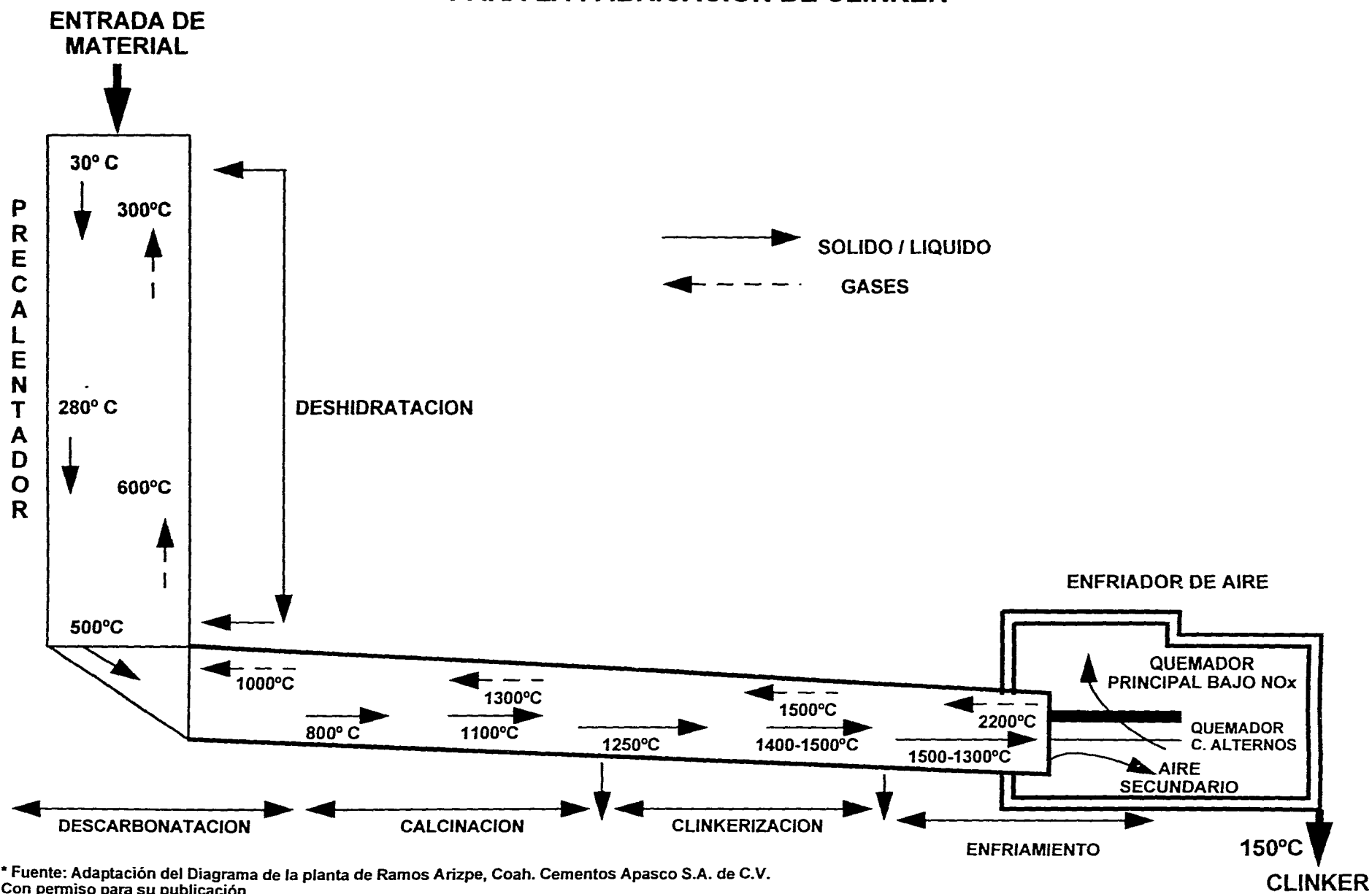
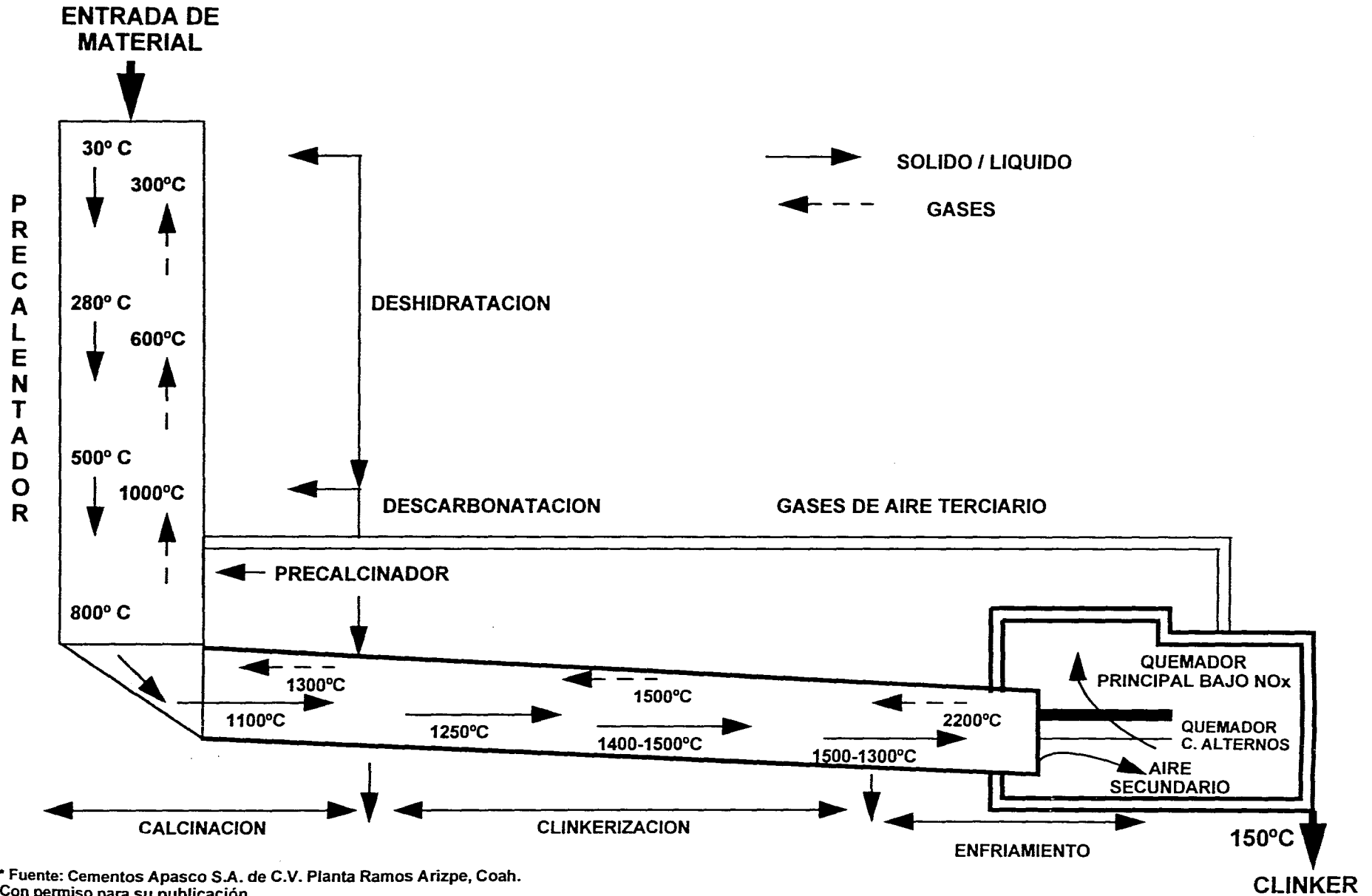


FIGURA 2

DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DE UN HORNO ROTATORIO CON PRECALCINADOR, PARA LA FABRICACION DE CLINKER



* Fuente: Cementos Apasco S.A. de C.V. Planta Ramos Arizpe, Coah. Con permiso para su publicación.

Condiciones de Operación y Características de un Horno de Clinker Común:

A continuación se mencionan estas características:

LONGITUD:	60 a 152 m (200 - 500 ft)
DIAMETRO:	4 a 6 m (12 - 20 ft)
INCLINACION CON RESPECTO A LA HORIZONTAL:	2.7 a 3.6 grados.
TURBULENCIA DE LOS GASES: NUMERO DE REYNOLDS:	superior a 100,000
TIEMPO DE RESIDENCIA DE LOS GASES DENTRO DEL HORNO:	20 a 40 segundos.
TASA DE ALIMENTACION APROXIMADA DE MATERIA PRIMA:	200 ton / hr
TASA DE PRODUCCION DE CLINKER APROXIMADA:	125 ton / hr
VELOCIDAD DE ROTACION (RPM):	2.8 RPM
TEMPERATURA DE ENTRADA:	30 ° C
TEMPERATURA EN LA ZONA DE CALCINACION:	1,100 ° C
TEMPERATURA EN LA ZONA DE CLINKER:	1,500 ° C
TEMPERATURA DE SALIDA:	1,300 ° C
REQUERIMIENTO ENERGETICO:	1,000 kcal/kg de clinker.

2.4. DESCRIPCION DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS EN HORNOS DE CLINKER.

Un combustible alternativo es una mezcla de residuos orgánicos, predominantemente de disolventes y aceites, provenientes de diversos procesos industriales, que puede ser utilizada con una finalidad energética en otro proceso productivo; en este caso, el de manufactura de cemento.

Los dos objetivos de quemar combustibles alternos en hornos de clinker son los siguientes:

- 1) La destrucción térmica de los residuos, con una eficiencia del orden del 99.9%.
- 2) La recuperación de energía debida al calor de combustión de dichos residuos.

Lo que hace posible utilizar hornos para la fabricación clinker, como medio alternativo de incineración de residuos, son sus características de construcción y las condiciones de su operación. Dentro de éstas destacan tres, llamadas "las tres T's":

- Temperatura de operación del horno.
- Turbulencia de los vapores y gases.
- Tiempo de residencia de los vapores y gases

Dichas condiciones, garantizan la destrucción térmica debida a la completa combustión de prácticamente cualquier residuo orgánico.

Operación de un Horno de Clinker que Utiliza Combustibles Alternos

El uso de los combustibles alternos no debe alterar las condiciones de operación del horno, y normalmente puede sustituir al combustible convencional en una fracción de hasta el 40%, dependiendo de las exigencias en materia de legislación ambiental de cada país. En Estados Unidos de América este porcentaje de sustitución es común; e incluso, existen hornos con un nivel del 100%. En México no existe un apartado de la legislación especial que regule la aplicación de esta tecnología; sin embargo, las compañías cementeras que la utilizan, sustituyen de un 10 a un 15% de combustóleo por combustible alternativo. Una de las razones de este bajo nivel de sustitución es la insuficiente recolección de residuos destinados a este propósito; y otra, que en México esta tecnología es bastante reciente, y no se tiene la experiencia que garantice su uso confiable.

En el caso de los combustibles alternos líquidos, y sólidos pulverizados, su alimentación al horno de clinker se hace en el mismo lugar en que se alimenta el combustóleo, pero a través de un quemador especial, y de una válvula de control autónoma, que se cierra automáticamente si se detecta cualquier desviación de las condiciones óptimas de operación. Si esto ocurriese, de inmediato se abriría la línea de combustóleo pesado.

Uno de los combustibles alternos sólidos más comunes, son las llantas usadas. En este caso, su alimentación al horno se realiza en la sección opuesta a la correspondiente a los combustibles líquidos; inmediatamente después del precalentador. En los hornos de tecnología antigua, que es el caso de muchos de los de Estados Unidos de América, los sólidos se alimentan aproximadamente en la zona de calcinación, donde la temperatura es del orden de 1000 °C.

El equipo de control del proceso, mide la temperatura del horno en diferentes zonas, y regula el flujo de combustible de acuerdo a un perfil de temperaturas característico del horno, semejante al mostrado en la *Figura 1*. De esta manera se asegura que el calor de combustión aportado por el combustible alternativo sea el adecuado para el proceso.

Especificaciones de los Combustibles Alternos

Estas se resumen en las siguientes: Especificaciones relacionadas con el proceso de manufactura del clinker; especificaciones relacionadas con aspectos de higiene y seguridad industrial; y, especificaciones de la legislación.

1) Especificaciones relacionadas con el proceso:

Su objetivo es asegurar que los combustibles alternos formulados a partir de residuos peligrosos no afecten al horno, ni al proceso de manufactura del cemento; especialmente, en su etapa denominada clinker. La mezcla de residuos con los que se formulan los combustibles alternos debe cumplir con especificaciones relacionadas con las siguientes propiedades fisicoquímicas:

- Calor de combustión
- Composición
- Viscosidad.

Estas especificaciones están encaminadas a proteger y asegurar los siguientes aspectos:

- La calidad del producto (el clinker)
- La estructura del horno
- La facilidad de manejo del combustible.⁶

Más adelante, se analizará el impacto de las propiedades de los combustibles alternos, en el proceso del clinker.

A continuación, se mencionan las especificaciones fisicoquímicas que deben cumplir los combustibles alternos formulados a partir de residuos orgánicos:

A) Combustibles líquidos:

En la *Tabla No. 1.2*, se mencionan las especificaciones de los combustibles alternos líquidos.

⁶ Gossman, D. Quality Control of Hazardous Waste Fuel. Indiana Waste Exchange. Vol III, No. 5, 1991

TABLA 1.2 ESPECIFICACIONES FISICOQUIMICAS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS LIQUIDOS	
CALOR DE COMBUSTION (Poder calorífico)	> 5,000 kcal / kg
VISCOSIDAD BOMBEABLE:	< 1,000 cp a 22 °C
COMPOSICION: (% en peso)	INTERVALOS Y VALORES MAXIMOS PERMITIDOS
Cloro y otros halógenos	1 - 5 % (dependiendo del horno)
Bifenilos policlorados (PCB's)	< 2 ppm
Azufre	1 - 4%
Humedad	7 - 20%
Sólidos en suspensión	20 - 30%
Cenizas	< 10%
Plaguicidas	2 - 5 ppm
Contenido total de metales:	< 1.48 %
Antimonio	5 - 200 ppm
Arsénico	40 - 100 ppm
Bario	600 - 1000 ppm
Berilio	5 - 6 ppm
Cadmio	100 - 175 ppm
Cromo	600 - 3,000 ppm
Mercurio	1 -50 ppm
Níquel	100 ppm
Plata	100 - 200 ppm
Plomo	4,000 - 6,000 ppm
Selenio	25 - 200 ppm
Talio	20 - 100 ppm
Vanadio	1,000 ppm
Zinc	1,000 - 1,500 ppm

Fuente: Especificaciones de tres empresas nacionales dedicadas a la formulación de combustibles alternos.

B) Combustibles sólidos (Criterios aplicables en E.U.A):⁷

COMPOSICION:	Aplica el mismo criterio que para líquidos.
CALOR DE COMBUSTION (Poder calorífico):	4,400-3,300 kcal / kg

- Empaque: En contenedores de diseño especial que puedan ser alimentados al horno; o bien:

- Transferibles neumáticamente: Algunos hornos utilizan como combustible convencional carbón en grano fino, el cual es alimentado al horno neumáticamente. El combustible alternativo sólido se puede alimentar de la misma manera.

⁷ CHEMICAL WASTE MANAGEMENT, INC. op.cit. pág. 7

En México, el residuo sólido más común para ser quemado son las llantas, y se introducen al horno enteras, ya que el costo de cortarlas dejaría de hacer rentable la sustitución de combustóleo.

Las especificaciones relacionadas con la seguridad e higiene industriales, y los aspectos de legislación se analizarán en el capítulo siguiente.

Logística del Uso de Residuos Orgánicos como Combustibles Alternos en Hornos de Clinker

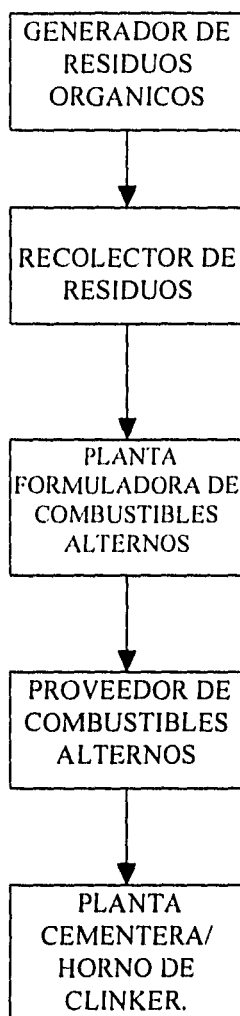
La logística de la aplicación de esta tecnología implica todo los recursos necesarios para poder llevarla a la práctica: desde la recolección de los residuos, hasta la combustión de éstos en los hornos de clinker. En este trabajo no se pretende detallar las necesidades de cada uno de los eslabones; sin embargo, es conveniente enunciar cuáles son los elementos logísticos principales, y cuál es su función.

Los elementos principales para la combustión de residuos orgánicos en hornos de clinker son los siguientes:

- 1) Recolección de los residuos.
- 2) Mezclado y formulación de los combustibles alternos.
- 3) Control de calidad y abastecimiento.
- 4) Combustión en un horno de clinker.

A continuación, se presentan a manera de diagrama los elementos logísticos mencionados y su función: desde la generación de los residuos, hasta su combustión.

DIAGRAMA LOGISTICO DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS



Es la industria que genera residuos, a la cual se le ofrece un método adecuado para su manejo.

Recolecta los residuos del generador y los traslada hasta la instalación donde se les acepta y procesa, o directamente se les quema como combustibles alternos.

Lleva a cabo el mezclado de residuos o *blending*, de acuerdo a las especificaciones fisicoquímicas exigidas por el proceso del clinker, y a las de un horno en particular.

Es el responsable del suministro del combustible alternativo, de su control de calidad, y de su combustión segura en un horno de clinker en particular.

Es la compañía cementera, dueña de un horno para producir clinker, que dispone del equipo y permisos para quemar residuos orgánicos como combustible alternativo.

Dentro de este diagrama de funciones, existe una posibilidad de simplificación, que consiste en evitar el mezclado de residuos para formular los combustibles alternos, lo que en inglés se llama *Fuel blending*. Esto se puede lograr cuando se queman como combustibles alternos, residuos de excepcionales propiedades fisicoquímicas, que garantizan la uniformidad del tipo de combustible, y su calidad. Este es el caso de los aceites lubricantes, que se detallará en el capítulo siguiente de este trabajo.

La simplificación mencionada atañe también al control de calidad del combustible, pues se trata de un mismo tipo de residuo; adicionalmente, significa evitar la inversión en el equipo de mezclado de residuos para la formulación de los combustibles alternos. Este es el esquema de operación de por lo menos una de las compañías cementeras mexicanas que están utilizando combustibles alternos en su proceso de elaboración de clinker.

2.5. IMPACTO DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS EN EL PROCESO DE MANUFACTURA DEL CLINKER.

A continuación, en la *Tabla No. 2.2*, se especifican los aspectos generales del proceso del clinker en los que incide el uso de combustibles alternos formulados a partir de residuos orgánicos.

TABLA No. 2.2 LAS PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS Y SUS EFECTOS RESPECTO AL PROCESO DE MANUFACTURA DEL CLINKER	
PROPIEDAD	PUNTO DE AFECTACION
Contenido de cenizas:	Calidad del producto.
Poder calorífico:	Protección del horno.
Viscosidad:	Facilidad de manejo del combustible.
Tamaño de partícula: (Combustibles sólidos)	Facilidad de manejo del combustible.
Contenido de azufre:	Calidad del producto y protección del horno.
Contenido de metales:	Calidad del producto.
pH	Facilidad de manejo del combustible.
Contenido de halógenos:	Protección del horno y calidad del producto.

* FUENTE: Gossman, D. Quality Control of Hazardous Waste Fuel. Indiana Waste Exchange. Vol III, No. 5, 1991

El uso de combustibles alternos derivados de residuos en hornos de clinker, tiene efecto en 4 áreas de su proceso de manufactura:

- 1) El control del horno y su operación.
- 2) Emisiones del gas de chimenea.
- 3) La calidad del producto; es decir, el clinker.
- 4) La generación y características del polvo de cemento (subproducto).

1) Factores que Afectan el Control del Horno y su Operación:

A) El calor de combustión: Afecta al horno debido a que los cambios significativos en esta propiedad, producirían variaciones bruscas en el perfil de temperatura característico del horno, que dañarían su estructura. Por otro lado, el flujo de combustibles que ingresa al horno depende directamente de su calor de combustión o poder calorífico. Por ello, es necesario conocer previamente esta propiedad para determinar el flujo de alimentación adecuado.

B) Contenido de cloro: Esta propiedad química de los combustibles alternos tiene graves consecuencias en los hornos de clinker. Por ello, el contenido de cloro en las mezclas de residuos con las que se formulan los combustibles alternos, está restringido a porcentajes que varían entre el 1 y el 5% en peso. La tolerancia de cloro depende de las características de construcción de cada horno.

El cloro que ingresa al horno vía los combustibles alternos; es decir, en la zona de combustión, se transforma en cloruro de hidrógeno gaseoso. Un horno de clinker de cemento puede lavar gases ácidos, en razón del flujo de material cáustico que ingresa al horno, (tal como la cal.); de la gran turbulencia que sufren los gases dentro del horno; y, de su alto tiempo de residencia. El número de Reynolds típico de un horno de clinker es ligeramente mayor a 100,000; y el tiempo de residencia de los gases es de aproximadamente 20 a 40 segundos.

