

133  
24.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

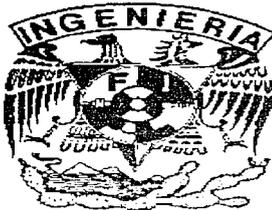
**“Demanda de energía en la Industria del Cemento en México y  
opciones de ahorro : sustitución de combustibles y uso de control  
difuso para el horno rotatorio de cemento”**

**T E S I S**

**Que para obtener el título de:  
Ingeniera Mecánico Electricista  
(Area Electrónica)**

**presenta:**

**Leticia Ozawa Meida**



**Directora de Tesis: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo**

**Codirector de Tesis : M.I. Ricardo Zavala Yoé**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**Ciudad Universitaria, D.F. junio 1997**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## **Dedicatorias**

Dedico esta tesis a aquellas personas que quiero mucho y que han estado conmigo y me han ayudado a crecer como persona, como estudiante y como mujer.

A mi padres, Dr. José Y. Ozawa Deguchi y Kazuko Meida de Ozawa, por su amor , su apoyo, sus consejos y sus cuidados que me han enseñado a luchar y a alcanzar metas.

A Keiko, Taeko y Jenny, también por su amor, pero sobre todo por su solidaridad y apoyo incondicional.

A José Luis, Benny y Ramón. por apoyarme cuando más los necesito.

A Aimi, Naoki y Aiko, por transmitirme su alegría, su ternura y su chispa.

A Ana, Ruth, Ale, Carmen y Octavio: por reír y llorar conmigo, por aconsejarme, por levantarme el ánimo, por compartir angustias y por todo lo que me han enseñado.

A Carlos, porque a pesar del silencio y la lejanía sé que cuento contigo.

A Miguel, por lo momentos que compartimos.

## **Agradecimientos**

A la Dra. Claudia Sheinbaum, porque siempre me has tendido la mano abiertamente, porque siempre que he necesitado apoyo y confianza me los has brindado, por la paciencia que me has tenido a lo largo de este trabajo, y por todo lo que me has enseñado y motivado tanto en lo escolar como en lo personal.

Al M.I. Ricardo Zavala, por todo el entusiasmo que pusiste en la realización de esta tesis y que me transmitiste a través de tus conocimientos, y por la solidaridad en todo momento.

Al M. en C. Luis Rodríguez Viqueira por apoyarme y motivarme en esta nueva área para mí que es la Energía.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por mi formación profesional.

Al Instituto de Ingeniería, porque me ha permitido participar en este proyecto de tesis que ha contribuido profundamente en mi desarrollo profesional.

A la Facultad de Ingeniería, y sobre todo a mis maestros por transmitirme sus conocimientos.

Al Ing. Francisco Rodríguez y al Dr. Victor Ruiz por los consejos, los comentarios y la orientación que me brindaron tan generosamente.

Al M. en I. Nicolás Kemper por el apoyo que me brindó.

A la Cámara Nacional del Cemento, y muy intensamente al Ing. Carlos Gutiérrez C. y al Ing. Jorge M. Villaseñor por todo el apoyo que me ofrecieron para la realización de la tesis.

Al Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, principalmente al Ing. David López, por sus correcciones y comentarios del primer capítulo, al Lic. Rogelio Molotla, por su orientación en la búsqueda de información y al Ing. Alan Grageda, por haberme permitido realizar una visita a la planta de Cementos de Oriente en Tepeaca, Puebla.

A Cementos Portland Moctezuma, S.A. de C.V. , al Ing. José Luis Cervantes, por haberme permitido visitar su planta más de una vez, al Ing. Mario Moreno por explicarme detalladamente la operación del horno y aclararme tantas dudas, y a los operadores de los hornos de cemento de la planta que también me enseñaron de manera práctica los principios de operación del horno.

Y a todos los que con su colaboración, paciencia, y amistad han hecho posible la realización de este trabajo.

# INDICE

	<b>Página</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Antecedentes del desarrollo de la Industria del Cemento en México</b>	<b>5</b>
a) Historia	5
b) Situación actual	7
<b>Capítulo 1. Características tecnológicas de la fabricación del cemento.</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Composición del cemento</b>	<b>11</b>
<b>1.2. Principales tipos de cemento</b>	<b>13</b>
<b>1.3. Procesos de fabricación</b>	<b>16</b>
1.3.1 Proceso seco	16
1.3.2 Proceso húmedo	19
<b>1.4. Características tecnológicas de cada etapa</b>	<b>20</b>
1.4.1. Etapa de calcinación	21
1.4.2. Molienda	27
1.4.3 Almacenamiento y Manejo	29
<b>Capítulo 2. Características de los cambios en la intensidad energética de la industria del cemento</b>	<b>31</b>
2.1 Actividad y estructura	33
2.2 Intensidad energética	35
2.4 Emisiones de Bióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	38
2.5 Comparación internacional	42
<b>Capítulo 3. Impacto ambiental del uso de la energía en la industria del cemento</b>	<b>47</b>
3.1 Características de los principales combustibles fósiles utilizados en la industria del cemento	49
3.2 Emisiones de Monóxido de Carbono (CO)	52
3.3 Emisiones de metano (CH <sub>4</sub> )	52
3.4 Emisiones de óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	53
3.5 Emisiones de óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> )	57
3.5 Emisión de partículas	60

<b>Capítulo 4. Perspectivas del uso eficiente de la energía en la Industria del Cemento</b>	<b>65</b>
<b>4.1 Ahorro de energía y reducción de emisiones debidas a la producción de cementos mezclados</b>	<b>65</b>
<b>4.2 Recuperación de energía al sustituir parcialmente los combustibles no renovables por materiales de desecho</b>	<b>68</b>
4.2.1 Legislación	72
4.2.2 Llantas	75
4.2.3 Aceites y lubricantes usados	78
 <b>SEGUNDA PARTE</b>	
<b>Descripción física del proceso a controlar</b>	<b>83</b>
<b>Antecedentes del control y modelado del horno</b>	<b>85</b>
 <b>Capítulo 5. Modelo del horno rotatorio de cemento</b>	<b>91</b>
<b>5.1 Obtención del modelo por identificación</b>	<b>91</b>
5.1.1 Conceptos teóricos	92
5.1.2 Modelo de identificación: método de predicción del error	97
5.1.3 Obtención del modelo	99
5.1.5 Conversión del modelo del horno de tiempo discreto a tiempo continuo	102
<b>5.2 Propiedades cualitativas del modelo obtenido</b>	<b>103</b>
5.2.1 Controlabilidad	104
5.2.2 Observabilidad	105
5.2.3 Estabilidad	107
5.2.4 Respuesta escalón	109
 <b>Capítulo 6. Controlador Lógico Difuso</b>	<b>113</b>
<b>6.1 Lógica Difusa</b>	<b>114</b>
6.1.1 Definiciones y propiedades	114
6.1.2 Operaciones con conjuntos difusos	117
6.1.3. Relaciones difusas	119
6.1.4. Variables lingüísticas	120
6.1.5 Reglas y representaciones difusas	120
<b>6.2 El controlador difuso</b>	<b>123</b>

6.2.1 Interfaz de difusado	124
6.2.3 La base de conocimientos	124
6.2.3 La lógica de decisiones	126
6.2.4 Interfase de desdifusado	127
6.3 Diseño del controlador del horno	128
6.4 Simulaciones y resultados	131
<b>Capítulo 7. Comparación del controlador lógico difuso con un controlador de realimentación de estados</b>	<b>135</b>
7.1 Fundamentos teóricos	135
7.2 Diseño del controlador de realimentación de estados	139
7.3 Simulaciones y resultados	140
<b>Conclusiones</b>	<b>143</b>
<b>Anexo 1. Cálculo de las emisiones de carbono del CO<sub>2</sub></b>	<b>149</b>
<b>Anexo 2. Datos de la industria cementera mexicana de 1982-1994</b>	<b>151</b>
<b>Anexo 3. Reporte de operación de la planta Cementos Portland Moctezuma</b>	<b>157</b>
<b>Anexo 4. Programas en Matlab</b>	<b>161</b>
<b>Anexo 5 Tablas de reglas</b>	<b>167</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>171</b>

# Introducción

La industria del cemento en México contribuye de manera fundamental en el desarrollo económico del país. Su participación en el Producto Interno Bruto (PIB) del sector industrial, alcanzó en 1993 el 1.61 %. En relación al consumo de energía, la industria cementera es una de las más intensivas lo cuál hace que sea el quinto lugar en el consumo de energía final del sector industrial. El análisis de las tendencias del consumo de energía en la industria de cemento mexicana es de gran utilidad ya que permite analizar los cambios en su eficiencia, contribución al consumo de energía nacional y reconocer las perspectivas y posibilidades de aumento en la eficiencia.

Los objetivos de esta tesis son :

1. Analizar las tendencias y posibilidades de ahorro de energía en la industria cementera mexicana.
2. Estudiar las características tecnológicas de un horno rotatorio de cemento, y determinar si con la automatización del horno, involucrando un controlador lógico difuso, se obtiene un ahorro de energía del 3% a través de la simulación en computadora.

Se ha dividido en dos partes principalmente, éstas son :

En la primera parte se analizan los cambios ocurridos en el consumo de energía y las emisiones de bióxido de carbono de esta rama industrial. Para ello, se desagrega el consumo de energía en tres tipos de cambios que influyen en la demanda energética de una industria: *actividad, estructura, e intensidad energética*. De acuerdo con este análisis se encuentra que la industria cementera mexicana ha sufrido un importante decremento en la intensidad energética producto de la desaparición, casi por completo, del proceso de producción por vía húmeda, del incremento en la producción del cemento puzolánico y de la apertura de nuevas industrias con alta tecnología. Por otra parte, la intensidad en las emisiones de bióxido de carbono no disminuye a la misma tasa que la intensidad energética debido al incremento en el uso del combustóleo sobre el gas natural. Al final de esta parte se hace una evaluación del potencial técnico de ahorro de energía al utilizar materiales de desecho, llantas y aceites usados, como sustitutos parciales de los combustibles fósiles. Se encontró que si todas las llantas de desecho generadas en el país y todos los residuos de lubricantes y aceites usados pudieran aprovecharse como combustible alterno en el horno de cemento , se recuperarían cerca de 16,693 TJ (3.98 Pcal) de energía lo que corresponde a una reducción del consumo de combustibles fósiles en un 15%.

En la segunda parte se evalúa el desempeño de un controlador lógico difuso para un horno rotatorio de la planta de Cementos Portland Moctezuma mediante simulaciones en computadora. Las técnicas clásicas de diseño de sistemas de control se basan en el establecimiento de un modelo matemático que defina el comportamiento dinámico del horno, sin embargo, como el proceso que se lleva a cabo en el horno es no lineal, variable en el tiempo y tiene muchas variables acopladas, su descripción es muy complicada. En este tipo de procesos tan complejos, el operador puede controlar eficientemente el horno debido a la manera en que se presenta la información y en la que toma las decisiones. Esta