Sin embargo, la capacidad natural de los hornos de clinker para lavar gases ácidos es limitada y depende del contenido de sodio y potasio en la materia prima alimentada. Estos forman cloruros. Los niveles de estos elementos son regularmente monitoreados durante las operaciones de rutina de dichos hornos. Cuando se rebasa la capacidad de los hornos para formar cloruros de sodio y potasio, se inicia la formación de cloruro de calcio, metal abundante en el proceso. En este momento, los fenómenos que ocurren dentro del horno son los siguientes:

1.- Exactamente cuando la capacidad de manejar cloro es rebasada y se forma cloruro de calcio, se genera una corriente de recirculación de este compuesto dentro del horno. La razón es que el cloruro de calcio se sublima al estar cerca de la de flama, en la zona de alta temperatura; y el gas, al acercarse a la zona de baja temperatura, se solidifica nuevamente, reiniciándose el ciclo.

2.- Como continuación del fenómeno se forma una costra de cloruro de calcio que se incrusta en las paredes del horno, obstaculizando la salida de los gases de combustión, especialmente en las zonas estrechas, y afectando las propiedades del revestimiento refractario.

C) Contenido de azufre: se forman sulfatos y sulfitos de calcio, que al igual que los cloruros, tienden a formar una costra que incrusta las paredes del horno en su zona de baja temperatura, y obstaculizan el flujo de los gases de combustión.

2) Factores que Afectan a las Emisiones del Gas de Chimenea:

A) Oxidos de Nitrógeno: Se generan principalmente debido al nitrógeno fijo contenido en los combustibles. Por ello, su presencia en los combustibles alternos está limitada.

B) *Monóxido de carbono*: es casi nula su presencia en los gases de chimenea. La razón es que la elevada temperatura de combustión dentro del horno; el tiempo de residencia y la turbulencia de los gases dentro del horno, garantizan una combustión prácticamente completa, superior al 99%.

La presencia de dióxido de azufre, otro gas tóxico cuya emisión a la atmósfera también debe ser controlada, es nula en el caso de las emisiones generadas por los hornos de clinker. Esto se debe a que en condiciones de pH básico de los hornos, el gas se transforma a sulfatos y sulfitos de calcio, que se incorporan al clinker. El contenido de azufre en los combustibles alternos está limitado a 4% en peso. Sin embargo, este nivel es comparable, e incluso menor al contenido del mismo elemento en el combustible pesado⁸ utilizado como combustible convencional en el proceso del clinker. Normalmente, los combustibles alternos tienen un contenido de azufre mucho menor al 4%.

Los gases de combustión son principalmente dióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno y agua. Estos salen del horno por el extremo de baja temperatura y precalientan la materia prima que ingresa. Las partículas las constituye el llamado *polvo de cemento*, que es materia prima que reaccionó parcialmente, el cual es retenido por filtros de bolsas para evitar su emisión a la atmósfera.

Con respecto a las emisiones de partículas, óxidos de nitrógeno y de dióxido de azufre, cualquier programa de combustibles alternos debe someterse a lo que especifica la Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994 referente a la contaminación atmosférica por fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos. Dicha Norma establece el límite de emisiones para diversas instalaciones, de acuerdo con su capacidad de combustión. El caso de los hornos de clinker es el de aquellas con capacidad mayor de 110,000 Mega Joules por hora.

Los límites que fija la Norma en cuestión son⁹:

TIPO DE COMBUSTIBLE	PARTICULAS mg/m ³	BIOXIDO DE AZUFRE (SO ₂) ppm V	OXIDOS DE NITROGENO. ppm V
Sólido	ZC = 325; RP = 435	ZC = 2,100; RP = 2,600	ZC = 280; RP = 400
Líquido.	ZC = 325; RP = 500	ZC = 2,100; RP = 2,600	ZC = 280; RP = 400

ZC: Zona crítica. RP: Resto del País.

⁸ El contenido de azufre para los centros de producción en: Cadereyta, N.L.; Minatitlán, Ver, y Tula, Hgo. es de 3.8% máximo. Y para Madero, Tamps. y Salina Cruz, Oax., de 4.6% máximo. PEMEX. Especificación No. 503/93 para combustible pesado.

⁹ SEDESOL. 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-085-Ecol-1994. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación del 2-XII-94. págs. 5-18

La proporción de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno es mínima, debido a las condiciones de operación de los hornos, que permiten una combustión prácticamente completa; y a que la correcta selección de los residuos empleados para formular el combustible alternativo, implica entre otras cosas, mantener en un nivel mínimo el porcentaje de los compuestos que contienen nitrógeno. Por su parte, los gases ácidos son neutralizados por la cal que entra como materia prima. El polvo de cemento, otro subproducto, es el mismo que cuando se utilizan combustibles convencionales y tiene el mismo destino que se describió anteriormente.

C) Bifenilos Policlorados: Esta molécula está completamente vedada como componente de los combustibles alternos. Su combustión en hornos de clinker, da por resultado la formación de dioxinas sumamente tóxicas que escapan a través de los gases de chimenea.

No existe ningún proceso térmico para destruir metales. Los metales contenidos en los combustibles alternos se enlazan químicamente a la estructura del clinker. Esta reacción química evita que sean emitidos a la atmósfera. Sin embargo, existen restricciones importantes respecto a su contenido, que se analizarán posteriormente en este mismo capítulo, ya que niveles específicos de concentración de algunos de éstos, pueden afectar la calidad del clinker producido. Dependiendo de la volatilidad de los metales, éstos se concentran en el clinker; o bien, en el polvo de cemento, subproducto del proceso.

3) Factores que Afectan al Clinker

A) Contenido de azufre: El dióxido de azufre generado en la combustión, debido al medio alcalino predominante en el horno, se transforma en sulfatos y sulfitos de calcio, que se incorporan al clinker. Para evitar la formación de un exceso de estas sales, se restringe el contenido de azufre de los combustibles alternos a un nivel máximo del 4%, semejante al contenido en el combustóleo pesado. Sin embargo, es muy improbable que aquellos combustibles siquiera alcancen un contenido de azufre del 4%.

B) Contenido de flúor: su presencia en los combustibles alternos puede atribuirse al uso de recubrimientos de aluminio gastados, utilizados en el acabado de metales. Tiene efectos tanto positivos como negativos, dependiendo de su concentración. Afecta directamente al clinker. El nivel promedio de flúor en el clinker es inferior al 0.1%. Si se usan combustibles alternos, se puede permitir que se incremente su composición hasta un 0.4%, siendo éste su nivel óptimo. Esto favorece un ahorro de combustible debido a que la presencia de flúor en este nivel promueve la formación del clinker a menor temperatura. Sin embargo, concentraciones mayores al 0.4% tienen como consecuencia la formación de una cantidad excesiva de fluorosilicatos de calcio que afectan el fraguado apropiado del cemento portland.

El contenido de cloro en los combustibles alternos no tiene efecto en el clinker; sino en el horno, como se explicó anteriormente. De hecho, al cemento portland, dependiendo del tipo de construcción civil, se le agrega una porción mínima de cloruro de calcio como aditivo que acelera el fraguado del cemento.

C) *Contenido de cenizas:* Los constituyentes típicos de las cenizas son calcio, aluminio, silicio y fierro, todos ellos compatibles con el clinker. Sin embargo, su contenido en los combustibles alternos está limitado a un máximo 10% para evitar que al incorporarse al clinker, los niveles de estos metales excedan las especificaciones de este producto.

4) Factores que Afectan al Polvo de Cemento. Subproducto del Proceso

Los metales relativamente volátiles tienden a concentrarse en el polvo de cemento, ya que éste es clinker que no se formó totalmente, y que es arrastrado por los gases de combustión, en zonas de temperatura inferior a la señalada en la etapa de clinkerización ubicada en el extremo caliente del horno. Ejemplos de estos metales son: el cadmio, el vanadio y el talio. De cualquier forma, su presencia en los combustibles alternos es prácticamente nula, por lo que dicho factor incide muy poco en el proceso del clinker.

A continuación, en la Tabla No. 3.2 se explica el efecto de varios metales en el proceso del clinker, de acuerdo a información experimental obtenida en pruebas realizadas en hornos de los Estados Unidos de América.

TABLA No. 3.2 EFECTO DE LOS METALES EN EL PROCESO DE MANUFACTURA DEL CLINKER		
METAL	CONCENTRACION MAXIMA EXPERIMENTADA EN EL COMBUSTIBLE ALTERNO	EFEECTO
Antimonio	6.5 - 49 ppm	Se concentra en el clinker.
Arsénico	200 ppm	Altera la estructura cristalina del cemento y forma compuestos térmicamente estables. Por ejemplo el arsenato de potasio, que funde a 1310 °C.
Bario	110 - 610 ppm	Se encuentra en el material de alimentación y tiende a sustituir al calcio en las reacciones.
Berilio	< 1 ppm	Muy estable. El punto de ebullición del óxido de berilio, BeO, es de 3900 °C.
Cadmio	6.5 - 71 ppm	Se volatiliza y se concentra en el polvo de cemento generado como subproducto, en proporción directamente proporcional a la concentración de este metal en el combustible alterno.

et seq.

CONTINUA TABLA No. 3.2

METAL	CONCENTRACION MAXIMA EXPERIMENTADA EN EL COMBUSTIBLE ALTERNO	EFEECTO
Cromo	60 - 280 ppm	Debido a su alto punto de ebullición, 2672 °C, se concentra en el clinker. Su riesgo es que, por las condiciones de oxidación en el horno, una fracción se presente como cromo hexavalente (Cr^{+6}), el cual es tóxico y penetra por la piel de los trabajadores que están en contacto con el cemento.
Plomo	350 - 1800 ppm	Se acumula principalmente en el polvo de cemento. Sin embargo, una parte se acumula en el clinker, la cual, si excede de una concentración específica de 1,000 ppm, puede retardar significativamente el tiempo de fraguado del cemento.
Mercurio	0.4 ppm	La experiencia ha demostrado que su concentración es mínima, tanto en las materias primas como en los combustibles alternos.
Níquel	8.9 - 35 ppm	Se concentra en el clinker, debido a su alto punto de ebullición, 2370 °C. Sin embargo, la concentración de este metal en el combustible convencional normalmente es mayor a la que existe en los combustibles alternos. Oscila entre 20 y 170 ppm.
Selenio	0.5 - 33 ppm	Su concentración en el combustible convencional es de 0.5 a 28 ppm. Se acumula principalmente en el polvo de cemento, y se ha observado que su concentración a la salida del horno es menor que a la entrada, por lo que se deduce que este metal produce cargas de recirculación dentro del horno.
Plata	1 - 33 ppm	Se concentra en forma proporcional en el clinker.
Talio	1.2 ppm	Se volatiliza y se concentra en el polvo de cemento.
Vanadio	3.4 - 18 ppm	Se concentra tanto en el clinker como en el polvo de cemento. Su concentración promedio en el combustible convencional es de 10 a 130 ppm y en la materia prima, de 11 a 30 ppm. Superior a la del combustible alterno.
Zinc	500 - 1300 ppm	Su concentración a la salida del horno depende de cuál sea su vía de entrada. Su concentración en la materia prima es de 11 a 30 ppm; y en el combustible convencional, de 10 a 130 ppm. En estos dos casos, tiende a concentrarse en el polvo de cemento. Sin embargo, cuando el metal ingresa al horno por la vía del combustible alterno, se ha detectado una relación directa entre su concentración en el combustible alterno, y la que se presenta en el clinker producido. Al igual que el plomo, una concentración en el clinker de 1,000 ppm, puede retardar significativamente el tiempo de fraguado del cemento.

FUENTE: Gossman, D. 1991. The Fate of Trace Metals in The Wet Process Cement Kiln. Hampshire, Ill.: Gossman Consulting, Inc. pág. 3-5.

Para finalizar el análisis del impacto del uso de combustibles alternos en hornos de clinker, a continuación, en la *Tabla No. 4.2* se especifican los productos de reacción a los que dan lugar los componentes principales de los residuos que se utilizan como combustibles alternos en hornos de clinker.

TABLA No. 4.2 PRODUCTOS DE REACCION Y DESTINO FINAL DE LOS ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS		
CONSTITUYENTE DEL COMBUSTIBLE ALTERNO	PRODUCTO DE REACCION.	DESTINO FINAL EN EL PROCESO
Hidrógeno	Vapor de agua	Gases de chimenea
Carbono	Dióxido de carbono; monóxido de carbono en proporción mínima.	Gases de chimenea
Cloro*	Cloruro de hidrógeno que se transforma principalmente en cloruro de calcio; y secundariamente en cloruro de potasio y de sodio.	Zonas frías del horno
Flúor	Fluoruro de hidrógeno que se transforma en fluorosilicatos de calcio.	Clinker
Azufre	Dióxido de azufre que en medio básico se transforma a sulfatos y sulfitos de calcio.	Zonas frías del horno y clinker
Metales alcalinos:	Hidróxidos	
Sodio	Hidróxido de sodio.	Clinker
Potasio	Hidróxido de potasio.	Clinker
Metales No Alcalinos	Oxidos	
Por ejemplo: Cobre	Oxido de cobre (II)	Clinker
Por ejemplo: Hierro	Oxido de hierro (III)	Clinker

* El cloro es un componente indeseable, tolerado en porcentajes del 1 al 5% . Sin embargo, se anota debido a la importancia de sus efectos.

Los metales contenidos en los combustibles alternos como cenizas son principalmente calcio, aluminio, sílice y hierro; todos ellos compatibles con el proceso de manufactura del cemento, ya que de hecho forman parte de los constituyentes del clinker. Generalmente, el contenido de cenizas es inferior en los residuos peligrosos líquidos, que en el carbón.

En la *Tabla No. 3.2*, se expresa el efecto de varios metales en particular, cuando ingresan al proceso de manufactura del clinker; ya sea como trazas en el combustible alternativo, o dentro de la materia prima de alimentación al proceso.

2.6. BALANCE DE MATERIA.

A continuación se presenta un balance de materia simplificado, del proceso de manufactura del clinker, en un horno cementero que utiliza combustibles alternos que sustituyen una fracción del combustóleo -combustible convencional para la producción de clinker-. Este balance es un cálculo estimado a partir de otro, correspondiente al horno de Ramos Arizpe, Coah., propiedad de la División Norte de la empresa *Cementos Apasco, S.A de C.V.* En dicho balance, la sustitución de combustóleo es sólo del 6%. En el que aquí se presenta, se hace un cálculo estimando una sustitución del 40% de combustóleo, por combustibles alternos. La información del balance original que se presenta intacta es: 1) La composición del combustóleo; 2) El análisis de los gases de chimenea; 3) La composición de la materia prima; 4) Humedad absoluta del aire de combustión; 5) Flujo de agua de enfriamiento, 6) Humedad del combustible alternativo.

Consideraciones del balance:

1.- Dentro de la secuencia de reacciones para la formación del clinker, sólo se considera la reacción de descarbonatación, debido a que es la principal desde el punto de vista energético. El combustible empleado en un horno de clinker de cemento se utiliza fundamentalmente para proporcionar la energía requerida para efectuar dicha reacción endotérmica.

2.- La composición del combustible alternativo en cuanto a carbono, hidrógeno, contenido de humedad y oxígeno disuelto se calculó por diferencia con respecto a la composición conocida del combustóleo. La razón es que en la práctica, no se dispone de información detallada para cada ocasión en que se utiliza combustible alternativo. Este se selecciona principalmente de acuerdo al análisis de los parámetros calor de combustión, contenido de cloro y contenido de humedad. La composición obtenida por el método empleado, es prácticamente igual a la reportada por información experimental, ya que el error que se obtiene varía entre el 1 y el 2%. La mayor variación proviene del contenido de hidrógeno, ya que éste depende de la exactitud de la información referente a la humedad de los gases de chimenea, y del balance de oxígeno. La determinación del contenido de carbono no representa ninguna dificultad, dado que se conoce el análisis del gas de chimenea.

3.- Una vez que se determina el contenido de carbono e hidrógeno del combustible alternativo, el componente restante podría ser cenizas, que incluye azufre; u oxígeno disuelto. La primera posibilidad, en general es remota o mínima en los combustibles alternos comparado con el contenido de azufre del combustóleo. Además de que no fue reportada esta información en el balance original. Entonces, la segunda posibilidad es la más probable. Debido a que el oxígeno disuelto afecta la cantidad de oxígeno disponible para la

oxidación del hidrógeno de los combustibles, que también es una incógnita; es necesario hacer ligeros ajustes en el balance de humedad, hasta que ambos estimados satisfagan el balance.

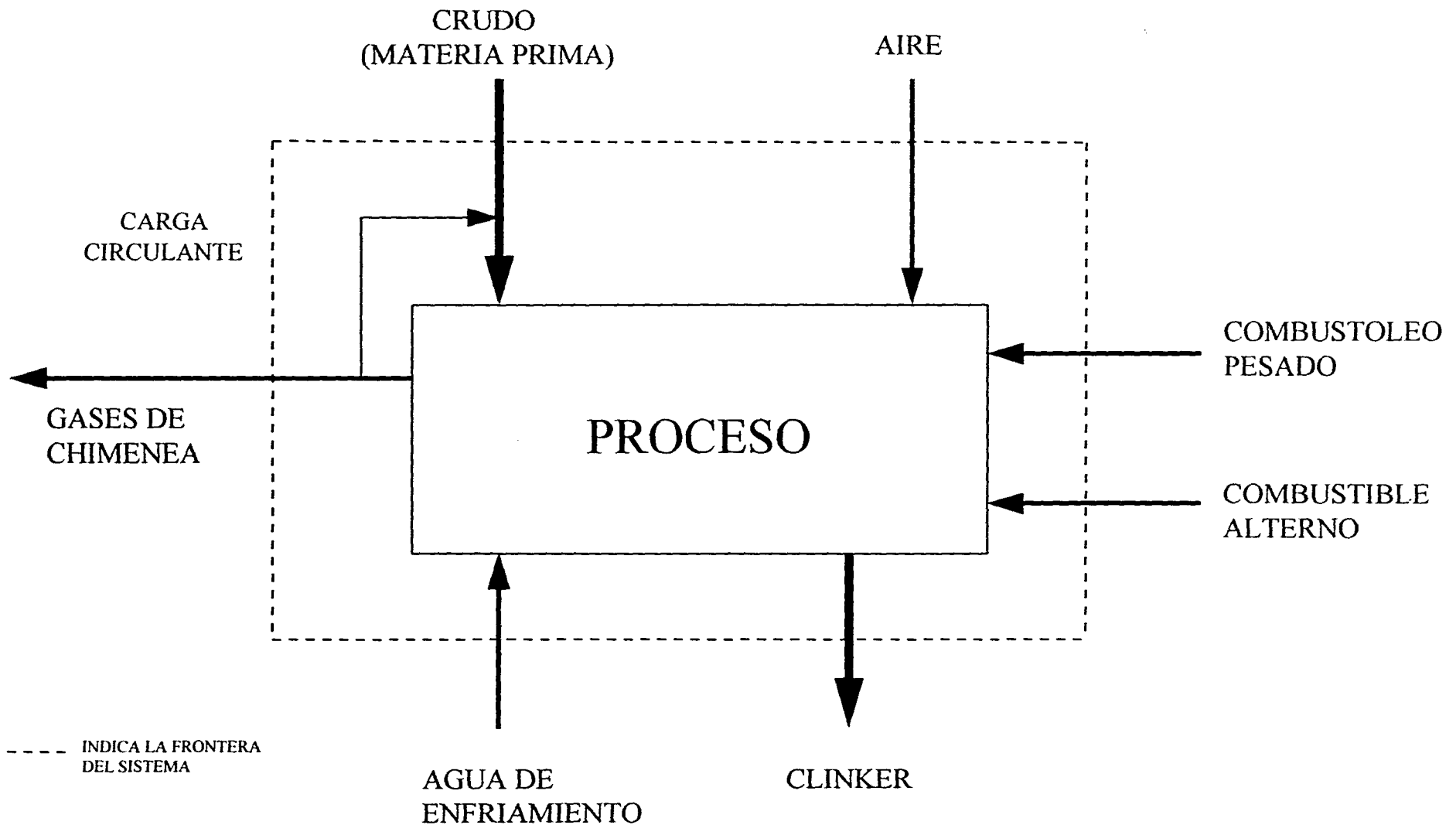
4.- El balance de oxígeno presenta dos dificultades: 1) A diferencia del balance de carbono, los gases de combustión no proporcionan la información completa del consumo de oxígeno, ya que el dióxido de azufre (SO_2) no escapa por los gases de chimenea, debido a que en el medio alcalino del horno, se transforma a sulfatos y sulfitos que se incorporan al clinker. 2) No se conoce el volumen de oxígeno disuelto en el combustible alterno. De las aproximaciones que es necesario hacer en este punto, se deriva parte del error obtenido en el balance.

5.- El porcentaje de sustitución de combustóleo por combustible alterno, se estimó en 40% en cuanto al contenido total de carbono aportado por ambos combustibles, ya que el contenido de carbono del combustible alterno es el principal indicador de su calor de combustión o *poder calorífico*.

6.- Se observará que en el balance de materia global, existe en las corrientes de salida un faltante o *déficit* de materiales equivalentes a 1.55 toneladas por hora. Esto se debe principalmente a que el contenido de hidrógeno, y de oxígeno disuelto en el combustible alterno fueron calculados por diferencia, y por tanto, el error introducido aquí, afecta al resto del balance. Por otra parte, otros errores menores provienen de considerar como 21% el contenido de oxígeno del aire, siendo que éste puede variar ligeramente. Sin embargo, el porcentaje de *déficit* obtenido, de 0.31% es indicativo de que los cálculos efectuados son correctos.