característica de la lógica del razonamiento humano de poder manejar datos cualitativos a través de la pertenencia a conjuntos definidos de manera difusa, y poder sintetizar la información fue estudiada por Lofti Zadeh, quien propone una nueva técnica conocida como lógica difusa para trabajar con sistemas muy complicados sin requerir de un análisis cuantitativo exacto. Una de las primeras aplicaciones de la lógica difusa se llevó a cabo en un horno de cemento, en la cual se comprobó que formular estrategias de control basadas en la experiencia práctica de los operadores a través de la lógica difusa es muy sencillo y eficiente,<sup>2</sup> por esta razón se decidió utilizar un controlador difuso. Para analizar el desempeño y realizar las simulaciones, se construyó un modelo matemático en variables de estado que representa de manera aproximada el comportamiento dinámico del horno. Este modelo es lineal e invariante en el tiempo, y se obtuvo experimentalmente a través de el método del predicción del error. En cuanto al controlador difuso, su diseño se basó en la experiencia y los conocimientos de los operadores y del Ingeniero de Producción de la planta. Es importante mencionar que el controlador difuso propuesto sólo es adecuado si el horno opera cerca de sus puntos de operación. Bajo esta condición se encontró que al utilizar este controlador, el horno opera de manera más estable y ahorra un 2.2% de combustible.

Esta tesis consta de seis capítulos y a continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de ellos.

En los antecedentes de la primera parte, se narra la historia de la industria del cemento en México desde sus inicios en 1906 hasta la fecha, y cómo durante estos años ha demostrado ser una industria competitiva tanto en el mercado interno como en el externo. Actualmente, la industria cementera mexicana está formada básicamente por 5 grupos industriales y cuenta con 32 plantas dentro del país, que la hacen ser uno de los 15 principales productores de cemento del mundo.

Para proponer medidas de ahorro de energía es necesario conocer los conceptos básicos de la composición del cemento y sus procesos de fabricación, analizar las etapas y el equipo utilizado en cada etapa. Esto se describe en el capítulo uno.

En el capítulo dos, se estudian los cambios del consumo de energía entre 1982 y 1994 mediante el análisis de los cambios en la *actividad, estructura e intensidad energética* de esta rama industrial. Se encontró que la intensidad energética disminuyó un 28% debido a la reducción en el empleo del proceso vía húmeda en la fabricación de cemento, el incremento de la producción de cementos puzolánicos y a la instalación de nuevas plantas con alta tecnología. Por otra parte se encontró que las emisiones de bióxido de carbono se comportan de manera similar a la intensidad energética y son muy sensibles a la sustitución de combustibles. Al final del capítulo se presenta una comparación de las intensidades energéticas y las emisiones de bióxido de carbono con otros países.

En el capítulo tres, se analiza el impacto ambiental de la fabricación del cemento. Además de las emisiones de bióxido de carbono, se generan otras emisiones como son los

---

<sup>1</sup> Zadeh, Lofti, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", en *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-3, no. 1, enero, 1973, pp. 28-44.

<sup>2</sup> Ostergaard, J.J., "Control of a cement kiln by Fuzzy Logic", en *FLS-review*, no. 67, 1982, pp. 3-11.

óxidos de nitrógeno, el metano, el monóxido de carbono y los hidrocarburos que contribuyen al efecto invernadero; los óxidos de azufre, que producen la lluvia ácida ; y las partículas que dentro de la fracción respirable son muy dañinas al ser humano. Además se mencionan medidas que disminuyen estas emisiones así como la legislación mexicana que existe al respecto.

En el capítulo cuatro, se muestran dos estrategias importantes para reducir el consumo de combustibles fósiles: la sustitución parcial del clinker por materiales con propiedades cementantes, en el caso de México por puzolanas ; y la sustitución parcial de combustibles por materiales de desecho para recuperar energía, llantas y aceites usados. La primera estrategia muestra que al aumentar la participación de cementos puzolánicos en la producción nacional, se reduce la intensidad energética. Por otra parte, se describen las características del proceso de fabricación del cemento que permiten quemar materiales de desecho como combustible alternativo en el horno, se habla acerca de los términos de referencia del protocolo de pruebas por parte de las autoridades ecológicas para la quema de estos desechos, y el potencial técnico de reducción del consumo de combustibles fósiles si se utilizaran todas las llantas de desecho y los residuos que pueden ser aprovechados como combustible alternativo generados en el país.

En la segunda parte de esta tesis, se describen las diferentes etapas que se siguieron para simular el control del horno en la computadora.

En los antecedentes de esta segunda parte se narra brevemente la evolución del control del horno así como trabajos que se han realizado en torno al modelado y al control del horno. Es importante mencionar que la primera aplicación exitosa de la lógica difusa para el control de procesos se llevó a cabo en un horno de cemento.

En el capítulo cinco, se obtuvo, a partir de datos experimentales, un modelo matemático aproximado que describe el comportamiento de ciertas variables del horno que se consideraron importantes. El método utilizado se conoce como identificación de sistemas y consiste en asignar valores numéricos a un modelo matemático de tal forma que se minimice la diferencia entre los valores medidos y los valores estimados del modelo. De esta forma, se obtuvo un modelo lineal e invariante en el tiempo muy simplificado que sirvió para determinar el desempeño del sistema de control propuesto. Posteriormente se analizaron las propiedades cualitativas del modelo obtenido como son : la controlabilidad, la observabilidad y la estabilidad.

En el capítulo seis, se describe el controlador difuso propuesto basado en la experiencia de los operadores del horno estudiado. Y se integró el modelo obtenido en el capítulo cinco para realizar las simulaciones en computadora. El controlador difuso propuesto permite mantener estables las condiciones de combustión en el horno, y con ello disminuir el consumo de combustibles en un 2.2%.

En el capítulo siete y último, se realiza una comparación entre diferentes esquemas de control del horno: el control manual a través del operador, el controlador lógico difuso y la realimentación de estados.

# Antecedentes del desarrollo de la industria del cemento en México

## a) Historia

La Industria del Cemento en México surgió a principios de este siglo con inversión exclusivamente extranjera. La fundación de la primera planta se realizó en el estado de Hidalgo en 1906, por Cementos Hidalgo, S.A. En 1910 se construyen los hornos de la cementera Cruz Azul y en 1911 los de la cementera Tolteca. Para ese año la producción cementera alcanzó 75000 toneladas.<sup>3</sup>

Durante la época revolucionaria el consumo de cemento descendió a niveles muy bajos, y no es hasta 1922 cuando la demanda se recupera. En ese año, las tres fábricas operaban con 9 hornos rotatorios y una capacidad instalada de 177 mil toneladas anuales. Hacia mediados de los años veinte surge la industria cementera dirigida por empresarios mexicanos con las plantas de Cementos Portland Monterrey, S.A. en Monterrey, Cementos Landa (ahora Cementos Atoyac) en Puebla, y Cementos Apaxco, en el Estado de México.

La crisis económica ocurrida a principios de la década de los treinta ocasiona una nueva disminución en el consumo del cemento. En 1932, la producción fue tan sólo de 137 mil toneladas, el equivalente a una tercera parte de su capacidad instalada. En años posteriores, la estabilidad política y social del país favoreció el crecimiento de la oferta cementera, por lo que se construyeron nuevas fábricas en diversos lugares del país. Para 1973, la industria cementera nacional contaba con 73 hornos y 26 plantas. A finales de la década de los setenta, durante el "boom petrolero", el crecimiento económico promueve el aumento en las actividades de la construcción y por consiguiente del cemento.

Entre 1973 y 1985, la industria del cemento aumentó su capacidad instalada en un 31.7 %<sup>4</sup> alcanzando las 33 millones de toneladas anuales. Es importante hacer notar que este desarrollo fue promovido por una política gubernamental que otorgaba precios preferenciales de los hidrocarburos y la electricidad para esta rama industrial. Entre 1968 y 1985, la industria cementera tuvo un crecimiento promedio anual del 8%.<sup>5</sup> Sin embargo, durante el periodo de 1982 a 1988 la demanda interna del cemento se ve fuertemente afectada por la crisis de la economía mexicana. Las expectativas de crecimiento fueron muy distintas de las planeadas. La industria de la construcción y la del cemento se vieron fuertemente afectadas. A esto último se añadió el aumento en los precios de los energéticos, producto de la desregulación económica. El exceso de la capacidad instalada con respecto a la producción rompió el equilibrio entre la oferta y la demanda de los años anteriores, al presentarse una contracción en el mercado interno la industria cementera mexicana buscó nuevos mercados y las exportaciones del cemento comenzaron una etapa de expansión. De 1983 a 1989 las ventas al exterior avanzaron notablemente alcanzando un crecimiento anual promedio del 42.6% de la producción.<sup>6</sup> Los principales mercados externos de México resultaron ser los estados del sur de los Estados Unidos (California, Texas, Florida, y parte del Mississippi), Centroamérica y el Caribe. A principios de los noventa, las ventas mexicanas de cemento en el extranjero disminuyeron debido a que en 1990 el gobierno estadounidense acusó a la industria cementera mexicana de exportar a precios de *dumping*,

---

<sup>3</sup> Salomón, Alfredo. "Industria del cemento: pruebas del tiempo" en *Comercio Exterior*, México, D.F., noviembre, 1995, pp. 832-836.

<sup>4</sup> *Ibid*

<sup>5</sup> *Ibid*

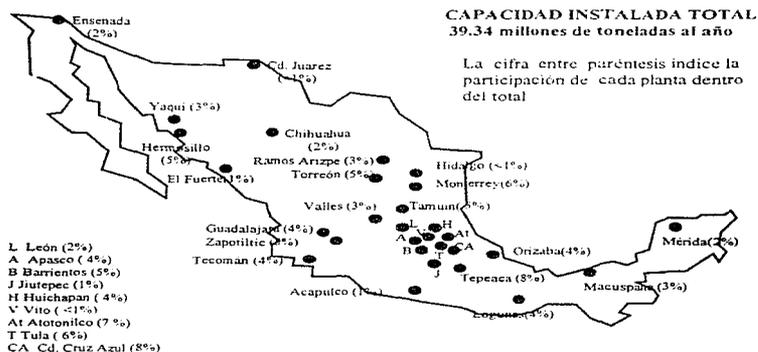
<sup>6</sup> *Ibid*

por lo que se le castiga con un impuesto compensatorio de 47.2% para el cemento Portland gris, y de 53.3% para el cemento clinker.<sup>7</sup>

La ligera recuperación de la economía mexicana a principios de esta década, da un alivio a la industria cementera, a tal grado que la producción aumenta 7.4% en 1992 con respecto a 1991 y 8.3% en 1994 con respecto a 1993. La modernización tecnológica, sin embargo hace reducir el personal ocupado por esta industria en cerca del 20%.<sup>8</sup>

Para la distribución y comercialización del cemento en México, las plantas cementeras están situadas estratégicamente para satisfacer tanto la demanda interna como la externa. Se tiene una fuerte concentración de plantas en el centro del país cerca de la ciudad de México, su principal consumidor, y un gran número de plantas se sitúan cerca de la frontera con Estados Unidos o cerca de puertos con facilidades de transporte marítimo que abastecen los mercados externos, como se aprecia en la Figura 1. La transportación de las exportaciones del cemento mexicano se realizan en los puertos del Golfo de México (70%), en la costa del Pacífico (20%) y por vía terrestre (10%).<sup>9</sup>