En el Diagrama I se muestran las corrientes de material consideradas en el balance.

DIAGRAMA 1
FLUJO SIMPLIFICADO PARA EL CALCULO DEL BALANCE DE MATERIA DEL
PROCESO DEL CLINKER, UTILIZANDO COMBUSTIBLES ALTERNOS.



BALANCE DE MATERIA

I.- CORRIENTES DE ENTRADA

1.- COMBUSTIBLE ALTERNO:

FLUJO:	80.00	l / min
DENSIDAD:	0.99	kg / l
FLUJO MASICO POR HORA:	4,728.00	kg / hr

COMPOSICION:		% PESO	kg / hr	kmol / hr	
% CARBONO	C	84.17%	3,979.62	331.64	Ver balance de carbono
% HIDROGENO (Disponible/oxidación)	H ₂	10.91%	515.92	257.96	Ver balance de humedad
% HUMEDAD:	H ₂ O	1.00%	47.28	2.63	Información conocida.
% OXIGENO DISUELTO	O ₂	3.92%	185.18	5.79	Ver balance de oxígeno
TOTAL		100.00%	4,728.00	598.01	

El contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno disuelto, se obtuvieron por diferencia. Ver balances indicados.

2.- COMBUSTOLEO:

FLUJO:	116.00	l / min
DENSIDAD:	1.02	kg / l
FLUJO MASICO POR HORA:	7,092.24	kg / hr

COMPOSICION:		% PESO	kg / hr	kmol / hr
% CARBONO	C	85.00%	6,028.40	502.37
% HIDROGENO (Disponible / oxidación)	H ₂	10.30%	730.50	365.25
% AZUFRE ¹⁰	S	4.00%	283.69	8.87
% HUMEDAD	H ₂ O	0.20%	14.18	0.79
% OXIGENO DISUELTO	O ₂	0.50%	35.46	1.11
TOTAL:		100.00%	7,092.24	878.38

3.- CRUDO (Materia Prima)

FLUJO MASICO POR HORA:	200,000	kg / hr
------------------------	---------	---------

COMPOSICION:		% PESO	kg / hr	kmol / hr
% CARBONATO DE CALCIO	CaCO ₃	77.00%	154,000	1,540.00
% Otros sólidos		22.60%	45,200	
% HUMEDAD		0.40%	800	44.44
TOTAL:		100.00%	200,000	

¹⁰ Valor dentro del intervalo presentado por PEMEX en la *Especificación No. 503/93 para Combustóleo Pesado.*

BALANCE DE MATERIA

4.- AIRE SECO PARA LA COMBUSTION

Calculado en base al análisis del gas de chimenea.

moles aire = moles N ₂ / 0.79	9,773.14	kmol/hr	
FLUJO MASICO DE AIRE	283,421.16	kg / hr	(29 kg / kmol)
HUMEDEAD ABSOLUTA DEL AIRE: 42% humedad relativa Temperatura de bulbo seco = 27 °C	0.0101	kg / kg A.S.	(kg humedad / kg aire seco)
FLUJO DE HUMEDAD DEL AIRE:	2,863.35	kg / hr	
	159.07	kmol / hr	(18 kg / kmol)
FLUJO TOTAL DE AIRE HUMEDO:	9,932.22	kmol / hr	
	286,284.51	kg/hr	

5.- AGUA DE ENFRIAMIENTO

7.00 m ³ /hr	IGUAL A:	7,000.00	kg / hr
		388.89	kmol / hr

II.- INFORMACION DE LA COMBUSTION:

GASES DE CHIMENEA:

1.- FLUJO VOLUMETRICO ACTUAL (HUMEDO)	7,288.00	m ³ /min	IGUAL A:	437,280	m ³ /hr
---------------------------------------	----------	---------------------	----------	---------	--------------------

Presión = 0.881 Atm
Temperatura = 111 °C = 384 K

12,220.43 kmol / hr de gases húmedos.

PORCENTAJE DE AGUA : 9.98% 1,219.03 kmol / hr

2.- FLUJO NORMAL BASE SECA

Presión = 1 atm
Temperatura = 25 °C = 298.15 K

4485.49 m³/min
269,129.56 m³ /hr

3.- VOLUMEN MEDIDO DE GASES MINORITARIOS:

MONOXIDO DE CARBONO:	CO	220 ppm en condiciones actuales:	2	kmol / hr
MONOXIDO DE NITROGENO:	NO	72 ppm en condiciones actuales:	0.74	kmol / hr

BALANCE DE MATERIA

4.- ANALISIS DEL GAS DE CHIMENEA, BASE SECA:

A) FLUJO MOLAR:	11,001.40 kmol / hr		
B) COMPOSICION:	% VOLUMEN	kmol / hr	kg / hr
% DIOXIDO DE CARBONO	CO ₂ 21.56%	2,372.00	104,368.00
% MONOXIDO DE CARBONO	CO 0.02%	2.00	56.06
% OXIGENO	O ₂ 8.23%	905.42	28,973.29
% NITROGENO	N ₂ 70.18%	7,720.78	216,181.93
% MONOXIDO DE NITROGENO	NO 0.01%	0.74	22.11
TOTAL:	100.00%	11,000.94	349,601.40

III.- BALANCE POR ELEMENTO:

1.- BALANCE DE CARBONO: kmol / hr

A) CARBONO A LA SALIDA: **2,374.00**

1) Como CO₂: 2,372.00

2) Como CO: 2.00

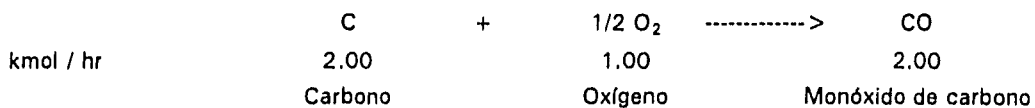
B) REACCIONES QUE SE LLEVAN A CABO:

COMBUSTION:

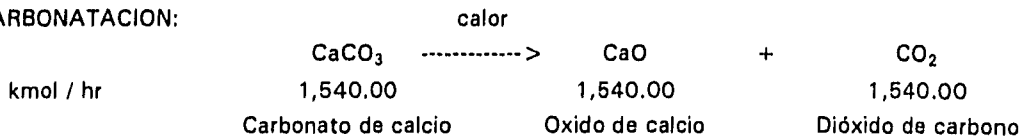


CALCULADO POR DIFERENCIA CON EL CO₂ TOTAL.

COMBUSTION INCOMPLETA:



DESCARBONATAACION:



C) CARBONO EN COMBUSTIBLE ALTERNO: **331.64 kmol / hr**

Por diferencia con el contenido en el combustóleo.

BALANCE DE MATERIA

D) RESUMEN DEL BALANCE DE CARBONO:

	kmol / hr ENTRADA:	kmol / hr SALIDA:
C COMBUSTOLEO:	502.37	
C COMBUSTIBLE ALTERNO:	331.64	
C CRUDO	1,540.00	
CO ₂ GASES DE CHIMENEA		2,372.00
CO GASES DE CHIMENEA		2.00
TOTAL:	2,374.00	2,374.00

2.- BALANCE DE OXIGENO (SOLO CONSIDERANDO LA COMBUSTION):

A) CORRIENTES DE ENTRADA:	kmol / hr	
1) DEL AIRE ATMOSFERICO	2,052.36	
2) O ₂ DISUELTO EN COMBUSTOLEO	1.11	
SUBTOTAL:	2,053.47	
3) O ₂ DISUELTO EN COMB. ALTERNO	5.79	POR DIFERENCIA CON LA SALIDA:
TOTAL A LA ENTRADA	2,059.25	kmol / hr

B) CORRIENTES DE SALIDA:	kmol / hr	(Sin considerar la formación de vapor de agua).
1) COMBUSTION DE CARBONO	833.00	Ver balance de carbono
2) OXIDACION DE AZUFRE	8.87	Ver balance de azufre
3) OXIDACION DE NITROGENO:	0.37	
4) OXIDACION DE HIDROGENO	311.60	
5) GASES DE CHIMENEA	905.42	
TOTAL:	2,059.25	kmol / hr

Reacciones de oxidación de azufre y nitrógeno:

	S	+	O ₂	----->	SO ₂
kmol / hr	8.87		8.87		8.87
	Azufre		Oxígeno		Dióxido de azufre
	1/2 N ₂	+	O ₂	----->	NO
kmol / hr	0.37		0.37		0.74
	Nitrógeno		Oxígeno		Monóxido de nitrógeno

BALANCE DE MATERIA

C) OXIDACION DE HIDROGENO EN LA COMBUSTION: EMPLEADO PARA LA OXIDACION DEL HIDROGENO

	H_2	+	$1/2 O_2$	----->	H_2O
kmol / hr	623.21		311.60		623.21

D) HIDROGENO EN EL COMBUSTIBLE ALTERNO: 257.96 kmol / hr

Por diferencia con el contenido en el combustóleo.

E) RESUMEN DEL BALANCE DE OXIGENO: (SOLO SE CONSIDERA EL VAPOR DE AGUA FORMADO)

	kmol / hr ENTRADA:	kmol / hr SALIDA:
O ₂ DEL AIRE:	2,052.36	
O ₂ COMO CaCO ₃ (CRUDO):	2,310.00	
O ₂ DISUELTO EN EL COMBUSTOLEO:	1.11	
O ₂ DISUELTO EN EL COMB. ALTERNO:	5.79	
O ₂ EN LOS GASES DE CHIMENEA:		905.42
O ₂ COMO CO ₂ GASES DE CHIMENEA:		2,372.00
O ₂ COMO CO GASES DE CHIMENEA:		1.00
O ₂ COMO CaO, CALCINACION:		770.00
O ₂ COMO AGUA (OXIDACION DE H ₂):		311.60 Vapor de agua formado.
O ₂ COMO SO ₂ (OXIDACION DE S):		8.87
O ₂ COMO NO (OXIDACION DE N ₂):		0.37
TOTAL:	4,369.25	4,369.25

F) ANALISIS DEL CONSUMO DE OXIGENO:

	kmol / hr
1) OXIGENO REQUERIDO PARA LA COMBUSTION:	1,153.84
2) % DE EXCESO DE OXIGENO, Intervalo común: 1 a 1.5%	17.31
3) OXIGENO RESTANTE (Proviene del aire de enfriamiento y dilución):	881.21
TOTAL: (DEL AIRE DE ENTRADA AL HORNO):	2,052.36

3.- BALANCE DE HIDROGENO: (SOLO SE CONSIDERA EL VAPOR DE AGUA FORMADO)

	kmol / hr ENTRADA:	kmol / hr SALIDA:
H ₂ EN COMBUSTIBLE ALTERNO:	257.96	
H ₂ EN EL COMBUSTOLEO:	365.25	
H ₂ COMO AGUA FORMADA:		623.21
TOTAL:	623.21	623.21

BALANCE DE MATERIA

4.- BALANCE DE AZUFRE

El SO₂ formado se transforma a sulfatos y sulfitos en medio alcalino, que se incorporan al clinker.

	kmol / hr ENTRADA:	kmol / hr SALIDA:	kg / hr
S DEL COMBUSTOLEO	8.87		
SO2 FORMADO		8.87	
TOTAL:	8.87	8.87	567.38

5.- BALANCE DE HUMEDAD

	kmol / hr ENTRADA:	kmol / hr SALIDA:	
DEL COMBUSTIBLE ALTERNO	2.63		
HUMEDAD DEL COMBUSTOLEO	0.79		
HUMEDAD DEL AIRE DE ENTRADA	159.07		
HUMEDAD DEL CRUDO	44.44		
AGUA DE ENFRIAMIENTO	388.89		
SUBTOTAL	595.82		
Vapor de agua generado (Combustión)	623.21		
HUMEDAD GASES CHIMENEA:		1,219.03	= 21,942.56 kg / hr
TOTAL kmol / hr:	1,219.03	1,219.03	

FLUJO DE GASES DE CHIMENEA SECOS:	11,001.40	kmol / hr
FLUJO DE GASES DE CHIMENEA HUMEDOS:	12,220.43	kmol / hr

BALANCE DE MATERIA

IV.- BALANCE GLOBAL

CORRIENTES DE ENTRADA

kg / hr ENTRADA:

1.- COMBUSTIBLE ALTERNO:	4,728.00
2.- COMBUSTOLEO:	7,092.24
3.- CRUDO:	200,000.00
4.- AIRE DE COMBUSTION:	283,421.16
5.- HUMEDAD DEL AIRE:	2,863.35
6.- AGUA DE ENFRIAMIENTO:	7,000.00

TOTAL:	505,104.75
---------------	-------------------

CORRIENTES DE SALIDA

kg / hr SALIDA:

7.- GASES DE CHIMENEA:	349,601.40
8.- CLINKER (CaO)	86,240.00
9.- CLINKER (Otros sólidos crudo)	45,200.00
10.- SO ₂ (pasa a sulfitos y sulfatos)	567.38
11.- Humedad de gases de chimenea:	21,942.56

503,551.34

DEFICIT A LA SALIDA: 1,553.41 kg/hr

% de la masa de entrada: 0.31%

CLINKER PRODUCIDO: 125,000.00 kg /hr

PRODUCTO RECIRCULADO O CARGA CIRCULANTE: 7,007.38 kg /hr 5.31%

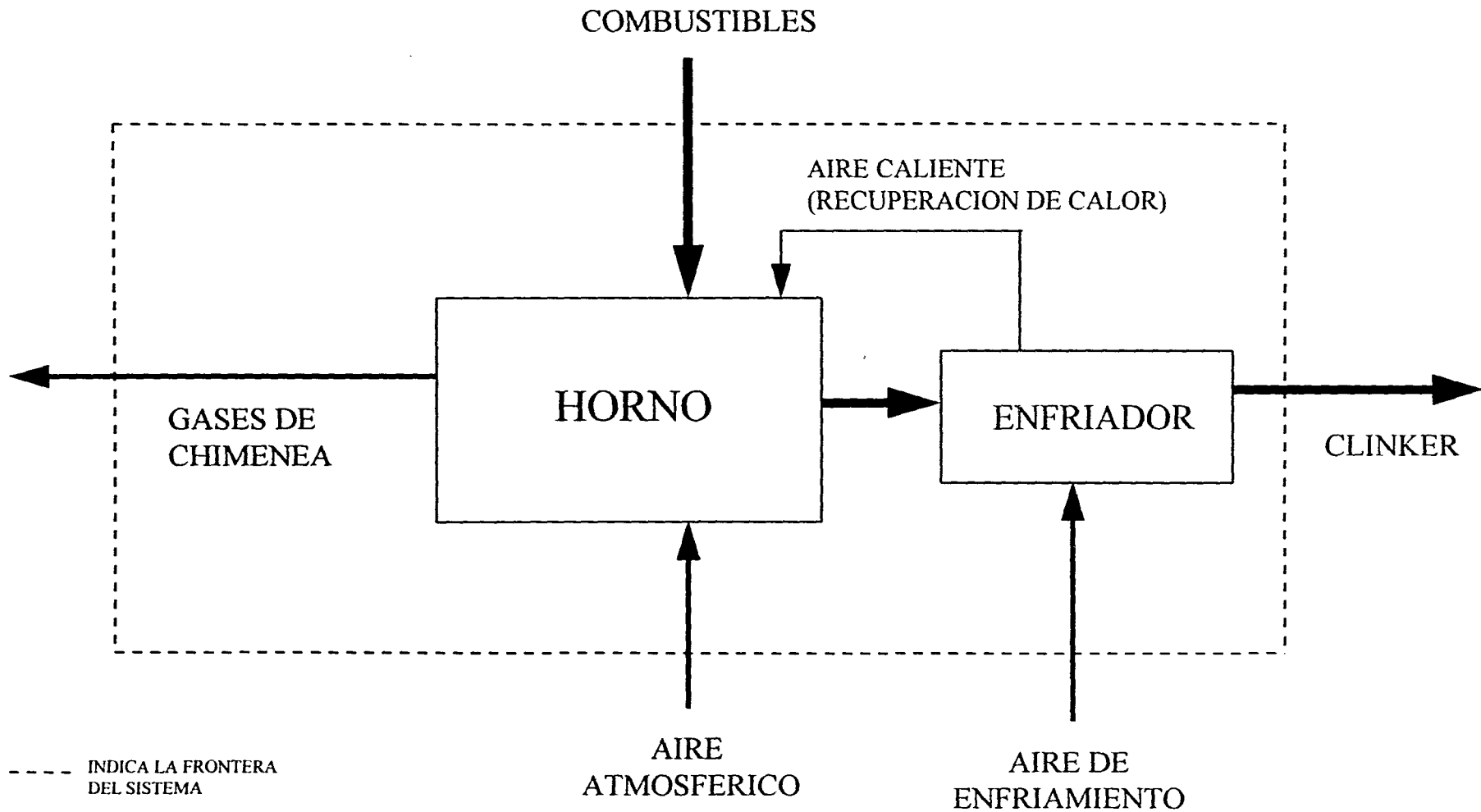
2.7 BALANCE DE ENERGIA:

A continuación en el Diagrama 2, se presentan las corrientes que intervienen en el balance, y las fronteras del sistema.

Consideraciones:

- 1.- La temperatura de referencia es 25 °C, que es aproximadamente la temperatura ambiente. Por ello, la entalpía de todas las corrientes a esta temperatura es cero.
- 2.- Como se verá, el calor de combustión del combustible alterno se estimó mediante la fórmula de Dulong, utilizada para la estimación del poder calorífico total de combustibles.
- 3.- En todos los casos, el cálculo de la entalpía del vapor de agua se simplificó como si su temperatura de saturación fuera de 25 °C. Esta consideración introduce un error despreciable, ya que el calor de vaporización del agua es muy superior al incremento de su entalpía desde la temperatura de referencia, hasta su temperatura de saturación (en este caso, ligeramente inferior a 100 °C).
- 4.- Se considera que la reacción endotérmica de descarbonatación, se lleva a cabo en un 95%, ya que no todo el crudo se transforma en clinker. Esto va de acuerdo al flujo de material que se recircula en el proceso, como se indicó en el balance de materia precedente.
- 5.- El sistema considerado en el balance, incluye dentro de sí la etapa de enfriamiento posterior a la salida del clinker fuera del horno.

DIAGRAMA 2
FLUJO SIMPLIFICADO PARA EL CALCULO DEL BALANCE DE ENERGIA DEL
PROCESO DEL CLINKER, UTILIZANDO COMBUSTIBLES ALTERNOS.



BALANCE DE ENERGIA

I.- ENERGIA QUE INGRESA AL PROCESO

1.- COMBUSTION DEL COMBUSTOLEO: 71,489,779 kcal / hr 60%

Calor de combustión del combustóleo pesado: ¹¹ 10,080 kcal / kg

Flujo másico: 7,092 kg / hr

2.- COMBUSTION DEL COMBUSTIBLE ALTERNO: 48,131,040 kcal / hr 40%

Calor de combustión del combustible alterno: 10,180 kcal / kg Aproximadamente 2% de error.
(Estimado mediante la fórmula de Dulong ¹²)

Flujo másico: 4,728 kg / hr

3.- ENERGIA TOTAL DE LOS COMBUSTIBLES: 119,620,819 kcal / hr 100%

4.- A 25 °C, LA ENTALPIA DE TODAS LAS CORRIENTES DE ENTRADA = CERO.

5.- CALOR DE VAPORIZACION DEL AGUA A 25 °C: 10,535.56 kcal / kmol
(Humedad del aire de entrada)

Flujo molar de humedad del aire: 159.03 kmol / hr

Aportación total de energía: 1,675,469 kcal / hr

TOTAL DE ENERGIA DE ENTRADA: 121,296,289 kcal / hr

II.- ENERGIA QUE SE CONSUME EN EL PROCESO:

1.- CALOR DE COMBUSTION DEL MONOXIDO DE CARBONO: 135,272 kcal / hr 0.16%
(Debido a la combustión incompleta)

Calor de combustión molar: 67,636 kcal / kmol

Flujo másico del monóxido de carbono: 2 kcal / kmol

¹¹ SEMIP. Octubre de 1994. Balance Nacional de Energía 1993. México, D.F: Subsecretaría de hidrocarburos. pág. 43.

¹² Fórmula de Dulong: Poder calorífico total = 14,544 C + 62,028 (H - O/8) + 4050 S (Btu / lb)

C, H, O, S son las fracciones en peso del Carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre del combustible.

Cfr. Himmelblau, D. 1977. Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química. México, D.F. CECSA. pág. 346.

BALANCE DE ENERGIA

2.- ENTALPIA DE LOS GASES DE CHIMENEA, SECOS: 7,144,070 kcal / hr 8.49%

Temperatura de salida T2: 111 °C

Temperatura de referencia T1: 25 °C

Diferencia de temperaturas: 86 °C

ENTALPIA: $H = M (C_{pm}) (T_2 - T_1)$

Cpm: Calor a presión constante medio entre 111 y 25 °C

GAS	FLUJO kmol / hr	Cpm	ENTALPIA kcal / hr
Dióxido de carbono	2,372.00	9.443	1,926,296
Oxígeno	905.17	7.226	562,505
Nitrógeno	7,718.67	7.013	4,655,269

Entalpía gases de chimenea secos: 7,144,070 kcal / hr

(Los flujos de monóxido de carbono y monóxido de nitrógeno son despreciables).

3.- ENTALPIA DEL VAPOR DE AGUA EN LOS GASES DE CHIMENEA: 13,723,201 kcal / hr 16.31%

Flujo molar de vapor de agua: 1,222.04 kmol / hr

Calor de vaporización molar del agua a 25 °C: 10,535.56 kcal / kmol

Calor de vaporización total: 12,874,870 kcal / hr

Sobrecalentamiento (De 25 a 111 °C): ¹³ 848,330.39 kcal / hr

Cpm 111-25 8.072 kcal / kmol °C

4.- ENTALPIA DEL CLINKER A LA SALIDA DEL ENFRIADOR: 2,906,250 kcal / hr 3.45%

Flujo másico de clinker promedio: 125,000 kg / hr

Temperatura de salida: 150 °C

Cpm 25-150 °C ¹⁴ 0.186 kcal / kg °C

¹³ Se calcula como si la temperatura de saturación fuera 25 °C. Esto implica un % de error despreciable.

Cfr. Hougén & Watson. Material and Energy Balances, McGraw-Hill. págs. 413,414.

¹⁴ Cfr. Perry, R. Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill.

BALANCE DE ENERGIA

5.- CALOR CONSUMIDO EN LA REACCION DE DESCARBONATACION: 60,209,765 kcal / hr 71.58%

Calor de reacción a 700 °C, promedio: 411.55 kcal / kg
 Flujo másico reaccionante de carbonato de calcio: 154,000 kg / hr
 % De material que reacciona: 95%

TOTAL DE ENERGIA QUE SALE DEL PROCESO:	84,118,558 kcal / hr	100.00%
(SIN CONTAR PERDIDAS)		

III.- RESUMEN DEL BALANCE DE ENERGIA:

1.- ENERGIA QUE INGRESA AL PROCESO:	kcal / hr	
1) CALOR DE COMBUSTION DE LOS COMBUSTIBLES:	119,620,819	99%
2) ENTALPIA DE LA HUMEDAD DEL AIRE:	1,675,469	1%
TOTAL DE ENERGIA DE ENTRADA:	121,296,289	100%

2.- ENERGIA QUE SALE DEL PROCESO:	kcal / hr	
1) CALOR DE COMBUSTION PERDIDO POR COMBUSTION INCOMPLETA:	135,272	0.11%
2) ENTALPIA DE LOS GASES DE CHIMENEA SECOS:	7,144,070	6%
3) ENTALPIA DE HUMEDAD PRESENTE EN LOS GASES DE CHIMENEA:	13,723,201	11%
4) ENTALPIA DEL CLINKER A LA SALIDA DEL ENFRIADOR:	2,906,250	2%
5) CALOR CONSUMIDO EN LA REACCION DE DESCARBONATACION:	60,209,765	50%
SUBTOTAL:	84,118,558	
6) PERDIDAS DE CALOR (POR DIFERENCIA CON ENERGIA DE ENTRADA):	37,177,730	31%
TOTAL DE ENERGIA CONSUMIDA EN EL PROCESO:	121,296,289	100%

IV.- EFICIENCIA ENERGETICA DEL PROCESO: 50%

CONSUMO EN LA REACCION DE DESCARBONATACION	=	60,209,765	=	0.50
ENERGIA APORTADA POR LOS COMBUSTIBLES		119,620,819		

V.- CONSUMO UNITARIO DE COMBUSTIBLES: 957 kcal / kg de clinker

Clinker producido: 125,000 kg / hr

Energía aportada por los combustibles: 119,620,819 kcal / hr

3.- RESIDUOS APTOS PARA SER UTILIZADOS COMO COMBUSTIBLES ALTERNOS EN HORNOS DE CLINKER.

3.1 COMPONENTES ADECUADOS PARA FORMULAR COMBUSTIBLES ALTERNOS

Como se explicó en el capítulo anterior, los compuestos aptos para ser quemados como combustibles alternos en hornos de clinker, son en primer lugar aquellos que tienen un calor de combustión alto: en promedio, superior a 5,000 kcal/kg. En forma general, estos residuos contienen los grupos orgánicos que se indican en la *Tabla No. 1.3*, con sus respectivos ejemplos.

TABLA No. 1.3 PRINCIPALES GRUPOS ORGANICOS QUE CONSTITUYEN LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS, Y EJEMPLOS CARACTERISTICOS.	
1.- Alcoholes: Metanol Etanol n-Propanol Isopropanol n-Butanol 2.- Cetonas: Metil etil cetona Metil isobutil cetona Acetona Ciclopentanona 3.- Aldehidos: Formaldehído Butiraldehído Acetaldehído 4.- Solventes clorados: (como constituyente minoritario) Diclorobenceno Clorofenol Diclorobuteno Cloruro de metileno	5.- Aceites y combustibles derivados del petróleo: Diesel Aceites hidráulicos Otros aceites 6.- Esteres (Principalmente acetatos): Acetato de metilo Acetato etilo Acetato Vinílico Benzoato de etilo 7.- Hidrocarburos aromáticos. Benceno Tolueno Xileno Naftaleno Fenol 8.- Hidrocarburos alifáticos. Hexano Heptano Pentano 9.- Acidos grasos. Acido cresílico Acido tereftálico Acido palmítico

La *Tabla No. 1.3* es sólo indicativa del tipo de componentes aptos para ser utilizados como combustibles alternos. Los grupos orgánicos presentados no son los limitativos, pero representan componentes representativos de los combustibles alternos formulados a partir de residuos orgánicos.

A continuación, en la *Tabla No. 2.3* se especifican residuos típicos que pueden ser utilizados como combustibles alternos en hornos de clinker, y la industria de su procedencia:

TABLA No. 2.3	
LISTADO DE RESIDUOS CARACTERISTICOS QUE PUEDEN SER UTILIZADOS COMO COMBUSTIBLE ALTERNO EN HORNOS DE CEMENTO.	
RESIDUO	PROCEDENCIA
Aceites lubricantes Natas de pintura y removedores Solventes de limpieza Llantas	INDUSTRIA AUTOMOTRIZ Y MANTENIMIENTO DE VEHICULOS AUTOMOTORES URBANOS E INDUSTRIALES. (Automóviles, camiones, montacargas, etc.)
Residuos de destilación que contienen aproximadamente 45% de hidrocarburos aromáticos (desde xileno hasta metil-naftaleno). Fondos de destilación que contienen octil fenil naftilamina y poliisobutileno.	REFINACION DEL PETROLEO.
Breas que contienen metilmetacrilato polimerizado, fenoles de alquilo, cianovaleramida y productos de condensación.	MANUFACTURA DE QUIMICOS ORGANICOS PESADOS.
Residuos de destilación que contienen difenilamina, aminas aromáticas, compuestos inorgánicos, 2-naftol y productos de oxidación, productos de descomposición del fenol y productos de descomposición de aminas.	MANUFACTURA DE MATERIALES DE TINTE Y PRODUCTOS INTERMEDIOS.
Residuos de destilación que contienen fenilaminas, fenilaminas nitradas y éteres fenílicos. Residuos de glicol y de glicoléteres mezclados con lodos de hidrocarburos, polvo de plástico y agua.	PRODUCCION DE QUIMICOS INTERMEDIOS.
Residuo líquido de ciclopentadieno.	MANUFACTURA DE PETROQUIMICOS.
Residuos de dimetilformamida.	MANUFACTURA DE FARMACEUTICOS
Líquido con un contenido aproximado de 70% de tolueno, 6% de clorofenol, y 20% de subproductos	MANUFACTURA DE PRODUCTOS QUIMICOS FINOS.

et seq.

CONTINUACION TABLA No. 2.3

RESIDUO	PROCEDENCIA
Fenol-formaldehído y resinas epóxicas, mezclas de barnices y solvente. Residuos de la polimerización del propileno; gránulos de etileno polimerizado.	FABRICACION DE PLASTICOS.
Metil-etil-cetona, <i>hidrocarburos de punto de ebullición especial</i> ⁺ , hidrocarburos alifáticos, tolueno.	MANUFACTURA DE ADHESIVOS
Hidrocarburos alifáticos de <i>punto de ebullición especial</i> ⁺ , xileno, tolueno, <i>espíritus minerales</i> ⁺⁺ , keroseno, ésteres.	MANUFACTURA DE MOTORES DE VEHICULOS.
<i>Espíritus minerales</i> ⁺⁺ , keroseno, parafina refinada,	LIMPIEZA DE MATERIALES Y ENCERADO.
Keroseno y <i>espíritus minerales</i> ⁺⁺ , (con grandes proporciones de de hidrocarburos clorados).	INDUSTRIA DE INGENIERIA.
n-Hexano, etanol, metanol, isopropanol.	INDUSTRIAS EXTRACTIVAS (Aceites esenciales, etc.)
Propilénglicol, isopropanol, triacetato de glicerol.	SABORIZANTES DE ALIMENTOS, ESENCIAS, PERFUMES, COSMETICOS Y MANUFACTURA DE ARTICULOS DE BAÑO.
Solventes de <i>punto de ebullición especial</i> ⁺ , parafina, glicerol-triacetato.	MANTENIMIENTO DE VEHICULOS Para transportación carretera, de ferrocarril y aérea.
<i>espíritus minerales</i> ⁺⁺ , keroseno, y fracciones del petróleo del tipo de los mencionados <i>espíritus</i> .	INDUSTRIA PELETERA E INDUSTRIA DE PRESERVACION DE LA MADERA.
Metanol, aceites metilados, acetona, glicoles, etanol, acetato de etilo, ciclohexano,	INDUSTRIA FOTOGRAFICA.
<i>Espíritus minerales</i> ⁺⁺ , solventes de <i>punto de ebullición especial</i> ⁺ , keroseno, etanol, isopropanol, acetato de etilo, acetato de butilo, acetona, metil-etil-cetona, tolueno, xileno, metil-isobutil-cetona.	INDUSTRIA DE LA IMPRESION.
Tolueno, xileno, <i>espíritus minerales</i> ⁺⁺ , celosolves, isobutanol, metil-etil-cetona, metil-isobutil-cetona.	CONSTRUCCION Y REPARACION DE BARCOS.
Hidrocarburos derivados del petróleo.	MANUFACTURA DE LLANTAS.

* Fuente: Selección de The World Bank et al. *The Safe Disposal of Hazardous Wastes*, Vol I. Washington, D.C.: Batstone, Smith and Wilson Editors, pág. 51-52, 53-54.

+ Disolventes del tipo de la n-metil-pirrolidona, de mayor punto de ebullición que el resto de los disolventes, con los que se ha intentado sustituir a los compuestos clorados en la función de desengrasantes.

++ Los *espíritus minerales* son mezclas con un 10 a 30% de compuestos inflamables; y el resto, de gas nafta e hidrocarburos. El llamado *Thinner*, es una mezcla constituida por los mismos componentes, pero cuyo porcentaje de composición es inverso.

Los compuestos en cuya fórmula está presente el nitrógeno, como por ejemplo en las aminas, deben utilizarse como constituyente minoritario de los combustibles alternos, debido a la formación de óxidos de nitrógeno en los gases de combustión, los cuales no deben sobrepasar los límites fijados por la Norma correspondiente, como se expuso en el capítulo anterior.

Por su parte, Los hidrocarburos clorados, especialmente los aromáticos tienen un calor de combustión alto. Sin embargo, debido a que el cloro es un elemento nocivo para los hornos cementeros como se expuso en el capítulo anterior, su uso como combustible alterno está condicionado a la formación de mezclas en las que este tipo de hidrocarburos representen un componente minoritario.

A continuación se enlistan algunos residuos que contienen hidrocarburos clorados, susceptibles de ser componentes minoritarios en mezclas orgánicas utilizadas como combustible alterno.

TABLA No. 3.3	
RESIDUOS CLORADOS QUE PUEDEN SER COMPONENTES MINORITARIOS EN MEZCLAS ORGANICAS DESTINADAS A SER COMBUSTIBLES ALTERNOS.	
RESIDUO	PROCEDENCIA
Residuos de destilación que contienen 1-10% de hidrocarburos clorados (ej. toluenos clorados a partir de la fabricación de benzaldehído).	INDUSTRIA DE LOS ETERES Y ALDEHIDOS.
Residuo con baja concentración de orto-diclorobenceno.	PRODUCCION DE ISOCIANATOS.
Corriente residual que contiene hidrocarburos clorados (Contenido de cloro: 10%). Brea residual (punto de fusión 60 °C) que contiene hidrocarburos aromáticos clorados.	PRODUCCION DE TINTURAS Y SUS PRODUCTOS INTERMEDIOS.
Brea residual con 1-2 % de halógenos. Hidrocarburos clorados mezclados con tolueno y sólidos disueltos. (Contenido de cloro: 1%). Solventes contaminados con mezclas de compuestos organoclorados, ej: Cloruro de metileno, cloroforno, dicloruro de etileno, clorobenceno. Solventes residuales con pequeñas cantidades de cloruro de metileno y cloruros de alquilo.	PRODUCCION DE FARMACEUTICOS Y QUIMICOS FINOS.
Clorobenceno y 1,2 - Diclorobenceno.	SINTESIS QUIMICAS.

* Fuente: Selección de The World Bank et al. The Safe Disposal of Hazardous Wastes, Vol I. Washington, D.C.: Batstone, Smith and Wilson Editors, pág. 50, 53.

3.2 LA FORMULACION DE COMBUSTIBLES ALTERNOS PARA SER UTILIZADOS EN HORNOS DE CLINKER

Si el combustible alternativo que se utiliza en un horno cementero solamente representara el 10% del requerimiento energético total; y, si los residuos que se utilizaran tuvieran un calor de combustión prácticamente igual al del combustóleo (del orden de 10,000 kcal/kg), se necesitarían aproximadamente de 1,200 litros por hora de combustible alternativo para la operación de un horno de clinker mediano, con capacidad de 3,000 toneladas por día.

Salvo los casos del aceite lubricante usado y las llantas gastadas, que se tratarán más adelante; no existen corrientes de un sólo residuo que por sí solas sean suficientes para ser utilizadas como combustible alternativo en un horno de clinker. Por ello, es necesario formular los combustibles alternos a partir de mezclas de residuos que garanticen las propiedades fisicoquímicas especificadas en el capítulo anterior.

El proceso de mezclado de los residuos para formular combustibles alternos, en el medio de las empresas recolectoras de residuos, comúnmente se llama *blending* (del término en inglés *fuel blending*.)

Los objetivos del *blending* de residuos para la formulación de combustibles alternos son principalmente los siguientes:

- 1.- Garantizar que el combustible alternativo cumpla con las especificaciones mencionadas en el capítulo anterior, relacionadas con su calor de combustión, viscosidad y composición; destacando en esta última, un mínimo contenido de cloro.
- 2.- Facilitar el uso de múltiples corrientes de residuos destinadas a ser combustibles alternos.
- 3.- Garantizar el flujo suficiente de combustible alternativo para ser utilizado en un horno de clinker.

El *blending* de residuos depende principalmente de tener identificadas las corrientes residuales que son aptas para ser utilizadas como combustible alternativo. Cuando se dispone de un volumen grande de estos residuos, es factible incluso utilizar desechos que están por debajo de las especificaciones, pero que pueden ser mezclados con el resto de las corrientes que sí son aptas. Este es el caso de algunos solventes clorados, los cuales al ser diluidos en un gran volumen de residuos, podrían eventualmente incorporarse al combustible alternativo. De esta manera, residuos que por sí solos no serían adecuados para ser combustibles alternos, mediante un buen proceso de mezclado, pueden ser sometidos a destrucción térmica en un horno de clinker, lo cual es benéfico desde el punto de vista de evitar su confinamiento, o su combustión en incineradores.

Cuando se aplica el mezclado de residuos para formular combustibles alternos, es indispensable considerar la compatibilidad de las sustancias, para evitar cualquier tipo de reacción que implique por ejemplo la polimerización. Adicionalmente, la homegeneización de la mezcla antes de ser quemada es un factor crítico, ya que de lo contrario, la existencia de más de una fase con propiedades diversas puede significar variaciones importantes en las condiciones de operación del horno.

En Estados Unidos de América, donde existe una importante industria de manejo de residuos, hay compañías que ofrecen la posibilidad de aceptar residuos tales como cloroformo, diclorobenceno, dicloroetano, lodos de tratamiento de aguas que contienen pigmentos, entre otros residuos, que por sí solos no podrían ser quemados como combustibles alternos.

Casos Excepcionales:

1) *El aceite lubricante gastado:* Este residuo es muy abundante debido al gran número de vehículos automotores y maquinaria industrial que utilizan aceite de lubricación. Por otro lado, su calor de combustión es prácticamente igual al del combustóleo, y no se ve alterado por el desgaste natural de sus propiedades lubricantes. Se puede decir que técnicamente es el *mejor residuo* para ser utilizado como combustible alternativo. Actualmente en México, es el principal residuo que se destina para este propósito. La razón es que no existe en nuestro país una compañía que haga más rentable la opción del reciclaje de aceite. Hasta mediados de 1994 aproximadamente, la empresa *TEXACO* era el principal reciclador de aceite lubricante. Sin embargo, dejó de hacerlo posteriormente al periodo mencionado. Una posible razón de este hecho es que los márgenes que obtenía esta empresa no eran suficientemente atractivos; y en cambio, dejaban de vender aceite virgen con mayores márgenes de utilidad.

La ausencia de una opción más competitiva para el manejo del aceite lubricante gastado, hace que exista una menor demanda de combustibles alternos formulados a partir de mezclas de diversos residuos.

2) *Las llantas gastadas:* Este residuo también es muy abundante por la gran cantidad de vehículos automotores que se utilizan en la actualidad. Su calor de combustión es del orden de 3,000 a 4,000 kcal/kg mucho menor al del aceite; sin embargo, muchas cementeras lo utilizan como combustible alternativo. Las llantas tienen la ventaja de no necesitar mezclarse con otros residuos; y que los costos de su manejo y transporte son mucho menores que los correspondientes a los residuos líquidos. La única desventaja de su combustión en los hornos de clinker es su contenido de acero, el cual, tiene más dificultades para incorporarse al clinker debido a que requiere de un mayor tiempo de residencia en el horno que el resto de los residuos. Por su parte, el reciclado de llantas es una tecnología no difundida ni aplicada aún en gran escala. Aparentemente, su combustión en hornos de clinker resulta ser una opción más rentable.

3.3. EL CONTROL DE CALIDAD DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS FORMULADOS A PARTIR DE RESIDUOS PELIGROSOS.

Como se mencionó en el capítulo anterior, las especificaciones de los combustibles alternos están relacionadas con tres aspectos:

- El proceso del clinker
- La seguridad e higiene industrial.
- El cumplimiento de la legislación.

Las especificaciones relacionadas con el proceso se analizaron en el capítulo 2. A continuación se analizarán las dos restantes.

Especificaciones de Seguridad e Higiene Industrial:

Están encaminadas a la protección del personal que labora en la planta cementera, y son de la mayor importancia. En primer lugar deben considerarse las especificaciones de los combustibles alternos respecto a su contenido de compuestos fuertemente tóxicos, particularmente pesticidas.

Adicionalmente, es necesaria una evaluación precisa del grado de exposición del trabajador aunada a un modelo detallado para evaluar la toxicidad relativa de los residuos constituyentes de combustibles alternos. Lo anterior implica la necesidad de análisis de laboratorio que proporcionen la información detallada sobre la composición de dichos combustibles, respecto a sus componentes orgánicos volátiles y semivolátiles, con una exactitud de hasta el 0.1%. Generalmente, la compleja composición de los combustibles formulados a partir de residuos peligrosos requiere del uso de la cromatografía de gases de columnas capilares. Se necesitan múltiples detectores y columnas para confirmar la identificación de los componentes de los combustibles alternos.

Los riesgos de seguridad e higiene afectan principalmente a la compañía cementera y eventualmente, al generador de los residuos peligrosos. Por esta razón, es particularmente importante el control de las especificaciones de los combustibles alternos; sobre todo cuando éstos provienen de empresas formuladoras de combustibles ajenas a la cementera (*Off-site waste fuel blender*). Aquellas empresas formuladoras pueden tener variaciones serias en la composición de sus combustibles; y por ello es indispensable que se realicen los análisis de laboratorio mencionados inmediatamente antes del uso de los combustibles en un horno de clinker.

A continuación, en la *Tabla No 4.3* se expone un ejemplo de los parámetros necesarios a evaluar de los componentes de los combustibles alternos.

TABLA No 4.3
PARAMETROS DE EVALUACION DEL COMPUESTO RESPECTO A LA SEGURIDAD E HIGIENE

Nombre del compuesto:	
Peso Molecular	Clasificación por su Riesgo a la Salud.
Punto de Ebullición	Irritante
Presión de Vapor	Peligroso al contacto ocular
Dosis letal Oral LD ₅₀	Veneno Mortal
Dosis Letal Dérmica LD ₅₀	Monómero inestable
Nivel Máximo Permisible de Exposición: **	Eter Inestable
-Concentración Promedio Ponderada en el Tiempo	Peligro de Ignición a Baja Temperatura
-Concentración para la Exposición a Corto Tiempo	Acido
-Concentración Pico	Reactivo
Potencial de absorción en piel.	Explosivo
Carcinogenicidad	Oxidante
Taratogenicidad	Cianuro
Mutagenicidad	Sulfuro

* Fuente: Gossman, D. "Quality Control of Hazardous Waste Fuel". Indiana Waste Exchange. Vol III, No. 5, 1991.