**Figura 1 Ubicación de las plantas cementeras en México (1994)**



Fuente: SEMIP, 1992.  
1994 Rock Products North American Cement Directory

Como se observa en la Gráfica 1, en los últimos diez años la capacidad instalada de la industria cementera se ha incrementado notablemente, se han construido plantas con la más avanzada tecnología

<sup>7</sup> Salomón, 1995. *op. cit.*

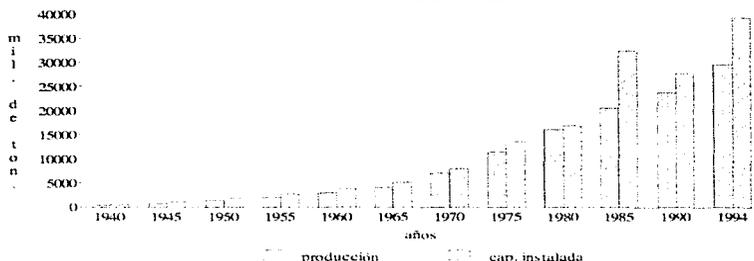
<sup>8</sup> Salomón, 1995. *op. cit.*

<sup>9</sup> Zambrano, Lorenzo. "Panorama de la Industria Cementera Mexicana", en *Revista IMCYC*, México, enero, 1988, vol. 25, no. 200, pp. 19-26.

en todo el proceso de producción, y se han ampliado las ya existentes como respuesta a la creciente demanda.

Gráfica 1

Producción y Capacidad instalada  
de la Industria Cementera en México



Fuentes: Sterner, Thomas. *El uso de la energía en la industria mexicana*. Colegio de México, México, 1987, pp. 104, Canacem, *Anuario 1987*, Anuario, México, 1987  
Salinas, Carlos. *Sexto Informe de gobierno 1994*, México, 1994.

## b) Situación actual

La industria del cemento en México cuenta con treinta y dos plantas de cemento controladas por 5 grupos industriales principalmente. Estos grupos industriales son: Cemex, con una participación en el mercado de 60.9%, cuenta con 18 plantas y una capacidad instalada total de 24.95 millones de toneladas clínker anuales; Apasco, participa con un 19.3 %, cuenta con 6 plantas y una capacidad total de 7.91 millones de toneladas clínker anuales; la Cooperativa Cruz Azul, 12.7 % de participación en el mercado, 2 plantas y 5.22 millones de toneladas clínker anuales de capacidad total; Cementos de Chihuahua, participa con un 4.5 %, 3 plantas y una capacidad total de 1.83 millones de toneladas clínker anuales; y los grupos independientes (Cementos Portland Moctezuma y Cemento Portland Blanco de México) participan con sólo 1.6 % y 750 mil toneladas clínker de capacidad instalada total.<sup>10</sup>

El grupo Cementos Mexicanos se formó al fusionarse Cementos Hidalgo y Cementos Monterrey en 1931. A lo largo de este periodo, Cemex ha ido creciendo construyendo nuevas plantas, y adquiriendo industrias cementeras antes independientes. Debido a las cuotas compensatorias impuestas por el gobierno estadounidense y al estancamiento de las exportaciones, se han incrementado las inversiones de los grupos cementeros mexicanos en el extranjero. Cemex últimamente ha adquirido plantas en España (10), Venezuela(4), Panamá(1), el Caribe(1) e inclusive en los Estados Unidos(1). Y es actualmente la empresa cementera más grande de América y la cuarta compañía en el mundo.<sup>11</sup>

En 1994, el grupo Cementos Chihuahua sigue los pasos de Cemex, adquiriendo una planta en Nuevo México.

El grupo Apasco, que tiene participación de capital extranjero, cuenta con plantas muy eficientes. En 1993 se instalaron equipos para proteger el medio ambiente en las plantas de Macuspana

<sup>10</sup> Ullman, Fred. "The Mexican Situation", en *Rock Products*, E.U.A., abril, 1990, pp. 36-40.

<sup>11</sup> Cemex, *Informe Anual*, Anuario, México, 1994, pp. 1-12, 34-38.

En 1994, el grupo Cementos Chihuahua sigue los pasos de Cemex, adquiriendo una planta en Nuevo México.

El grupo Apasco, que tiene participación de capital extranjero, cuenta con plantas muy eficientes. En 1993 se instalaron equipos para proteger el medio ambiente en las plantas de Macuspana y Ramos Arizpe, y en las plantas de Apaxco y de Tecoman, se instaló equipo especial que utiliza combustible alterno.<sup>12</sup>

A continuación se enlistan las plantas con su respectiva localización, edad y grupo al que pertenecen :