** Nomenclatura utilizada por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, expuesta en la Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-1994. Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral. Diario Oficial de la Federación. 8-VII-1994.

Especificaciones para el Cumplimiento de la Legislación:

Estas varían de acuerdo al país o al estado donde se encuentre la instalación del horno cementero. Sin embargo, las diferentes legislaciones contemplan los siguientes aspectos fundamentales respecto a la composición de los combustibles alternos derivados de residuos peligrosos:

- 1) Contenido de bifenilos policlorados (PCB's): 50 ppm máximo es un valor común.
- 2) Contenido de desechos radiactivos: es muy improbable su presencia; sin embargo, su detección analítica es sencilla, y es importante su control debido a los riesgos que implicaría.
- 3) Contenido de metales pesados: por ejemplo, plomo y cromo.

En México no existe legislación específica para el uso de combustibles alternos en hornos de clinker. Cada empresa cementera que dispone de un permiso para tal efecto, tiene que cumplir con especificaciones particulares como las que se detallaron en el capítulo anterior.

Por las exigencias mencionadas a lo largo de este capítulo y el anterior, es claro que un programa de utilización de combustibles alternos derivados de residuos peligrosos, en hornos de clinker, requiere de un estricto control de calidad de los combustibles mencionados; con equipos analíticos altamente sofisticados y personal calificado. Adicionalmente a los requerimientos de análisis, es necesario un control estadístico basado en cada envío de combustible alternativo, y de cada generador de los residuos que se utilizan para su formulación. La necesidad de este control se debe a que la puesta en marcha de un programa de

combustibles alternos en un horno de clinker común, significa en números gruesos la demanda anual del orden de 400 a 2,000 pipas de 25.000 litros de combustible alterno. Considerando este volumen, es evidente que la probabilidad de combustibles fuera de especificaciones es prácticamente un hecho, si no se aplica un método de control estadístico riguroso.

Parámetros de Control y Aseguramiento de Calidad de un Programa de Combustibles Alternos en Hornos de Clinker.

A continuación en la *Tabla No. 5.3* se detallan los parámetros más importantes para el control de calidad de los combustibles alternos; desde su fuente, hasta el momento previo a su combustión.

TABLA No. 5.3				
ANÁLISIS POR ETAPAS, DE LOS RESIDUOS UTILIZADOS EN LA FORMULACION DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS.				
<u>PARAMETRO</u>	<u>CALIFICACION DEL GENERADOR</u>	<u>CONTENEDOR RECIBIDO (PIPA)</u>	<u>TANQUE DE MEZCLADO (BLENDED)</u>	<u>TANQUE DE COMBUSTION¹</u>
Calor de combustión	*	*	*	*
Cenizas	*	*	*	*
Azufre	*	*	*	*
Flúor	*	*	*	*
Cloro	*	*	*	*
Bromo	*	*	*	*
Punto de fusión	*		*	
pH	*		*	
Viscosidad	*		*	
Metales: Plomo	*	(Dependiendo de la calificación del generador)	*	
Zinc	*		*	
Cromo	*		*	
Fierro	*		*	
Titanio	*		*	
(otros metales pesados volátiles)	*			*
PCB's	*	*	*	
Análisis de orgánicos volátiles y semivolátiles.	*		*	
Análisis cualitativo rápido (<i>Fingerprint</i>) ²		*		
Radiactividad	*	*	*	

¹ Semanalmente, si el tanque de combustión es de gran capacidad y está separado de los tanques de mezclado.

² Nota: La evaluación mediante el análisis cualitativo rápido (*Fingerprint*) puede ser un cromatograma computarizado de los residuos recibidos, sobrepuesto al cromatograma original del generador. Por lo tanto, sólo requieren ser identificados los picos nuevos o diferencias entre ambos cromatogramas.

* Fuente: Gossman, D. "Quality Control of Hazardous Waste Fuel". Indiana Waste Exchange. Vol III, No. 5, 1991

Cada ocasión en que se recibe en la planta cementera un contenedor de residuos para ser quemados como combustible alterno, es necesario llevar a cabo un análisis de los parámetros señalados en la *Tabla No. 5.3*. Esta tabla proporciona una guía de análisis que ayuda a reducir significativamente la probabilidad de recibir en el horno de clinker un combustible fuera de especificaciones. Un único análisis de los residuos del generador sería insuficiente, ya que existiría el riesgo de tener residuos inadecuados en posteriores embarques.

La calificación del generador es un análisis de una muestra de sus residuos, previamente a su recolección y embarque. El análisis del contenedor recibido se hace tomando una muestra de éste, una vez que llega a la planta cementera, antes de descargar su contenido. Finalmente, el análisis del tanque de mezclado se lleva a cabo antes de la combustión.

A continuación, la *Tabla No. 6.3* proporciona los resultados estadísticos referentes a la probabilidad de que sea quemado en el horno de clinker un embarque de residuos fuera de especificaciones; tomando en cuenta las etapas de análisis propuestas en la *Tabla No. 5.3*.

TABLA No. 6.3		
RESULTADO ESTADISTICO DE LA APLICACION DEL PLAN DE ANALISIS DE LOS RESIDUOS UTILIZADOS PARA FORMULAR COMBUSTIBLES ALTERNOS.		
<u>ETAPA</u>	<u>PROBABILIDAD DE EXITO</u>	<u>PROBABILIDAD DE FALLA</u>
1.- Calificación del generador	95%	5%
2.- Contenedor recibido	96%	4%
3.- Tanque de mezclado	98%	2%
1 + 2	99.8%	0.2% o 1 de 500.
1 + 3	99.9%	0.1% o 1 de 1,000.
2 + 3	99.92%	0.08% o 1 de 1,250.
1 + 2 + 3	99.996%	0.004% o 1 de 25,000.

* Fuente: Gossman, D. "Quality Control of Hazardous Waste Fuel". Indiana Waste Exchange. Vol III, No. 5, 1991

Adicionalmente al programa de control de calidad anteriormente descrito, un programa de *aseguramiento de calidad* ayuda a garantizar que los resultados del análisis de laboratorio sean correctos. De manera que se requiere de un programa que conjunte ambos aspectos de control. Este programa de *control de calidad / aseguramiento de calidad*, que en inglés se denomina QA/QC (quality assurance/quality control), generalmente incluye la comprobación de valores estándar (ya conocidos), las pruebas por duplicado, la medición de valores pico, entre otras formas de evaluación del instrumental analítico. Los parámetros que demandan un control más exigente en su medición son respectivamente, las concentraciones de cloro y bifenilos policlorados.

En conclusión de lo expuesto en este capítulo, la viabilidad de un programa de combustibles alternos formulados a partir de residuos orgánicos industriales, para su uso en hornos de clinker, requiere de un estricto control de calidad, cuya aplicación contribuye a disminuir notablemente la probabilidad de riesgos de trabajo; de afectaciones al proceso de fabricación del cemento, y de daños al ambiente.

Para finalizar este capítulo, en la *Tabla No. 7.3*, se presenta una selección de residuos susceptibles de ser utilizados para formular combustibles alternos, que sean quemados en hornos de clinker. Dicha selección se hizo a partir de los listados de residuos presentados en la *Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993*; y en el *Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)*, normatividad aplicable en los Estados Unidos de América, a la que se hizo referencia al inicio del capítulo 2 de la presente tesis. Ambos listados son correspondientes en muchos de los residuos que se mencionan; y en otros, son complementarios.

Los compuestos clorados y nitrogenados que se incluyen en dicha tabla, sólo pueden ser componentes minoritarios, como se mencionó anteriormente, en este mismo capítulo.

TABLA No. 7.3
RESIDUOS EN DESCRITOS EN LA LEGISLACION DE RESIDUOS PELIGROSOS, QUE PUEDEN SER UTILIZADOS
COMO COMBUSTIBLES ALTERNOS EN HORNO DE CLINKER.

CLAVE RCRA*	CODIGO NOM-CRP-001-ECOL.93	CODIGO CRETI**	RESIDUO / PROCESO	COMPONENTES PRINCIPALES	CALOR DE COMBUSTION * kcal/kg	NOTAS CALOR DE COMBUSTION
I.- DE FUENTES NO ESPECIFICAS (O GENERICAS).						
	RPNEI.1/03	T,I	Aceites lubricantes gastados.		8,500 a 10,000	Aceites minerales.
F001	RPNEI.1/08	T	Solventes halogenados utilizados como desengrasantes.	Tetracloroetileno Tricloroetileno 1,1,1-Tricloroetano (Sólo se consideraron éstos) **. Mezclas de los anteriores y solventes gastados que contuvieron al menos 10% en volumen de alguno de los anteriores antes de ser usados. Fondos de la recuperación de estos solventes gastados o sus mezclas.	2,725 Aprox. 2,725 2,611	Ref. tricloroetileno.
F002	RPNEI.1/09	T	Los siguientes solventes halogenados:	Clorobenceno Orto-diclorobenceno. (Sólo se consideraron éstos) **. Todos los solventes y mezclas gastadas que contuvieron al menos 10% en volumen de alguno de los componentes anteriores o de los enlistados bajo los códigos F001, F002, F004 y F005. Fondos de la recuperación de estos solventes o de sus mezclas.	6,667 4,601	

et seq.

+ RCRA: Resource Conservation and Recovery Act. Aplicable en los Estados Unidos de América.

++ CRETI: Corrosivo = C; Reactivo = R; Explosivo = E; Tóxico = T; Inflamable = I.

* En muchos compuestos específicos se proporciona el calor de combustión. En otros, no se encontró información disponible y se proporciona un valor aproximado representativo.

** La legislación en este apartado considera más residuos que no se escribieron debido a su bajo calor de combustión o a su alto contenido de halógenos.

CONTINUACION TABLA 7.3

CLAVE RCRA	CODIGO NOM-CRP-001-ECOL/93	CODIGO CRETI	RESIDUO / PROCESO	COMPONENTES PRINCIPALES	CALOR DE COMBUSTION * kcal/kg	NOTAS CALOR DE COMBUSTION
F003	RPNE1.1/10	T,I	Los siguientes solventes gastados no-halogenados:	<p>Xileno Acetona Acetato de etilo Etil benceno Eter etílico Metil-isobutil-cetona Alcohol butílico Ciclohexanona Metanol</p> <p>Solventes gastados que contuvieron antes de usarse uno o más de los anteriores, y al menos 10% en total de uno o más de los solventes enlistados bajo los códigos F001, F002 y F005. Los fondos de la recuperación de estos solventes y de sus mezclas.</p>	<p>10,299 7,378 6,101 10,294 8,083 5,778 8,642 8,572 5,426</p>	Orto-xileno
F004	RPNE1.1/12	T	Los siguientes solventes gastados no halogenados:	<p>Cresoles y ácido cresílico (Sólo se consideraron éstos) **. Todas las mezclas de los solventes antes enlistados o aquellos enlistados bajo los códigos F001, F002, y F005. Y los fondos de la recuperación de estos solventes gastados o de sus mezclas.</p>	8,172	Orto-cresol

et seq.

* ibid.

** ibid.

CONTINUACION TABLA 7.3

CLAVE RCRA	CODIGO NOM-CRP-001-ECOL/93	CODIGO CRETII	RESIDUO / PROCESO	COMPONENTES PRINCIPALES	CALOR DE COMBUSTION * kcal/kg	NOTAS CALOR DE COMBUSTION
F005	RPNE1.1/11	I,T	Los siguientes solventes gastados no-halogenados:	Tolueno Metil-etil-cetona Disulfuro de carbono Isobutanol Piridina Benceno 2-etoxietanol 2-nitropropano Todas las mezclas de estos, que contenían antes de ser usados al menos 10% en volumen de los solventes recién enlistados o de aquellos enlistados bajo los códigos F001, F002 o F004; y los fondos de la recuperación de estos solventes gastados y sus mezclas.	10,154 8,113 3,245 8,509 8,418 10,012 8,640 Aprox. 5,369	Ref. butanol
F037	RP10.2/02	T	Los lodos provenientes de la separación de petróleo, agua y sólidos, del proceso primario de la refinación del petróleo. Cualquier lodo generado por la separación gravitacional del petróleo, agua y sólidos, durante el almacenamiento; o el proceso de tratamiento de aguas residuales y del agua de enfriamiento grasosa de las refinerías.	Mezcla de lodos que contiene : Benceno Benzopireno Criseno (Adicionalmente, estos lodos contienen plomo y cromo).	10,000	Aproximado Referencia: Benceno
F038	RP10.2/01	T	Los lodos (emulsionados) provenientes de la separación de petróleo, agua y sólidos, del proceso secundario de refinación del petróleo.	Muy semejante al residuo anterior.	10,000	Aproximado Referencia: Benceno.

et seq.

* (bid.

CONTINUACION TABLA 7.3

CLAVE RCRA	CODIGO NOM-CRP-001-ECOL/93	CODIGO CRETI	RESIDUO / PROCESO	COMPONENTES PRINCIPALES	CALOR DE COMBUSTION * kcal/kg	NOTAS CALOR DE COMBUSTION
II.- RESIDUOS DE FUENTES ESPECIFICAS I) QUIMICOS ORGANICOS						
	RP10.3.4/01	C,T,I	Corte lateral de la torre de destilación del proceso de producción del acetaldehído, vía oxígeno.	Crotonaldehído	7,744	
K 022	RP 17.16/01	T	Fondos pesados de destilación, de la producción de fenol/ acetona, a partir de cumeno.	Fenol Breas (hidrocarburos aromáticos policíclicos).	7,764 7,000 a 10,000	sólido Referencia: Naftaleno.
K 023	RP 17.2/01	T	Productos terminales ligeros de la producción de anhídrido ftálico a partir de naftaleno.	Anhídrido ftálico Anhídrido maleico	5,293 3,389	sólido sólido
K 024	RP 17.2/02	T	Fondos de destilación de la producción de anhídrido ftálico a partir de naftaleno.	Anhídrido ftálico 1,4 Naftoquinona	7,000 a 10,000 5,293 7,003	Referencia: sólido sólido
K 083		T	Fondos de destilación de la producción de anilina.	Difenilamina Anilina	9,090 8,728	sólido
K 103		T	Residuos del proceso de extracción de anilina, en la producción de anilina.	Nitrobenceno Feniléndiamina	6,010 7,708	sólido
K 093	RP17.3/01	T	Productos terminales ligeros de la producción de anhídrido ftálico a partir de orto-xileno.	Anhídrido ftálico Anhídrido maleico	5,293 3,389	sólido sólido
K 094	RP17.3/02	T	Fondos de destilación de la producción de anhídrido ftálico a partir de orto-xileno.	Anhídrido ftálico	5,293	sólido

et seq.

* ibid.

CONTINUACION TABLA 7.3

CLAVE RCRA	CODIGO NOM-CRP-001-ECOL/93	CODIGO CRETI	RESIDUO / PROCESO	COMPONENTES PRINCIPALES	CALOR DE COMBUSTION * kcal/kg	NOTAS CALOR DE COMBUSTION
K 149		T	Fondos de destilación de la producción de alfa- (o metil-) cloro toluenos, toluenos clorados en el anillo, cloruros de benzoilo, y compuestos con mezclas de estos grupos funcionales. Este grupo no incluye fondos de la destilación de clouro de bencilo.	Tolueno Cloruro de bencilo Triclorobenceno Clorobenceno	10,154 7,035 4,400 6,667	Aproximado Referencia: p-dicloro-benceno
K 085	RP17.6/01	T	Fondos de destilación o fraccionamiento de la producción de clorobencenos.	Benceno compuestos aromáticos policlorados	10,012 4,400	Aproximado. Referencia: p-dicloro-benceno
K 113		T	Colas ligeras condensadas de la purificación de toluéndiamina vía la hidrogenación de dinitrotolueno.	2,4 toluéndiamina o-toluidina p-toluidina Anilina	9,000 9,012 8,957 8,728	Aproximado. Referencia: Toluidina.
K 114		T	Compuestos vecinales de la purificación de toluéndiamina vía la hidrogenación de dinitrotolueno.	Los mismos del residuo anterior, excepto anilina.		
K 115		T	Colas pesadas de la purificación de toluéndiamina vía la hidrogenación de dinitrotolueno.	2,4 toluéndiamina	9,000	Aproximado. Referencia: Toluidina.

et seq.

* ibid.

CONTINUACION TABLA 7.3

CLAVE RCRA	CODIGO NOM-CRP-001-ECOL/93	CODIGO CRETI	RESIDUO / PROCESO	COMPONENTES PRINCIPALES	CALOR DE COMBUSTION * kcal/kg	NOTAS CALOR DE COMBUSTION	
2) PRODUCTOS QUIMICOS COMERCIALES, O PRODUCTOS INTERMEDIOS FUERA DE ESPECIFICACION.							
U 001	CV.01	I		Acetaldehído	6,336	Sólido Ref. Butanol	
U 003		I,T		Acetonitrilo	7,376		
U 004		T		Acetofenona	8,263		
U 012		I,T		Anilina	8,728		
U 192		T		Benzamida	7,005		
U 019		I,T		Benceno	10,012		
U 159		I,T		2- Butanona	8,640 Aprox.		
U 092		I,T		Dimetilamina	9,260		
U 125		I		Furfural	5,828		
U 165		T		Naftaleno	9,623		
U 166		T		1,4-Naftoquinona	6,967		
U 167		T		Alfa-naftilamina	8,836		
U 169		C.O.013		I,T	Nitrobenceno		6,010
U 188		C.V.012		T	Fenol		7,764
U 194		C.V.017		I,T	n-Propilamina		9,582
U 196				T	Piridina		8,418
U 201				T	Resorcinol		6,194
U 328				T	o-Toluidina		9,012
U 353		T	p-Toluidina	8,957			
3) PRODUCCION DE PINTURAS- RESIDUOS DE MATERIAS PRIMAS.							
			I.- Aceites minerales, ácidos, monómeros y anhídridos				
	RPP1.1/01	T		Aceites aromáticos	16,000 a 18,000	Aproximado	
	RPP1.1/02	T		Aceites nafténicos	16,000 a 18,000	Aproximado	
U 190	RPP1.1/06	T,I		Acido isoftálico	4,628	Sólido	
	RPP1.1/09	I		Anhídrido ftálico	5,293		
	RPP1.1/10	I		Anhídrido maleico	3,389		
	RPP1.1/12	I		Monómero de acrilato de etilo	6,600		

et seq.

* fbid.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

CONTINUACION TABLA 7.3

CLAVE RCRA	CODIGO NOM-CRP-001-ECOL/93	CODIGO CRETI	RESIDUO / PROCESO	COMPONENTES PRINCIPALES	CALOR DE COMBUSTION * kcal/kg	NOTAS CALOR DE COMBUSTION
	RPP1.1/13	T		Monómero de metacrilato de etilo	7,039	
	RPP1.1/14	I		Monómero de metacrilato de isobutilo	8,000	Aproximado
			2.- Peróxidos y plastificantes, polioles y varios.			
	RPP2.1/04	I		Pentaeritrol	4,850	
	RPP2.1/05	I		Propilenglicol	5,671	
	RPP2.1/06	I		Trimetiloetano	11,650 Aprox.	Ref. Pentano
	RPP2.1/07	I		Trimetilopropano	11,570 Aprox.	Ref. Hexano
			3.- Resinas			
	RPP4.2/01	I		Alquidálicas de aceite larga		
	RPP4.2/02	T,I		Alquidálicas de aceite medio		
	RPP4.2/04	I		Fenólicas en solución	7,000 a 8,000	Referencias: Fenolformaldehído, Gliptal.
	RPP4.4/03	T,I		Fenólicas modificadas y en solución.		
			4.- Solventes			
U 002	RPP5.1/01	I		Acetato de butil carbitol	7,800	Estimado +
	RPP5.1/03	I		Acetato de carbitol	9,000	Estimado +
	RPP5.1/06	I		Acetona	7,378	
	RPP5.1/07	I		Alcohol diacetona	7,222	
	RPP5.1/08	I		Alcohol etílico	7,102	
U 140	RPP5.1/09	I		Alcohol isobutílico	8,509	
	RPP5.1/10	I		Alcohol polivinílico	4,500 Aprox.	Ref. Cloruro de vinilo
	RPP5.1/11	I		Aromina 100	8,700 Aprox.	Ref. Anilina
U 031	RPP5.1/12	I		Aromina 150	8,700 Aprox.	Ref. Anilina
	RPP5.1/13	I		n-Butanol	8,642	
U 057	RPP5.1/14	I		Ciclohexanona	8,572	
	RPP5.1/16	I		Eter metílico del etilenglicol	5,266	
	RPP5.1/17	I		Eter monobutílico del dietilenglicol	7,778	
	RPP5.1/18	T,I		Eter monoetilico del etilenglicol	7,222	

et seq.

* ibid

+ Mediante la Fórmula de Dulong: Poder calorífico total = 14,544 C + 62,028 (H - O/8) + 4,050 S en Btu / lb. Donde C, H, O, S son las fracciones en peso del carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre del combustible, respectivamente. Cfr. Himmelblau, D. *loc.cit.*

CONTINUACION TABLA 7.3

CLAVE RCRA	CODIGO NOM-CRP-001-ECOL/93	CODIGO CRET1	RESIDUO / PROCESO	COMPONENTES PRINCIPALES	CALOR DE COMBUSTION * kcal/kg	NOTAS CALOR DE COMBUSTION
U 154	RPP5.1/20	I		2-etil-hexil-alcohol	9,711	Ref. Eteres de glicoles. Ref. Ciclohexano
	RPP5.1/19	T,I		Eter monopropilico del etilenglicol	6,800 Aprox.	
	RPP5.1/21	I		Gas Nafta	11,000	
	RPP5.1/24	T,I		Metil isobutil cetona (MIBK)	5,778	
	RPP5.1/25	I		2-Nitropropano	5,369	
	RPP5.1/26	I		VMP Nafta	10,111	
	RPP5.1/27	I		Heptano	11,499	
	RPP5.1/28	I		Hexano	10,692	
	RPP5.1/29	I		Isopropanol	7,913	
	RPP5.1/30	I		Metanol	5,426	
4) COMPONENTES ELECTRONICOS:						
	RP3.1/01	I,T	1.- Operaciones de maquila, formación y termoformación plástica de los componentes.	Aceites residuales de las operaciones.	8,500 a 10,000	Aceites minerales
	RP3.3/01	T	2.- Operaciones de revestimiento de componentes electrónicos	Residuos de pintura.	5,000 a 6,000	Ref. Metilisobutil-cetona
5) MATERIALES PLASTICOS Y RESINAS SINTETICAS						
	RP7.1/01	T, I	1.- Producción de fibra de rayón. 2.- Producción de latex estireno butadieno. 3.- Producción de resinas acrilonitrilo butadieno estireno. 4.- Producción de resinas derivadas de fenol.	En todos los casos: Fondajes de tanques de almacenamiento de monómeros.	6,000 a 10,000	Referencias: Celulosa
	RP7.2/01	T, I				Butadieno,
	RP7.3/01	T				Estireno
	RP7.4/01	T, I				Fenol-formaldehído,

el seq.

*ibid.

CONTINUACION TABLA 7.3

CLAVE RCRA	CODIGO NOM-CRP-001-ECOL/93	CODIGO CRET1	RESIDUO / PROCESO	COMPONENTES PRINCIPALES	CALOR DE COMBUSTION * kcal/kg	NOTAS CALOR DE COMBUSTION
	RP7.5/02	T, I	Continuación Resinas: 5.- Producción de resinas poliéster.	En todos los casos:		Referencias: Acrilonitrilo,
	RP7.8/01	T, I	6.- Producción de resinas vinílicas.	Fondajes de tanques de almacenamiento de monómeros.	6,000 a 10,000	Estireno
6) METALMECANICA- Producción en general.						
	RP8.1/05	T, I		Pinturas, solventes, lodos, limpiadores y residuos provenientes de las operaciones de recubrimiento, pintado, y limpieza	5,000 a 10,000	Referencias: Disolventes diversos: tolueno, xileno, MIBK

* ibid.

Fuentes: SEDESOL. 1994. NOM-052-ECOL-1993. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación 29-XI-94. Anexo 2, Tabla 1.
Resource Conservation and Recovery Act. Regulations and Keyword Index. 1993. Lakewood, Colorado: McCoy and Associates, Inc. partes 261.24-261.33, 261-apéndice VII.
 Heat of Combustion for Organic Compounds. 1993. Michigan, In: Cadence Resources, Inc.

4.- LA APLICACION EN MEXICO DE LA TECNOLOGIA DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS EN HORNOS DE CLINKER.

En México es muy viable la aplicación creciente de esta tecnología. Ocupamos el décimo lugar dentro de los países productores de cemento;¹ y existen hoy en día 35 plantas cementeras distribuidas en todo el país.

4.1. GENERACION DE RESIDUOS SUSCEPTIBLES DE SER COMBUSTIBLES ALTERNOS.

La generación anual de residuos industriales se estima en 450,000 toneladas diarias,² de las cuales se calcula, que 14,500 corresponden a residuos peligrosos. Anualmente, esta última cifra significa 5.3 millones de toneladas. Un estudio realizado en 1992 por las compañías *CEMTECH LP* y *CHEMICAL WASTE MANAGEMENT DE MEXICO, S.A. DE C.V.*, estima que de éstas 5.3 millones de toneladas métricas, 431,300 (475,000 toneladas cortas³); es decir, poco más del 8% podrían ser residuos susceptibles de ser utilizados como combustibles alternos en hornos de clinker.

Este mismo estudio de mercado, estima a partir de reportes provenientes de las autoridades mexicanas y norteamericanas, y de estudios hechos por consultores especializados; que los residuos susceptibles de ser combustibles alternos, en 1991 tenían el destino que se describe a continuación en la *Tabla No. 1.4*.

En 1995, el panorama ha cambiado en comparación con 1991. En aquel año, ninguna compañía cementera mexicana estaba quemando combustibles alternos. *CEMENTOS APASCO, S.A DE C.V.* y *CEMENTOS MEXICANOS, S.A.* iniciaban sus proyectos: de quemado de residuos industriales orgánicos; y de combustión de llantas, respectivamente.

La *Tabla No. 2.4* indica un estimado de los porcentajes correspondientes a los métodos de manejo de los residuos orgánicos industriales Hasta finales de 1994.

¹ Información proporcionada por la Cámara Nacional del Cemento.

² SEDESOL, *loc. Cit.*

³ Gynn, M. Mexico Fuels Report. 1992. CEMTECH, CHEMICAL WASTE MANAGEMENT DE MEXICO, S.A. de C.V. (1 tonelada corta es igual a 2,000 libras. 1 tonelada métrica es igual a 2,202.6 libras).

TABLA No. 1.4 ESTIMACION DEL DESTINO DE LOS RESIDUOS ORGANICOS EN MEXICO EN EL AÑO 1991.	
METODO DE MANEJO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS ORGANICOS, 1991.	VOLUMEN ESTIMADO DE RESIDUOS (Volumen expresado en toneladas cortas) (2,000 lb = 1 ton corta).
Descargados directamente al drenaje.	270,000 tons (57%)
Rellenos sanitarios municipales, almacenamiento en planta, reciclaje y reuso en calentadores industriales, destilación en planta.	118,000 tons (25%)
Recibidos en el Centro de Tratamientos Especializados y Disposición Final de RIMSA (<i>Residuos Industriales Multiquim, S.A de C.V.</i>) (Mina, N.L.)	82,600 tons (17%)
Programas de recuperación de energía en E.U.A. proporcionados por CWMM e intermediarios, principalmente para la industria maquiladora.	4,400 tons (1%)
TOTAL:	475,000 toneladas (100%)

* FUENTE: GYNN, M. 1992. Mexico Fuels Report. Cemtech LP, Chemical Waste Management de México, S.A de C.V.

TABLA No. 2.4 ESTIMACION DEL DESTINO DE LOS RESIDUOS ORGANICOS EN MEXICO EN EL AÑO 1994.	
METODO DE MANEJO DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS ORGANICOS, 1991.	VOLUMEN ESTIMADO DE RESIDUOS (Volumen expresado en toneladas cortas) (2,000 lb = 1 ton corta).
Descargados directamente al drenaje.	261,250 tons (55%)
Rellenos sanitarios municipales, almacenamiento en planta, reciclaje, reuso en calentadores industriales, destilación en planta, y combustión en hornos ladrilleros.	71,250 tons (15%)
Recibidos en el Centro de Tratamientos Especializados y Disposición Final de RIMSA (Mina, N.L.)	95,000 tons (20%)
Programas de recuperación de energía en hornos de clinker, mediante el uso de combustibles alternos.	47,500 tons (10%)
TOTAL:	475,000 toneladas (100%)

El estimado correspondiente a 1994 se basa en los siguientes hechos:

1.- Las autoridades han tenido una mayor exigencia con respecto a las industrias generadoras de residuos peligrosos, y una mayor capacidad de inspección y auditoría. Esto explica que haya disminuido el porcentaje de residuos desechados a través del drenaje.

2.- Existe una importante industria de reciclaje de solventes. Hay varias empresas grandes dedicadas a esta actividad. Entre ellas, destacan por su importancia tres: *QUIMICA OMEGA, S.A DE C.V.*, *QUIMICA WIMER, S.A. DE C.V.*, Y *REIND QUIMICA, S.A. DE C.V.* Sin embargo, el reciente retiro de *TEXACO* como el principal recuperador de aceites, explica la disminución de los residuos destinados al reciclaje. Por otro lado, abundan empresas ladrilleras que queman residuos orgánicos como combustible para la fabricación de ladrillos. Esta práctica es ilegal por la contaminación atmosférica y del suelo que genera, pero desafortunadamente, es frecuente en nuestro país.

3.- A pesar de la diversificación de opciones para el manejo de los residuos orgánicos, El Centro de Tratamientos Especializados y Disposición Final operado por *RIMSA (Residuos Industriales Multiqum, S.A de C.V.)*, ha tenido un fuerte crecimiento de 1991 a 1994. Adicionalmente, dicho Centro también cuenta con una planta para la recuperación de solventes.

4.- Ya a finales de 1994, había 6 hornos de compañías cementeras quemando combustibles alternos. Por su parte, el residuo más demandado para este efecto es el aceite lubricante. Esto explica que la mayor parte del aceite que antes recuperaba *TEXACO*, actualmente sea quemado en los hornos a los que se hizo referencia. Más adelante en este capítulo, se especifica cuáles son las empresas que operan dichos hornos.

Principales zonas industriales que generan residuos susceptibles de ser combustibles alternos.

En la *Tabla No. 3.4* se detalla el volumen generado en cuatro importantes zonas geográficas de México en las que se generan residuos orgánicos adecuados para ser utilizados como combustibles alternos en hornos de clinker. Dicha información proviene del mismo estudio de mercado al que se hizo referencia anteriormente, con cifras de 1991.

TABLA No. 3.4 PRINCIPALES ZONAS INDUSTRIALES GENERADORAS DE RESIDUOS SUSCEPTIBLES DE SER COMBUSTIBLES ALTERNOS.		
CIUDAD / ZONA GEOGRAFICA	NUMERO DE INDUSTRIAS ENTREVISTADAS	VOLUMEN ANUAL DE RESIDUOS APTOS PARA SER COMBUSTIBLES ALTERNOS, Litros.
Ciudad de México	15	2,822,605
Guadalajara, Jal.	8	1,347,990
Monterrey, N.L.	14	1,343,410
Zona fronteriza con E.U.A. (Maquiladoras)	25	3,996,960
TOTAL	62	9,510,965

* FUENTE: GYNN, M. 1992. Mexico Fuels Report, Cemtech LP, Chemical Waste Management de México, S.A de C.V

Por otra parte, de acuerdo con este estudio de mercado, las principales industrias generadoras de residuos aptos para ser combustibles alternos, y el volumen que generan se muestran a continuación en la *Tabla No. 4.4.*

TABLA 4.4 MERCADO DE LA GENERACION DE RESIDUOS APTOS PARA SER COMBUSTIBLES ALTERNOS EN LAS ZONAS INDUSTRIALES MAS IMPORTANTES DE MEXICO.			
GIRO INDUSTRIAL	NUMERO DE INDUSTRIAS ENTREVISTADAS.	VOLUMEN ANUAL DE RESIDUOS APTOS PARA SER COMBUSTIBLES ALTERNOS, litros	% DEL TOTAL DE RESIDUOS CONSIDERADOS
1.- Automotriz	11	2,144,960	22.5%
2.- Químico	14	1,109,950	11.7%
3.- Electrónico	5	26,135	0.3%
4.- Manufactura de pinturas	17	2,102,300	22.1%
5.- Farmacéutico	8	2,872,815	30.2%
6.- Refinería (PEMEX)	2	0 (CERO)	0%
7.- Otros	5	1,254,805	13.2%
TOTAL:	62	9,510,965	100%

* FUENTE: GYNN, M. 1992. Mexico Fuels Report, Cemtech LP, Chemical Waste Management de México, S.A de C.V

Es cuestionable el hecho de que aparezca la industria farmacéutica como el principal generador, ya que en comparación con el giro automotriz o de pinturas, genera un volumen mucho menor de residuos. Sin embargo, aquí se reproduce el dato exacto proporcionado por el estudio de mercado citado.

Haciendo caso omiso de la industria de refinación, los giros industriales automotriz, químico y de pinturas, podrían representar el 90% del volumen total de residuos aptos para ser combustibles alternos, como se ilustrará más adelante.

La industria de refinación, a cargo de *PETROLEOS MEXICANOS*, por su volumen de producción de hidrocarburos, muy probablemente sería la más importante; sin embargo, no existe información disponible sobre el volumen de residuos que genera.

Otro estudio de mercado sobre la generación de residuos en general, por giro industrial, fue realizado por la empresa *CONSORCIO QUIMICO DE TOLUCA, S.A. DE C.V.*, en Toluca y las zonas circunvecinas del Estado de México. Teniendo como universo a 200 industrias de diversos ramos, se seleccionaron sólo los más importantes en cuanto a la generación de residuos susceptibles de ser combustibles alternos. Los giros seleccionados coinciden con los del estudio de mercado cuyos resultados se presentaron en la *Tabla 4.4*; pero se añadió a la industria metal-mecánica, que como se verá, tiene mayor importancia que la electrónica y la farmacéutica. A continuación, se resume en la *Tabla No.5.4* el análisis de la información proporcionada por el estudio al que se hace referencia.

GIRO INDUSTRIAL	NUMERO DE INDUSTRIAS ENTREVISTADAS.	VOLUMEN ANUAL DE RESIDUOS APTOS PARA SER COMBUSTIBLES ALTERNOS, ton métricas	% DEL TOTAL DE RESIDUOS CONSIDERADOS
1.- Industria química: de proceso; de especialidades químicas y limpieza; y del plástico.	80	229.1	47.2%
2.- Industria automotriz.	7	132.5	27.3%
3.- Industria de pinturas y tintas.	14	76	15.6%
4.- Industria metal-mecánica.	40	24.3	5%
5.- Industria farmacéutica	12	21.5	4.4%
6.- Industria electrónica.	10	2.4	0.5%
TOTAL:	163	485.8	100%

*FUENTE: CONSORCIO QUIMICO DE TOLUCA, S.A. DE C.V. 1994. *Generación de Residuales por Giro Industrial en el Valle de Toluca, Estado de México.* Toluca, Estado de México.

Los resultados de este estudio de mercado son lógicos desde el punto de vista cualitativo, y podrían considerarse como una muestra válida de todo el país; ya que, Toluca y las zonas industriales circunvecinas del Estado de México, cuentan con muy importantes industrias de los giros mencionados a nivel nacional, y de otros como el textil, el de manufactura de papel, y el del vidrio. Respecto su validez cuantitativa, es muy difícil avalar cualquier estudio de este tipo; ya que, en general, las industrias son reacias a declarar la verdad sobre el volumen de residuos que generan.

Generación de residuos aptos para ser combustibles alternos, por giro industrial.

De acuerdo con el mismo estudio, a continuación se exponen algunos de los residuos característicos de cada industria, susceptibles de ser combustibles alternos:

INDUSTRIA QUIMICA DE PROCESO:	INDUSTRIA QUIMICA DE LIMPIEZA	INDUSTRIA AUTOMOTRIZ
A) Líquidos: - Aceite - Solvente sucio - Glicoles - Polioles/poliéster - Alcoholes - Acido tereftálico - Acetona B) Sólidos: - Carbón activado - Resina gelada - Estopa/trapo. - Latex - Natas de pintura.	- Aceite - Nonil fenol	A) Líquidos: - Aceite - Petróleo - Xilol/toluol - "Gas nafta" B) Sólidos: - Natas de pintura - Resina gelada
	INDUSTRIA DEL PLASTICO	
	A) Líquidos: - Aceite - Monómero de estireno - Solvente sucio B) Sólidos: - Estopa - Resina gelada - Hule vulcanizado	INDUSTRIA DE PINTURAS Y TINTAS
INDUSTRIA METAL MECANICA	INDUSTRIA FARMACEUTICA	A) Líquidos: - Alcohol - Aceite - Pintura obsoleta - Solvente sucio - <i>Thinner</i> - Acetona - Solvente con pintura - Tintas con solventes B) Sólidos: - Resina alquidálica - Resina fenólica
A) Líquidos: - Aceite - Solvente sucio B) Sólidos: - Natas de pintura - Carbón - Estopa	A) Líquidos: - Aceites - Alcohol - Acetona - Heptano B) Sólidos: - Carbón activado.	INDUSTRIA ELECTRONICA
		- Aceite - Solventes y desengrasantes.

*FUENTE: CONSORCIO QUIMICO DE TOLUCA, S.A. DE C.V. 1994. Generación de Residuales por Giro Industrial en el Valle de Toluca, Estado de México. Toluca, Estado de México.

4.2 LA INDUSTRIA CEMENTERA EN MEXICO.

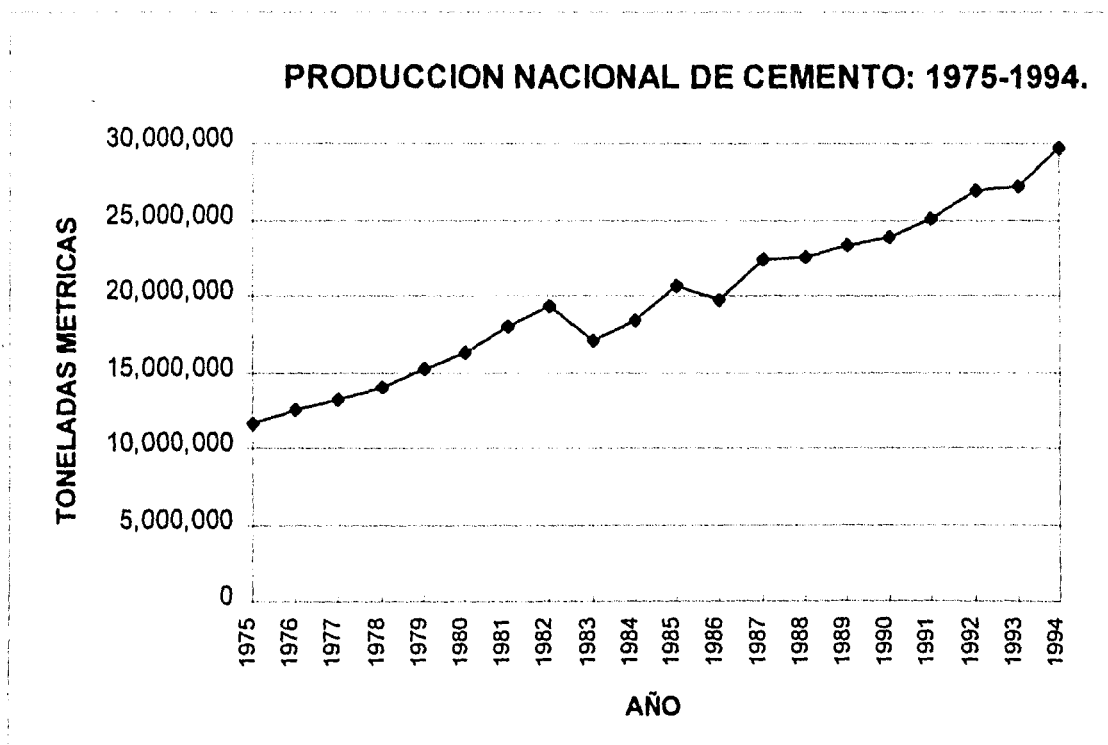
Esta industria es de las más productivas del país, y ha tenido un enorme crecimiento durante los últimos 20 años. Como ejemplo, la producción anual de 1975, se duplicó durante 1989. A continuación se presenta en la *Tabla No. 6.4* la producción anual de cemento Portland, del año 1975, a 1994.

AÑO	PRODUCCION ANUAL	AÑO	PRODUCCION ANUAL	AÑO	PRODUCCION ANUAL
1975	11,612,958	1982	19,297,512	1989	23,333,888
1976	12,584,109	1983	17,068,283	1990	23,824,188
1977	13,227,087	1984	18,436,775	1991	25,092,771
1978	14,055,720	1985	20,680,762	1992	26,885,862
1979	15,177,815	1986	19,741,272	1993	27,142,260 ⁺
1980	16,242,544	1987	22,347,427	1994	29,674,236
1981	17,978,011	1988	22,488,910		

* Fuente: Cámara Nacional del Cemento. 1994: México, D.F

+ Dato estimado por la Cámara, por falta de información completa correspondiente a ese año.

En la siguiente gráfica se puede observar la tendencia de crecimiento de esta industria



Por otra parte, la industria cementera está produciendo a un nivel que oscila entre el 75 y el 80% de su capacidad instalada. En el año de 1993, ésta era de 35,500,000 toneladas métricas anuales; y la producción de este año significó un 75% de esta cifra.