**Tabla 1 Plantas cementeras en la República Mexicana**

Planta	Grupo	Localización	Edad[años]
Cementos Portland de México, S.A.	Independiente	Hidalgo	min. 27
Cementos Apasco, S.A. de C.V.	Apasco	Apaxco, Edo. De México	59
Cemento Veracruz, S.A. de C.V.	Apasco	Orizaba, Veracruz	50
Cementos de Acapulco, S.A.	Apasco	Acapulco, Guerrero	min. 27
Cementos Apasco, S.A. de C.V.	Apasco	Macuspana, Tabasco	13
Cementos Apasco, S.A. de C.V.	Apasco	Ramos Arizpe, Coahuila	4
Cementos Apasco, S.A. de C.V.	Apasco	Tecoman	2
Cemento Chihuahua, S.A. de C.V.	gcc	Chihuahua	min. 27
Cemento Chihuahua, S.A. de C.V.	gcc	Cd. Juárez, Chihuahua	
Cementos Anáhuac, S.A.	Cemex	Barrientos, Edo. De México	min. 27
Cementos Anáhuac, S.A.	Cemex	Tamuín, S.L.P.	min. 27
Cementos Guadalajara, S.A.	Cemex	Guadalajara, Jalisco	min. 27
Cementos Guadalajara, S.A.	Cemex	Ensenada, B.C.N.	min. 27
Cementos Maya, S.A.	Cemex	León, Guanajuato	min. 27
Cementos Maya, S.A.	Cemex	Mérida, Yucatán	min. 27
Cementos Mexicanos, S.A.	Cemex	Monterrey, N.L.	75
Cementos Mexicanos, S.A.	Cemex	Torreón	28
Cementos Mexicanos, S.A.	Cemex	Valles., S.L.P.	28
Cementos Mexicanos, S.A.	Cemex	Huichapan, Hidalgo	9
Cementos Yaqui, S.A.	Cemex	Hermosillo, Sonora	5
Cemento del Norte, S.A.	Cemex	Monterrey, N.L.	min. 27
Cementos Tolteca, S.A. de C.V.	Cemex	Tula, Hgo.	84
Cementos Tolteca, S.A. de C.V.	Cemex	Atotonilco de Tula, Hgo.	min. 27
Cementos Tolteca, S.A. de C.V.	Cemex	Zapotiltic, Jalisco	min. 27
Cementos Oriente	Cemex	Tepeaca, Puebla	1
Cementos Portland Nacional, S.A.	Cemex	Hermosillo, Sonora	min. 27
Cementos del Pacífico, S.A. de C.V.	Cemex	Mármol, Sinaloa	-
Cementos Sinaloa, S.A. de C.V.	Cemex	Hornillos, El Fuerte, Sinaloa	min. 27
Cementos Portland Moctezuma, S.A.	Independiente	Cuernavaca, Morelos	min. 27
Cementos Cruz Azul, S.C.L.	Cruz Azul	Jasso, Hidalgo	96 (65 como S.C.L.)
Cementos Cruz Azul, S.C.L.	Cruz Azul	Lagunas, Oaxaca	53

Fuente: CANACEM, *Anuario 1987*

<sup>12</sup> Apasco, *Informes anuales*, Anuario, México, 1989 - 1994.

Durante la expansión y modernización de la industria cementera mexicana , ésta se ha preocupado por invertir en equipos para la preservación ecológica y control de la contaminación ambiental, y en equipos de alta tecnología en los hornos y circuitos de molienda, con el fin de lograr una mayor eficiencia y optimización en los equipos de producción.

Con 90 años de experiencia, la industria mexicana del cemento ha demostrado ser altamente competitiva tanto en el mercado interno como en el externo.

## Capítulo 1.

### Características tecnológicas de la fabricación del cemento.

Para evaluar el consumo de energía de la Industria del cemento es necesario conocer el proceso de fabricación del cemento y poder determinar en que etapa del proceso existe un mayor potencial de ahorro de combustibles y electricidad.

En esta capítulo se presentan los conceptos básicos acerca del cemento : los principales compuestos y las características que le dan al cemento ; los principales tipos de cemento que se producen en México y sus usos ; los procesos de fabricación del cemento y cada una de sus etapas (trituración, molienda de materia prima, homogenización, calcinación, enfriamiento, molienda final). Se describe el equipo comúnmente utilizado en cada etapa y sus diferencias en cuanto a eficiencia térmica, flexibilidad, impacto ambiental, etc.

#### 1.1 Composición del cemento

El cemento se obtiene al calcinar materiales calcáreos y arcillosos, de una composición determinada, a temperaturas de 1400 a 1500 °C en los hornos de calcinación.

Los principales compuestos que constituyen alrededor del 90 por ciento del peso del cemento son los silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio; y son los responsables del desarrollo de las propiedades del cemento. El 10 por ciento restante está constituido por: yeso que se agrega al clinker (aglomerado de forma irregular que se obtiene al calcinar la materia prima en el horno) durante la molienda final, y algunos elementos que no se alcanzan a combinar en los hornos como son la cal libre e impurezas como el óxido de magnesio, y los óxido de sodio y de potasio.

A continuación se presenta una tabla con los principales compuestos del cemento y sus principales características:

**Tabla 1. 1 Principales compuestos del cemento y sus características**

Compuesto	Fórmula química	Nomenclatura común	Características
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	Responsable de las resistencias a edades tempranas, es decir, hasta los 28 días aproximadamente
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	Responsable de las resistencias a edades tardías, es decir, de 28 días en adelante

Tabla 1.1 Continuación

Compuesto	Fórmula química	Nomenclatura común	Características
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	Genera mucho calor en una cantidad igual de los otros componentes. Es responsable de la variación de volumen, formación de grietas, y es el más vulnerable al ataque a los sulfatos.
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	Poca influencia en la resistencia.

Fuente: Aguilar, Ausencio. *Cemento Portland: fabricación, propiedades y empleo*, México, p.18-22

Otros compuestos del cemento son:

Tabla 1.2 Otros compuestos del cemento

Material	Fórmula	Contenido	Características química
Yeso (sulfato de calcio)	$\text{CaSO}_4$	2-5%	Regula la acción química del cemento con el agua, y controla el tiempo de fraguado. Su carencia o exceso provoca cambios volumétricos (dilataciones o contracciones)
Cal libre	$\text{CaO}$	Max. 2 %	Queda por cocción insuficiente del clinker. Su exceso provoca fuertes expansiones.
Oxido de magnesio	$\text{MgO}$	Max. 5 %	Se encuentra dentro de las calizas en forma de carbonato de magnesio. Su exceso provoca una expansión a edades tardías.
Alcalis (Óxido de sodio y de potasio)	$\text{Na}_2\text{O}$ y $\text{K}_2\text{O}$	Max. 0.6%	Las condiciones para que la reacción álcali-agregado se presente son: que exista suficiente álcali en el concreto, la presencia de elementos reactivos en el agregado y condiciones ambientales adecuadas (ciclos repetidos de humectación y secado). Los álcalis del cemento son derivados de la materia prima y de la ceniza de hulla. Los agregados reactivos más comunes son: la cuarcita, la hornofelsa, el esquito, el granito, la andesita, la arenisca y la arena sedimentada. Provoca la expansión y agrietamiento del concreto. Estos defectos pueden evitarse empleando cementos con bajos álcalis o bien adicionando puzolanas.
Pérdidas por calcinación (p.c.)		Max. 3 %	Es el por ciento de pérdida de peso que sufre el cemento después de someterlo a un calentamiento de 1000°C. Las sustancias que se pierden a esta temperatura son agua y bióxido de carbono. Es una medida de la edad del cemento.

Tabla 1.2 Continuación

Material	Fórmula	Contenido	Características química
Residuo insoluble		Max. 0.75%	Proviene del yeso que se añade al clinker en su molienda. La materia prima llega a ser soluble en ácidos, después de combinarse con la cal en el horno de calcinación. Por lo que este es un indicador del grado de perfección de las reacciones que se han llevado a cabo en el horno de calcinación.
Puzolanas			Materiales silico aluminosos que en presencia de humedad reaccionan químicamente con la cal que se libera durante la hidratación del cemento para formar compuestos con propiedades cementantes. Estos provienen de materiales naturales (cenizas volcánicas, pómez, tierra de diatomeas, etc.), de materiales industriales (cenizas volantes, escoria de altos hornos, etc.) o de materiales activados por calcinación. Mejoran la resistencia química, producen efectos benéficos en el concreto: mejoran su trabajabilidad, reducen la generación de calor y contracción térmica, aumentan la impermeabilidad, mejoran la resistencia al ataque de los sulfatos, reducen la reacción álcali-agregado.

Fuente :Aguilar, Ausencio, *Cemento Portland : fabricación, propiedades y empleo*, México, p. 18-22.

## 1.2. Principales tipos de cemento

En México se fabrican los siguientes tipos de cemento:

- Portland: tipos I,II,III,IV y V, C
- Portland-Puzolana
- Portland-Escoria de Alto Horno
- De albañilería

Todos estos cementos tienen características especiales adecuadas para satisfacer las necesidades peculiares de las distintas clases de construcción.

Tabla 1.3 Principales tipos de cementos, características y usos

Tipos de cemento	Subtipo	Composición	Características	Usos
Cemento Portland	Tipo I (Común)	C <sub>3</sub> S(49%) C <sub>2</sub> S(25%) C <sub>3</sub> A(12%) C <sub>4</sub> AF(8%) CaSO <sub>4</sub> (2.9%) MgO(2.4%) CaO(0.8%) p.c.(1.2%)	Uso común. Altas resistencias mecánicas, alta generación de calor durante su hidratación. No apto para concreto en masa.	Se emplea en construcciones de pavimentos y banquetas, edificios de concreto reforzado, puentes, tanques, productos prefabricados, trabajos de mampostería, y para todos los usos del cemento.
	Tipo II (Modificado)	C <sub>3</sub> S(46%) C <sub>2</sub> S(29%) C <sub>3</sub> A(6%) C <sub>4</sub> AF(12%) CaSO <sub>4</sub> (2.8%) MgO(3%) CaO(0.6%) p.c.(1%)	Cuando se requiera moderada resistencia al ataque de los sulfatos o moderada producción de calor, durante el fraguado, por lo que presenta cambios de volumen menos abruptos durante la hidratación	Es adecuado en aplicaciones que requieran precaución contra el ataque moderado de sulfatos, como en algunas estructuras para drenaje.
	Tipo III (Resistencia rápida)	C <sub>3</sub> S(56%) C <sub>2</sub> S(15%) C <sub>3</sub> A(12%) C <sub>4</sub> AF(8%) CaSO <sub>4</sub> (3.9%) MgO(2.6%) CaO(1.3%) p.c.(1.9%)	Es el que desarrolla mayor resistencia en un tiempo muy corto, genera mucho calor al hidratarse, ya velocidad mayor que el tipo I. No resiste el ataque a los sulfatos. Elevada finura.	Se emplea cuando se requiere descimbrar pronto, para poner rápidamente el concreto en servicio. No es apto para concreto en masa, sino para estructuras en donde pueda disiparse rápidamente el calor.
	Tipo IV (Bajo calor)	C <sub>3</sub> S(28%) C <sub>2</sub> S(49%) C <sub>3</sub> A(5%) C <sub>4</sub> AF(18%) CaSO <sub>4</sub> (3%) MgO(2.7%) CaO(3.9%) p.c.(1%)	De bajo calor. Baja producción de calor durante el fraguado, y a menor velocidad. Buena resistencia a los sulfatos. El desarrollo de resistencia mecánica es lento a edades tempranas, pero de igual resistencia a la de los demás cementos a edades tardías (6-12 meses).	Es especial para usarse en grandes masas de concreto como en presas de gravedad en donde la elevación de temperatura resultante del calor generado durante el endurecimiento es un factor crítico.