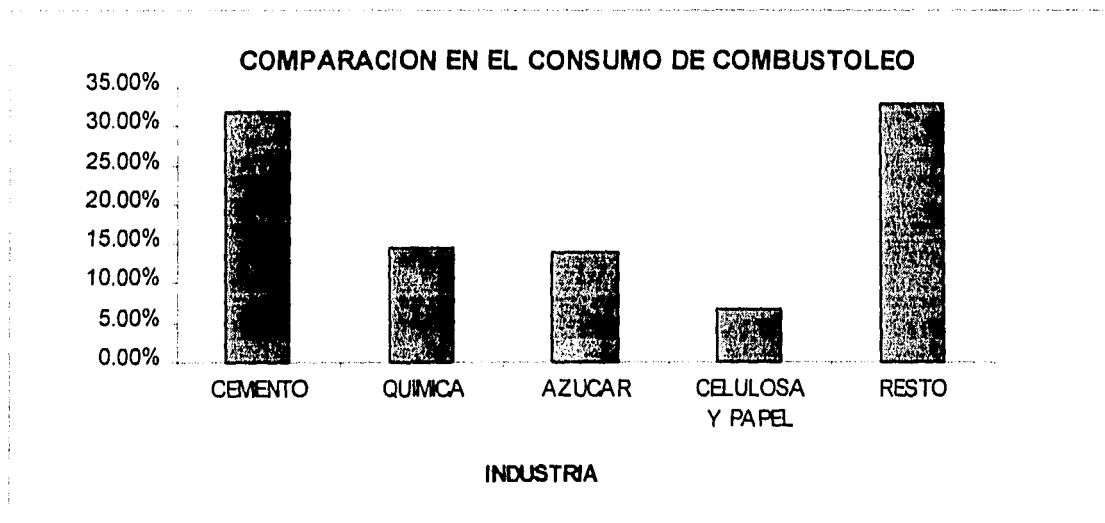
Consumo de Energía de la Industria del Cemento

Esta es una industria intensiva en energía. El combustible utilizado en los hornos de clinker, representa entre el 25 y el 30% de los costos totales de producción del cemento Portland. Como a continuación se detalla en la *Tabla No.7.4*, en comparación con otras industrias consideradas individualmente, la del cemento es la de mayor consumo de combustóleo a nivel nacional. La gráfica contigua ilustra con claridad este hecho.

TABLA 7.4 CONSUMO DE COMBUSTOLEO EN MEXICO, POR GIRO INDUSTRIAL		
GIRO INDUSTRIAL	CONSUMO (Petacalorías/año)	PORCENTAJE
1.- Industria del cemento	20.3 pcal	31.9 %
2.- Industria química	9.2 pcal	14.5 %
3.- Industria del azúcar	8.9 pcal	14.0 %
4.- Industria de la celulosa y papel	4.3 pcal	6.8 %
5.- Resto de las industrias	20.8 pcal	32.8 %
CONSUMO TOTAL:	63.5 pcal	100 %

* Fuente: SEMIP. 1993. Balance Nacional de Energía. Principales Ramas Consumidoras de Energéticos Industriales, 1993. México, D.F.

* Nota: 1 petacaloría = 10¹⁵ cal.



Por otro lado, las principales fuentes de energía utilizadas en la industria mexicana, y el lugar de importancia que ocupan de acuerdo a su consumo es el siguiente:

1) Gas natural	131.2 pcal	54.4 %
2) Combustóleo	63.5 pcal	26.3 %
3) Electricidad	46.6 pcal	19.3 %
TOTAL:	241.3 pcal	100 %

* Nota: 1 petacaloría = 10^{15} cal.

La información energética citada significa que la industria cementera consume sola, el 8.4 % de la energía total consumida por la planta industrial mexicana.

De esto se desprende la importancia de una estrategia enfocada al ahorro de energía, por parte de la industria del cemento. Si sólo se sustituyera por combustibles alternos el 10% del combustóleo consumido por esta industria, se ahorrarían 2 petacalorías, que representan casi la mitad de la energía consumida por la industria de la celulosa y el papel; que, de acuerdo a la información expuesta, es la cuarta industria nacional más importante en el consumo de combustóleo.

Localización de las Plantas de Cemento en México

En el vasto territorio de la República Mexicana, existen 35 plantas cementeras. A continuación se escriben los nombres de las compañías que operan dichas plantas, y su localización geográfica.⁴

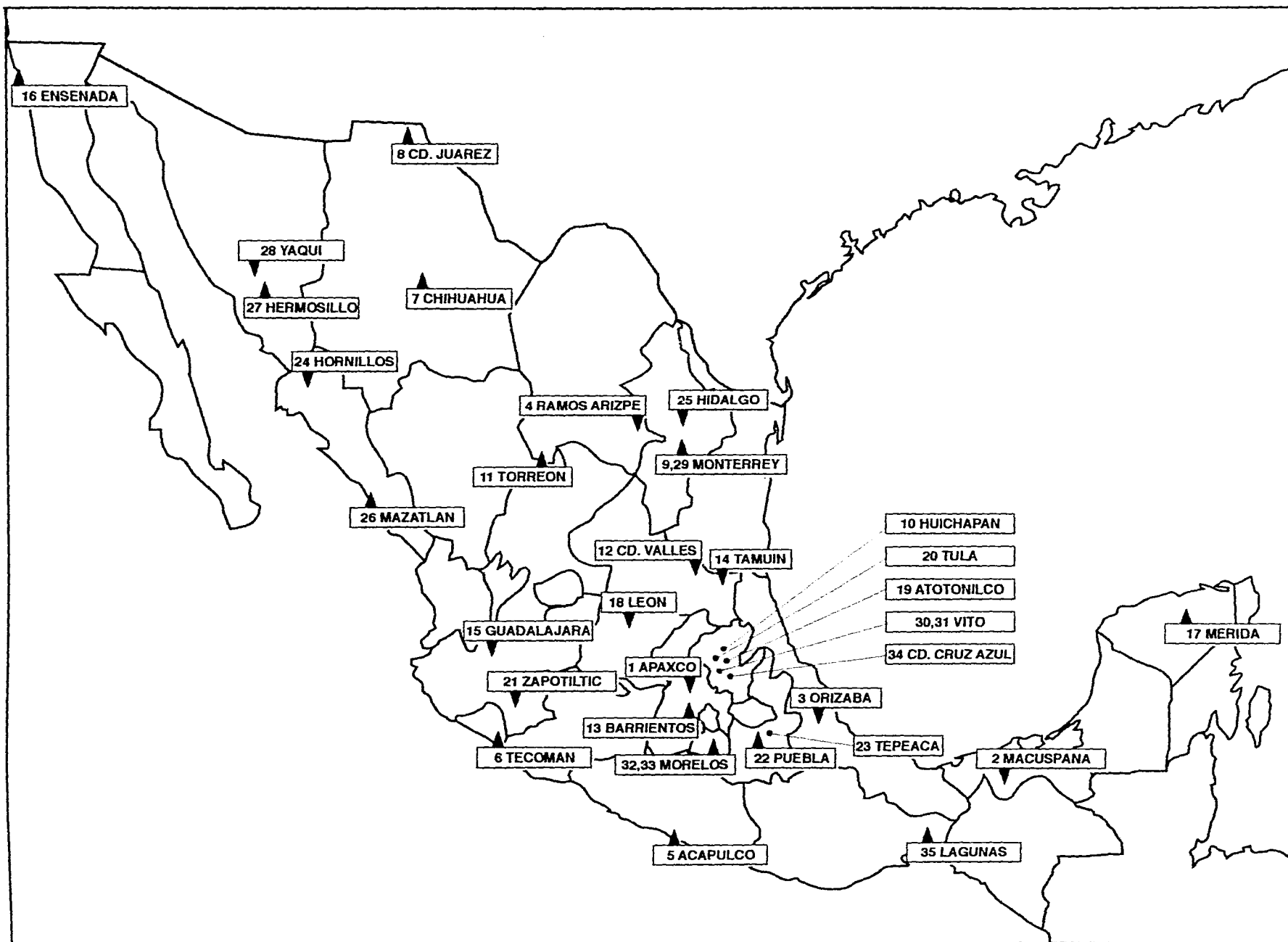
1.- Cementos Apasco, S.A. de C.V. (Apaxco, Edo. Mex.)	Grupo APASCO
2.- Cementos Apasco, S.A. de C.V. (Macuspana, Tab.)	Grupo APASCO
3.- Cementos Apasco, S.A. de C.V. (Orizaba, Ver.)	Grupo APASCO
4.- Cementos Apasco, S.A. de C.V. (Ramos Arizpe, Coah.)	Grupo APASCO
5.- Cementos Apasco, S.A. de C.V. (Acapulco, Gro.)	Grupo APASCO
6.- Cementos Apasco, S.A. de C.V. (Tecomán, Col.)	Grupo APASCO
7.- Cementos Chihuahua, S.A. de C.V. (Chihuahua, Chih.)	Grupo CEMENTOS CHIHUAHUA
8.- Cementos Chihuahua, S.A. de C.V. (Cd. Juárez, Chih.)	Grupo CEMENTOS CHIHUAHUA
9.- Cementos Mexicanos, S.A. (Monterrey, N.L.)	Grupo CEMEX
10.- Cementos Mexicanos, S.A. (Huichapan, Hgo.)	Grupo CEMEX

⁴ Cámara Nacional del Cemento. 1995. Plantas de Cemento en la República Mexicana. México, D.F.

11.- Cementos Mexicanos, S.A. (Torreón, Coah.)	Grupo CEMEX
12.- Cementos Mexicanos, S.A. (Cd. Valles, S.L.P.)	Grupo CEMEX
13.- Cementos Anáhuac, S.A. de C.V. (Barrientos, Edo. de Méx.)	Grupo CEMEX
14.- Cementos Anáhuac del Atlántico, S.A. de C.V. (Tamuín, S.L.P.)	Grupo CEMEX
15.- Cementos Guadalajara, S.A. (Guadalajara, Jal.)	Grupo CEMEX
16.- Cementos Guadalajara, S.A. (Ensenada, B.C.)	Grupo CEMEX
17.- Cementos Maya, S.A. (Mérida, Yuc.)	Grupo CEMEX
18.- Cementos del Valle, S.A. (León, Gto.)	Grupo CEMEX
19.- Cementos Tolteca, S.A. de C.V. (Atotonilco, Hgo.)	Grupo CEMEX
20.- Cementos Tolteca, S.A. de C.V. (Tula, Hgo.)	Grupo CEMEX
21.- Cementos Tolteca, S.A. de C.V. (Zapotiltic, Jal.)	Grupo CEMEX
22.- Cementos Atoyac, S.A. de C.V. (Puebla, Pue.)	Grupo CEMEX
23.- Cementos de Oriente, S.A. de C.V. (Tepeaca, Pue.)	Grupo CEMEX
24.- Cementos Sinaloa, S.A. de C.V. (Hornillos, Sin.)	Grupo CEMEX
25.- Cementos del Noreste, S.A. de C.V. (Hidalgo, N.L.)	Grupo CEMEX
26.- Cementos del Pacífico, S.A. de C.V. (Mazatlán, Sin.)	Grupo CEMEX
27.- Cementos Portland Nacional, S.A. de C.V. (Hermosillo, Son.)	Grupo CEMEX
28.- Cementos del Yaqui, S.A. de C.V. (Hermosillo, Son.)	Grupo CEMEX
29.- Cementos del Norte, S.A. de C.V. (Monterrey, N.L.)	Grupo CEMEX
30.- Cementos Portland Blanco de México, S.A. de C.V. (Vito, Hgo.)	Grupo PORTLAND BLANCO
31.- Cementos Activados de México, S.A. de C.V. (Vito, Hgo.)	Grupo PORTLAND BLANCO
32.- Cementos Portland Moctezuma, S.A. de C.V. (Jiutepec, Mor.)	Grupo PORTLAND MOCTEZUMA
33.- Cementos Portland Moctezuma, S.A. de C.V. (Tepetzingo, Mor.)	Grupo PORTLAND MOCTEZUMA
34.- Cooperativa La Cruz Azul, S.C.L. (Cd. Cruz Azul, Hgo.)	Grupo CRUZ AZUL
35.- Cooperativa La Cruz Azul, S.C.L. (Lagunas, Oax.)	Grupo CRUZ AZUL

A continuación se muestra un mapa de la República Mexicana, indicando la ubicación de las plantas cementeras mencionadas.

LOCALIZACION GEOGRAFICA DE LAS PLANTAS DE CEMENTO EN MEXICO



4.3 FACTIBILIDAD DE LA APLICACION DE LA TECNOLOGIA DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS EN MEXICO.

De acuerdo a lo expuesto sobre la industria cementera mexicana, es lógico pensar que México cuenta con una infraestructura adecuada para aplicar esta tecnología; especialmente, por la gran cantidad de plantas cementeras existentes, y por su distribución en todo el territorio nacional.

Actualmente, todavía ninguna empresa cementera mexicana cuenta con las autorizaciones definitivas para quemar residuos como fuente alterna de energía en sus hornos de clinker. Los hornos que actualmente lo están haciendo, se encuentran en la fase llamada de *Protocolo de Prueba*, requisito exigido por el *Instituto Nacional de Ecología*, para asegurarse que la combustión a la que se hace referencia, no tendrá efectos negativos en el ambiente.

Debido a la actual fase de prueba, los hornos cementeros que actualmente están quemando combustibles alternos, sustituyen entre el 5 y el 10% del combustóleo que normalmente usarían para producir el clinker. Se espera que, al igual que en Estados Unidos de América, y en Europa, en el futuro, se alcancen niveles de sustitución de combustóleo del 30 al 40%.

A continuación se mencionan las plantas cementeras mexicanas que actualmente están quemando combustibles alternos, y los residuos genéricos que están utilizando para dicho propósito.

Plantas Cementeras Mexicanas que Actualmente Están Quemando Combustibles Alternos:

PLANTA	RESIDUOS USADOS COMO COMBUSTIBLE ALTERNO.
1.- CEMENTOS MEXICANOS, Pta. Torreón, Coah.	Llantas, aceites, solventes
2.- CEMENTOS MEXICANOS, Pta. Huichapan, Hgo.	Llantas, aceites, solventes
3.- CEMENTOS TOLTECA, Pta. Zapotiltic, Jalisco	Aceites, solventes.
4.- CEMENTOS APASCO, Pta. Ramos Arizpe, Coah.	Aceites, solventes.
5.- CEMENTOS PORTLAND MOCTEZUMA, Pta. Jiutepec, Mor.	Aceites
6.- COOPERATIVA LA CRUZ AZUL, Cd. Cruz Azul, Hgo.	Aceites, solventes

Vale la pena destacar que las plantas que queman solventes como combustible alterno, disponen de los servicios propios o contratados de una planta formuladora de los combustibles. La planta que sólo

quemar aceites lubricantes, puede prescindir de la formulación del combustible, debido a las óptimas propiedades combustibles de este residuo, como se explicó en el capítulo 3 de esta tesis.

Se espera que conforme las empresas cementeras tengan mayores beneficios económicos derivados del uso de los combustibles alternos, y las autoridades mexicanas en materia de ecología promuevan esta tecnología, crecerá el número de hornos cementeros que la apliquen.

Factibilidad Económica del Uso de los Combustibles Alternos en Hornos de Clinker.

Debido a que el costo del combustóleo que utiliza un horno de clinker, representa entre un 25 y un 30% del costo total, la sustitución de este combustible por alternativas más baratas representa una opción atractiva para las empresas cementeras.

Es importante recordar la logística de la aplicación de la tecnología de los combustibles alternos en hornos de clinker, explicada en el capítulo 2 de esta tesis. En aquel apartado se mencionó que antes de la combustión, se requiere obviamente recolectar los residuos; y formular con ellos el combustible alternativo, con todas las implicaciones de control de calidad que se mencionaron en el capítulo 3. Esto se aclara debido a que la formulación del combustible alternativo, es estrictamente, un negocio diferente de aquel que se deriva del ahorro que puede obtener una empresa cementera al utilizar dichos combustibles. Si bien es cierto que, la cementera frecuentemente también es beneficiaria del negocio de la recolección y la formulación del combustible.

Una vez que se ha hecho la distinción anterior, se procederá a hacer un análisis del ahorro que puede obtener una compañía cementera, únicamente debido a la combustión de residuos orgánicos que se utilicen como combustible alternativo, sustituyendo una fracción del combustóleo, que normalmente se utilizaría como fuente de energía en el proceso del clinker.

Por otro lado, podrían existir tres enfoques comerciales desde el punto de vista de la compañía cementera:

- 1) Pagar por el combustible alternativo.
- 2) No pagar nada.
- 3) Cobrar por el servicio de *destruir térmicamente* los residuos que se utilicen como combustible alternativo.

A continuación se presenta el análisis de los beneficios económicos del uso de combustibles alternos, desde el punto de vista de su combustión en un horno de clinker.

ANALISIS COSTO / BENEFICIO

COMPARACION DE COSTOS UNITARIOS ENTRE DOS OPCIONES:

1.- SI SE USA SOLO COMBUSTOLEO

2.- SI SE USA COMBUSTOLEO Y COMBUSTIBLE ALTERNO.

I.- INFORMACION BASICA:

BASE DE CALCULO UNITARIA: 1 TONELADA DE CLINKER PRODUCIDA.

CONSUMO UNITARIO DE ENERGIA: 960,000 kcal / ton de clinker
(Ver balance de energia)

CONSUMO UNITARIO DE COMBUSTOLEO: 0.095 ton combustóleo / ton de clinker.

CALOR DE COMBUSTION O PODER CALORIFICO: 10,080 kcal / kg
(Combustóleo)

PRECIO DEL COMBUSTOLEO:⁴ 479.34 N\$ / ton.
(Incluye abasto y traslado)

PRECIO EN DOLARES: 79.89 USD / ton
(1 USD = N\$ 6.00)

COSTO UNITARIO DE COMBUSTOLEO: 7.61 USD / ton

INVERSION DEL EQUIPO ESPECIAL 2,000,000.00 USD
PARA QUEMAR COMBUSTIBLES ALTERNOS.
(Orden de la inversión)

PERIODO DE DEPRECIACION DEL EQUIPO: 10 AÑOS
DEPRECIACION ANUAL: 200,000.00 USD

MANTENIMIENTO ANUAL DEL EQUIPO: 20,000.00 USD
ESTIMADO: 10% DE LA DEPRECIACION ANUAL.
Esta consideración se debe principalmente a posibles contingencias que puedan ocurrir.

PRODUCCION ANUAL DE CLINKER: 960,000 ton / año.
(Operando el horno 320 días, 87.8% de eficiencia.)

⁴ F.RUIZ E HIJOS, S.A. DE C.V. Principal distribuidor nacional de combustóleo autorizado por PEMEX.

ANALISIS COSTO / BENEFICIO

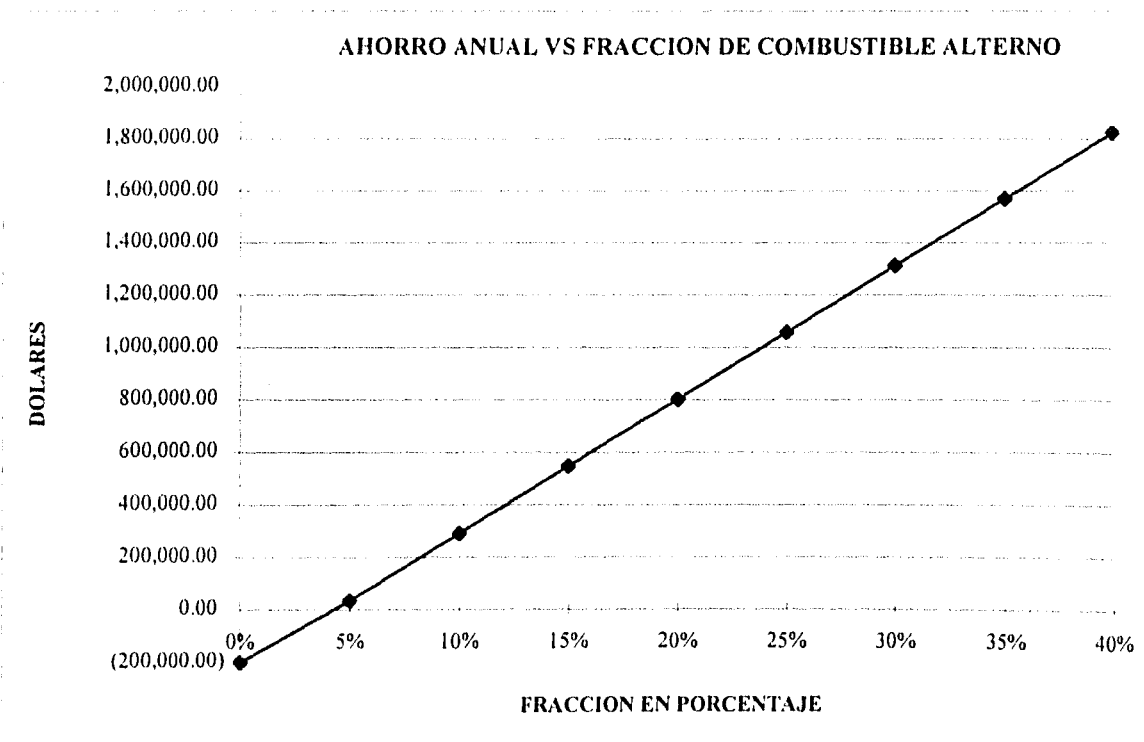
III.- RENTABILIDAD DEL PROYECTO A DIEZ AÑOS:

Aplicando los mismo cálculos del punto anterior tenemos lo siguiente:

A) SI EL COSTO DEL COMBUSTIBLE ALTERNO ES 30% DEL COSTO DEL COMBUSTOLEO.

FRACCION COMB. ALTERNO	COSTO UNITARIO DE COMBUSTIBLES	AHORRO UNITARIO DOLARES	AHORRO ANUAL DOLARES	TIEMPO DE RECUPERACION AÑOS	TASA REAL A DIEZ AÑOS %
0%	7.82	(0.21)	(200,000.00)		
5%	7.57	0.04	35,648.00	56.1	NO VIABLE
10%	7.31	0.30	291,296.00	6.9	7.4%
15%	7.04	0.57	546,944.00	3.7	24.2%
20%	6.77	0.84	802,592.00	2.5	38.5%
25%	6.51	1.10	1,058,240.00	1.9	52.1%
30%	6.24	1.37	1,313,888.00	1.5	65.2%
35%	5.97	1.63	1,569,536.00	1.3	78.2%
40%	5.71	1.90	1,825,184.00	1.1	91.1%

Haciendo una gráfica del ahorro con respecto a la fracción del combustible alterno utilizado:



ANALISIS COSTO / BENEFICIO

B) SI EL COSTO DEL COMBUSTIBLE ALTERNO ES NULO:

FRACCION COMB. ALTERNO	COSTO UNITARIO DE COMBUSTIBLES	AHORRO UNITARIO DOLARES	AHORRO ANUAL DOLARES	TIEMPO DE RECUPERACION AÑOS	TASA REAL A DIEZ AÑOS %
0%	7.82	(0.21)	(200,000.00)		
5%	7.46	0.15	145,211.43	13.8	NO VIABLE
10%	7.08	0.53	510,422.86	3.9	22.0%
15%	6.70	0.91	875,634.29	2.3	42.5%
20%	6.32	1.29	1,240,845.71	1.6	61.5%
25%	5.94	1.67	1,606,057.14	1.2	80.0%
30%	5.56	2.05	1,971,268.57	1.0	98.4%
35%	5.17	2.43	2,336,480.00	0.9	116.7%
40%	4.79	2.81	2,701,691.43	0.7	135.0%

C) SI EL HORNO COBRA POR QUEMAR C. ALTERNOS: 30% DEL VALOR DEL COMBUSTOLEO.

FRACCION COMB. ALTERNO	COSTO UNITARIO DE COMBUSTIBLES	AHORRO UNITARIO DOLARES	AHORRO ANUAL DOLARES	TIEMPO DE RECUPERACION AÑOS	TASA REAL A DIEZ AÑOS %
0%	7.82	(0.21)	(200,000.00)		
5%	7.34	0.27	254,774.86	7.9	4.6%
10%	6.85	0.76	729,549.71	2.7	34.6%
15%	6.35	1.25	1,204,324.57	1.7	59.6%
20%	5.86	1.75	1,679,099.43	1.2	83.7%
25%	5.36	2.24	2,153,874.29	0.9	107.6%
30%	4.87	2.74	2,628,649.14	0.8	131.4%
35%	4.38	3.23	3,103,424.00	0.6	155.1%
40%	3.88	3.73	3,578,198.86	0.6	178.9%

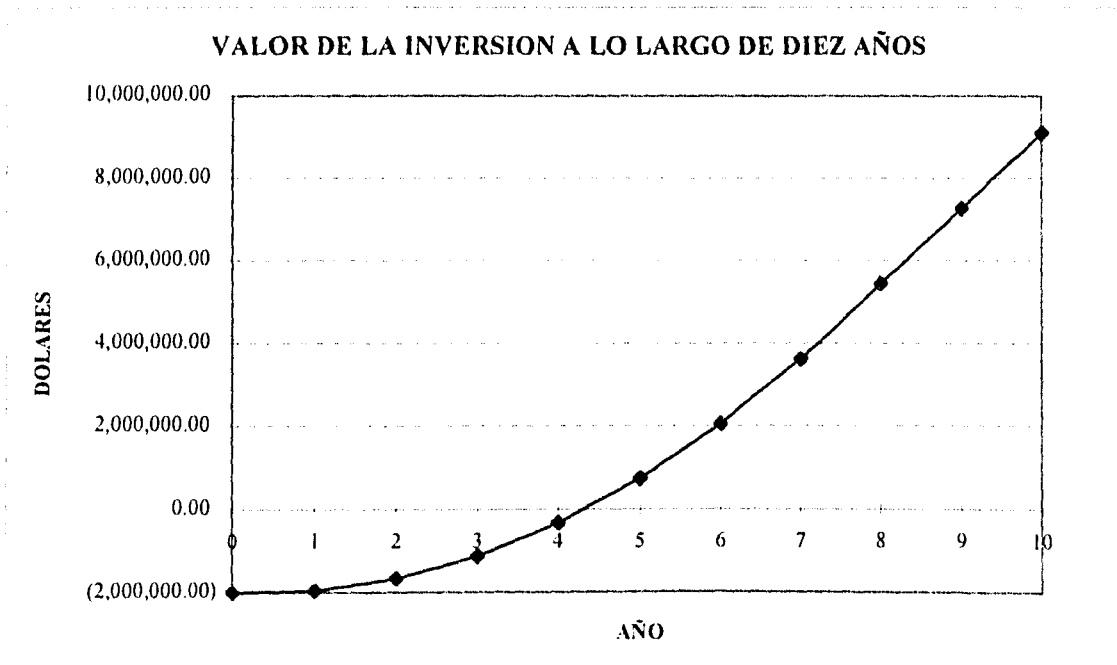
ANALISIS COSTO / BENEFICIO

EL CASO NORMAL DE UN HORNO SERIA QUE A LO LARGO DE 10 AÑOS, FUERA AUMENTANDO EL PORCENTAJE DE SUSTITUCION DE COMBUSTOLEO POR COMBUSTIBLE ALTERNO.

A continuación se ilustra este caso, considerando la situación más crítica, en la que la compañía cementera tuviera que pagar por el combustible alterno.

AÑO	FRACCION COMB. ALTERNO	COSTO UNITARIO DE COMBUSTIBLES	FLUJO DE EFECTIVO DOLARES	FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO
0	0%	7.82	(2,000,000.00)	(2,000,000.00)
1	5%	7.57	35,648.00	(1,964,352.00)
2	10%	7.31	291,296.00	(1,673,056.00)
3	15%	7.04	546,944.00	(1,126,112.00)
4	20%	6.77	802,592.00	(323,520.00)
5	25%	6.51	1,058,240.00	734,720.00
6	30%	6.24	1,313,888.00	2,048,608.00
7	35%	5.97	1,569,536.00	3,618,144.00
8	40%	5.71	1,825,184.00	5,443,328.00
9	40%	5.71	1,825,184.00	7,268,512.00
10	40%	5.71	1,825,184.00	9,093,696.00

Haciendo un gráfico del flujo de efectivo acumulado con respecto al tiempo:



ANALISIS COSTO / BENEFICIO

EL FLUJO DE EFECTIVO QUE SE MENCIONA EN CADA AÑO ES EL AHORRO DEBIDO AL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS, A UN PORCENTAJE PARTICULAR DE UTILIZACION.

Para este caso tenemos que:

- 1.- EL TIEMPO DE RECUPERACION DE LA INVERSION ES: 4.3 AÑOS
(Haciendo una interpolación lineal entre los años 4o. y 5o.)
- 2.- LA TASA REAL DE RECUPERACION A 10 AÑOS ES: 30.7%

De acuerdo a la información presentada, se puede observar que un proyecto de esta naturaleza es rentable a diez años. Después del séptimo, cuando ya se tiene experiencia en la aplicación de esta tecnología, y se puede llegar a sustituir un 40% del combustóleo por combustibles alternos, la estimación anterior demuestra que el proyecto sería extraordinariamente rentable durante los siguientes diez años.

Por lo que respecta a la posibilidad de que la planta cementera reciba el combustible alternativo a un costo nulo, o incluso recibiendo un beneficio económico -cobrando por quemar el combustible alternativo-, ésta dependería de los siguientes factores:

- 1.- Que la empresa cementera tuviera una co-inversión con las empresas de recolección de los residuos, y de este modo fuera participe de estos dos negocios adicionales al ahorro de combustible.
- 2.- Que la legislación ambiental del país, exigiera que ciertos residuos tuvieran que ser destruidos térmicamente para garantizar un mejor manejo del residuo, que anule riesgos ecológicos futuros. Esto promovería la demanda del servicio de destrucción térmica de ciertos residuos.

IV.- BENEFICIOS INTANGIBLES ADICIONALES A LOS ECONOMICOS:

- 1.- La compañía cementera dueña de un horno que utiliza combustibles alternos, presta un servicio a su comunidad, destruyendo térmicamente muchos residuos orgánicos.
- 2.- Con un buen manejo de publicidad, la misma compañía cementera puede promoverse como una empresa de vanguardia en el cuidado del ambiente, ya que aplica una tecnología que re-utiliza los residuos, y mediante su combustión, los elimina de manera definitiva.

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- Los residuos clasificados como peligrosos son aquellos que, por sus propiedades fisicoquímicas, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente. Sin embargo, la legislación norteamericana hace énfasis en que dichos residuos plantean un peligro sustancial presente o potencial, cuando son tratados, almacenados, transportados, o eliminados de una manera incorrecta. Por ello, se puede afirmar que la causa principal de que los residuos peligrosos constituyan un riesgo para la salud humana y el ambiente, es su manejo inadecuado. Para minimizar dicho riesgo, es necesario contar con la tecnología de tratamientos fisicoquímicos que modifiquen las propiedades de los residuos; o bien, que permitan su reutilización en otros procesos.

2.- El correcto manejo de los residuos peligrosos conlleva la implantación de estrategias jerarquizadas. Las primeras consisten en evitar su generación, reducirlos desde su fuente, o reutilizarlos en otros procesos. En segundo lugar, están aquellos tratamientos físicos, químicos o biológicos que permiten la modificación de sus propiedades peligrosas, o bien, su destrucción térmica. Y finalmente, una vez que los residuos han sido sometidos al tratamiento adecuado, el eslabón final de la cadena es el confinamiento subterráneo, o excepcionalmente, su disposición final en el mar.

3.- Dentro de las estrategias de manejo de los residuos peligrosos, deben privilegiarse aquellas orientadas a la minimización en su generación, y a su reutilización o reciclaje. Ambas alternativas constituyen una fuente de ahorro de recursos.

4.- El proceso de fabricación del cemento llamado *Portland*, requiere de la obtención de un producto intermedio denominado *clinker*, resultante de la calcinación de la arcilla y la piedra caliza, a una temperatura media de 1,200 °C. Adicionalmente a la alta temperatura, los vapores y gases de la combustión experimentan una gran turbulencia dentro del horno, y tienen un elevado tiempo de residencia. Debido a dichas condiciones de operación, y a sus características de construcción, los hornos de clinker son instalaciones idóneas para la combustión de los residuos orgánicos. La afirmación anterior tiene dos razones de sustento:

1) La combustión es completa en un porcentaje del orden de 99.9 %, lo cual minimiza la emisión a la atmósfera de monóxido de carbono, y garantiza la destrucción total de los residuos utilizados como combustible alterno.

2) El horno no genera cenizas, ya que todo el material incombustible se integra a la estructura química del clinker.

5.- Es así que, la combustión de residuos orgánicos en hornos de clinker, constituye una alternativa para el correcto manejo de muchos de los residuos peligrosos. Esta, tiene dos funciones primordiales:

- 1) Ahorrar energía mediante la reducción en el consumo de combustibles derivados del petróleo.
- 2) Destruir térmicamente los residuos orgánicos que se utilicen como combustible alternativo.

Por lo anterior se puede afirmar que, el uso de combustibles alternos en hornos de clinker, desde el punto de vista económico, significa una estrategia de reciclaje y por ende, de ahorro de recursos; y desde el punto de vista del correcto manejo de los residuos, significa una estrategia de co-incineración que permite su destrucción térmica, con la consecuente reducción de su volumen.

6.- El uso de residuos orgánicos como combustibles alternos en hornos de clinker, tiene impacto en cuatro áreas del proceso:

- El control del horno y su operación.
- Las emisiones del gas de chimenea.
- La calidad del producto; es decir, el clinker.
- La generación y las características del polvo de cemento, subproducto del proceso.

7.- Dicho impacto en el proceso de fabricación del clinker, define las restricciones o especificaciones que deben cumplir los residuos que se utilicen como combustible alternativo. Entre éstas destacan por su importancia las siguientes:

- Calor de combustión: mayor a 5,000 kcal/kg.
- Contenido de cloro y halógenos: de 1 a 5%, dependiendo del horno.
- Contenido de azufre: de 1 a 4%.
- Contenido de metales: inferior a 1.5%.
- Contenido de bifenilos policlorados: inferior a 2 ppm.
- Contenido de nitrógeno: debe ser mínimo.

8.- La logística del uso de residuos orgánicos como combustible alternativo en hornos de clinker, incluye los siguientes pasos:

- Recolección de los residuos.
- Mezclado de los residuos para la formulación del combustible alternativo.
- Control de calidad y abastecimiento al horno.
- Combustión en el horno de clinker.

9.- Debido a las especificaciones que deben cumplir los combustibles alternos, para ser utilizados en hornos de clinker, los residuos idóneos para este efecto son los aceites minerales, y los disolventes orgánicos no clorados. Sin embargo, debido al enorme consumo de combustible que demandan los hornos de clinker, y a la variedad de características de los residuos, para poder garantizar un combustible alternativo adecuado, se requiere formularlo mezclando varios residuos. El proceso de formulación de combustibles alternos mediante el mezclado de residuos o *blending*, además de proveer al horno de un combustible óptimo en cuanto a sus especificaciones, amplía enormemente las posibilidades de destrucción térmica de muchos residuos que por sí solos, no podrían quemarse en un horno de clinker. Este es el caso de los materiales clorados, nitrogenados, o también de aquellos que no tienen un calor de combustión elevado.

10.- La combustión de residuos sólidos, puede ser una importante área de oportunidad para las compañías cementeras que piensan invertir en proyectos enfocados a utilizar combustibles alternos, debido a que son materiales menos socorridos que los residuos líquidos. Este es el caso principalmente de las llantas usadas, cuya abundancia es extraordinaria; y de otros desperdicios comunes tales como las estopas impregnadas de aceite, o las natas de pintura. Adicionalmente, estos residuos requieren de menos requisitos que los líquidos, en lo que se refiere a su transporte y almacenamiento.

11.- El control y el aseguramiento de la calidad de los combustibles alternos, es indispensable para la continuidad de un proyecto que considere su utilización en un horno de clinker. Esta consideración tiene los siguientes beneficios:

- 1) Protege al personal que labora en la instalación del horno que usa dichos combustibles.
- 2) Protege la instalación principal: el horno de clinker.
- 3) Evita emisiones tóxicas a la atmósfera.
- 4) Ayuda a garantizar la calidad del clinker producido por el horno.

12.- En la República Mexicana se generan aproximadamente de 14,500 a 20,000 toneladas diarias de residuos clasificados como peligrosos. En contraste con esta cifra, se carece de suficientes instalaciones para su adecuado manejo. Por ello, la destrucción térmica de muchos de estos residuos, como combustibles alternos en hornos de clinker, podría significar una alternativa estratégica de solución. Por su parte, la viabilidad de su aplicación está íntimamente relacionada con el hecho de que México es el décimo productor de cemento a nivel mundial, y que cuenta con 35 plantas cementeras distribuidas en prácticamente la totalidad del territorio nacional.

13.- La sustitución de combustóleo por combustibles alternos en hornos de clinker, es un proyecto rentable a largo plazo. Dicha rentabilidad es mayor en la medida en que el combustible alterno como insumo del horno, tiene un menor costo.

Por su parte, la disminución en el costo del combustible alterno es posible si existe alguna de las siguientes condiciones:

1) La compañía cementera participa en la inversión de la infraestructura de recolección de los residuos y formulación de los combustibles alternos, y por ende, también participa de los beneficios de estos negocios, adicionales al sólo ahorro de combustibles convencionales.

2) La legislación del país en el que se aplica la tecnología de los combustibles alternos, exige que ciertos residuos orgánicos sean destruidos térmicamente, y por ello, se genera una demanda de este servicio, que permite a las compañías cementeras exigir una retribución.

Por lo escrito en esta tesis, y por las conclusiones anteriormente expuestas, se hacen las siguientes recomendaciones:

1) A las empresas cementeras mexicanas, a que estudien la posibilidad de invertir en proyectos destinados al uso de residuos orgánicos, como combustible alterno en sus hornos de clinker.

2) A la *SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE RECURSOS NATURALES Y PESCA*, a promover la elaboración de una ley que obligue a la destrucción térmica de ciertos residuos orgánicos, y con ello se favorezca su uso como combustibles alternos en hornos de clinker.

3) A la *SECRETARIA DE HACIENDA Y CREDITO PUBLICO*, en coordinación con la *SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE RECURSOS NATURALES Y PESCA*, a incentivar fiscalmente los proyectos de inversión enfocados al correcto manejo de los residuos peligrosos, y específicamente, aquellos relacionados con la utilización de combustibles alternos en hornos de clinker.

BIBLIOGRAFIA

- Acuerdo que Reforma la Nomenclatura de las 58 Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental, 1994. México, D.F: Secretaría de Desarrollo Social. Diario Oficial de la Federación, 29 de noviembre de 1994.
- Balance Nacional de Energía 1993, 1994. México, D.F: Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Hidrocarburos.
- Compendio de Notas Ambientales Publicadas en el Extranjero, 1993. México, D.F, Ciudad Universitaria: Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología. Facultad de Química.
- CWM Basics on Selling Fuels. 1992. Chicago, Ill: Chemical Waste Management, Inc.
- Diagrama de un Horno Rotatorio. 1993. Cementos Apasco, S.A de C.V.
- El Uso de Residuos Industriales Peligrosos como Combustibles Alternos en el Proceso de Manufactura del Cemento. México, D.F: 1993. Chemical Waste Management de México, S.A de C.V.
- Environmental Market Conditions and Business Opportunities in Key Latin American Countries, 1992. U.S. Agency for International Development. Office of Energy & Infrastructure, Bureau for Latin America and the Caribbean.
- Especificación No. 503/93. 1994. México, D.F: Petróleos Mexicanos.
- Jelen, F. 1970. Cost and Optimization Engineering. E.E.U.U: McGraw-Hill.
- Generación de Residuales por Giro Industrial en el Valle de Toluca, Edo. de México. 1994. Toluca, Estado de México: Consorcio Químico de Toluca, S.A. de C.V.
- Gossman, D. 1989. Excerpt from the Review of New EPA Proposed Regulations on Organic Emissions from Cement Kiln Burning Hazardous Waste Fuels. Hampshire, Ill: Gossman Consulting, Inc.
- Gossman, D. 1991. Quality Control of Hazardous Waste Fuel. Indiana Waste Exchange. Vol. III, No. 5.
- Gossman, D. 1991. The Fate of Trace Metals in the Wet Process Cement Kiln. Hampshire, Ill: Gossman Consulting, Inc.
- Gynn, M. Mexico Fuels Report. 1992. Westchester, Ill: Cemtech, L.P, Chemical Waste Management de México, S.A de C.V.
- Heat of Combustion for Organic Compounds. 1993. Michigan, In: Cadence Resources, Inc.
- Himmelblau, D. 1989. Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química. Traducido por Eroles, A. (11a. ed.). México, D.F: Cía. Editorial Continental, México.
- Hougen O., Watson, K. y Ragatz, R. 1954. Chemical Process Principles. Vol. I. Material and Energy Balances. (2a. ed.). Nueva York: John Wiley and Sons, Inc.
- Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 1991-1992, 1992. México, D.F: Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología.

- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 1988. México, D.F: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación, 28 de enero de 1988.
- Market Research Summary: Ecología '93, Mexican Market. Solid Waste Handling Equipment. 1992. México, D.F: United States Trade Center.
- Memoria de Cálculo. Balance de Materiales del Horno Rotatorio de la planta de Ramos Arizpe, Coah. 1994. Cementos Apasco, S.A de C.V.
- Modificación al Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. 1987. México, D.F: H. Congreso de la Unión. Diario Oficial de la Federación, 10 de agosto de 1987.
- Morrison, R. y Boyd, R. 1990. Química Orgánica. Traducido por: Zugazagoitia, R., Fiedler, P., Rock, C. (5a. ed.). Wilmington, Delaware: Addison Wesley Iberoamericana.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL/93. 1994. México, D.F: Secretaría de Desarrollo Social. Diario Oficial de la Federación, 29 de noviembre de 1994.
- Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-94. 1994. México, D.F: Secretaría de Desarrollo Social. Diario Oficial de la Federación, 2 de diciembre de 1994.
- Norma Oficial Mexicana NOM-STPS-010-1994. 1994. México, D.F: Secretaría del Trabajo y Previsión Social. Diario Oficial de la Federación, 8 de julio de 1994.
- Ortiz, F., Cortinas, C., Maffey, L. 1987. Manejo de los Desechos Industriales en México. Colección Medio Ambiente. México, D. F: Fundación Universo Veintiuno, A.C.
- Perry, R. y Green, D. 1984. Perry's Chemical Engineers' Handbook. (6a. ed.). Tokio: McGraw-Hill.
- Plantas de Cemento en la República Mexicana. 1995. México, D.F: Cámara Nacional del Cemento.
- Presentación a SEDESOL de un Programa de Combustibles Suplementarios. 1993. México, D.F: Chemical Waste Management de México, S.A de C.V.
- Proceso de Fabricación del Cemento Portland (Monografía) 1993. Grupo Cementos Mexicanos.
- Producción Anual de Cemento Gris. 1995. México, D.F: Cámara Nacional del Cemento.
- Resource Conservation and Recovery Act. Regulations and Keyword Index. 1993. Lakewood, Colorado: McCoy and Associates, Inc.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos. 1988. México, D.F: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación, 25 de noviembre de 1988.
- Schmidheiny, S. y The Business Council for Sustainable Development. 1992. Changing Course. Cambridge, Mass: The MIT Press.
- The Safe Disposal of Hazardous Wastes. The Special Needs and Problems of Developing Countries. 1989. Washington, D.C: The World Bank, The World Health Organization, y The United Nations Environment Programme. Batstone, Smith and Wilson (editors).