Tabla 1.3 Continuación

Tipos de cemento	Subtipo	Composición	Características	Usos
Cemento Portland	Tipo V (Alta resistencia a los sulfatos)	C <sub>3</sub> S(28%) C <sub>2</sub> S(43%) C <sub>3</sub> A(4%) C <sub>4</sub> AF(9%) CaSO <sub>4</sub> (2.7%) MgO(1.9%) CaO(0.3%) p.c.(0.9%) *	Uso específico cuando se requiere una alta resistencia al ataque de los sulfatos. Generación de calor baja.	En el revestimiento de canales, alcantarillas, túneles, sifones y en general todo tipo de estructuras que estén en contacto con suelos y aguas subterráneas que contengan sulfatos en concentraciones tales que pudieran causar deterioro del concreto.
	Blanco (Tipo I sin C <sub>4</sub> AF)	C <sub>3</sub> S(50%) C <sub>2</sub> S(20%) C <sub>3</sub> A(17%) C <sub>4</sub> AF(0%) CaSO <sub>4</sub> (2.7%) MgO(1.9%) CaO(0.4%) p.c.(1%)	A igual finura que el cemento Portland tipo I, desarrolla resistencias más altas a edades tempranas. Los molinos de crudo y acabado utilizan forros y bolas de cuarzo, y no de acero, para no contaminar el cemento con rebabas de hierro.	Usos decorativos o arquitectónicos, terrazas, mosaicos, estucos, esculturas, etc.
Cemento Portland-puzolana		Clinker Portland y Puzolanas (15-30% de la mezcla total)	Según la Norma NMXC-2: Tipo I - construcción en general Tipo II - concretos donde se requiere alta resistencia a edades tempranas	Se emplea principalmente en concretos para obras hidráulicas y marítimas.
Cemento Portland-Escoria de Alto Horno		Clinker Portland, yeso, escoria granulada de Alto Horno (20-70% de la mezcla total)	La escoria granulada tiene propiedades de tipo puzolánico, y se puede considerar como un cemento hidráulico, latente, para cuya hidratación se requiere la presencia de cal hidratada y yeso.	Es especialmente útil en concretos para obras hidráulicas o marítimas, pudiéndose emplear además en cualquier tipo de estructura.
Cemento aluminoso		Porcentajes típicos de óxidos: CaO (35-39%) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (37-41%) SiO <sub>2</sub> (3.5-5.5%) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (9-12%) FeO (4-6%) TiO <sub>2</sub> (1.5-2.5%) MgO (0.5-1%) Residuo indisoluble (1%)	Su fraguado es mayor al del cemento Portland, endurece muy rápidamente, y adquiere una resistencia total en aproximadamente un día.	Para unir piezas de refractario en hornos industriales.

## Capítulo 1

Tabla 1.3 Continuación

Tipos de cemento	Composición	Características	Usos
Cemento de albañilería	Cemento Portland (70 %) cal hidratada (30%)	Mayor plasticidad, cohesividad, mayor resistencia, menores cambios volumétricos, y mayor poder de retención de agua	Mezclado con arena fina y agua se produce un mortero plástico y cohesivo para pegar unidades de mampostería como tabiques de arcilla o concreto, bloques de concreto y piedras artificiales o naturales. Se utiliza para todo tipo de aplanados y para firmes de concreto.

\* Nota: De acuerdo a las especificaciones ASTM C150

Fuente: Pemex, *Consumo de energía en la Industria del Cemento. Perfiles energéticos industriales no. 1.*, octubre, 1984, p. 63-89  
Aguilar, Ausencio. "Cemento Portland: fabricación, propiedades y empleo" p.18-22  
Neville, Adam y P.I. Warnwright "High Alumina Cement Concrete" p. 9-10.

### 1.3. Procesos de fabricación

Existen dos procesos industriales para la fabricación del cemento Portland: seco y húmedo.

Como se mencionó anteriormente, las principales materias primas del cemento son la piedra caliza y la arcilla.

En ambos métodos el proceso comienza con la explotación de los bancos de materias primas y su acarreo. La extracción de las materias primas se hace en forma de escalones o bancos descendentes. Primero se hacen barrenos, y dentro de ellos se introducen los explosivos; éstos al explotar generan gases de gran energía que presionan, fraccionan y disgregan los bloques de cantera en distintos tamaños. Los bloques de materia prima son transportados a las plantas de cemento por medio de grandes camiones.

#### 1.3.1 Proceso seco

En México se utiliza casi en su totalidad el proceso seco, ya que es el más económico y consta de las siguientes etapas:

**Trituración:** Las materias primas que llegan, se trituran generalmente en dos etapas. La primera etapa se efectúa en quebradores grandes de tipo quijada o rotatoria, que reducen las grandes piezas de cantera a piedras de aproximadamente 15 cm. La trituración secundaria, se efectúa generalmente en quebradores de cono rotatorio o de martillo reduciendo el tamaño a unos 13 mm.

**Secado:** En algunas plantas de cemento, se requiere eliminar el contenido de humedad de la materia prima. Por lo que una vez triturados, y antes de entrar a los molinos los materiales se introducen en secadores.

**Molienda:** Una vez quebrados y secos la caliza, la arcilla y el óxido de hierro se dosifican adecuadamente con básculas automáticas. Las dosis de materiales varían según el tipo de cemento que se produce. Los molinos utilizados pueden ser de bolas o de rodillos. Para aumentar la eficiencia en la molienda suele recurrirse a la clasificación por tamaño de material que sale del molino, en un separador de aire con circuito cerrado, con el fin de asegurar la finura requerida.

Es práctica común efectuar dentro de los molinos un secado final de las materias primas, generalmente se utiliza un secador rotatorio en los molinos de bolas o en el de vástago. En las plantas modernas de vía seca, los molinos de rodillos están reemplazando los de bola, ya que en ellos el material es secado durante la pulverización, usando los gases provenientes de los hornos.

**Homogenización:** La harina cruda sale de los molinos, se envía a silos donde se homogeniza y se mezclan entre sí para obtener una mezcla uniforme. Con una homogenización óptima de las materias primas, se puede obtener clinker a una temperatura del horno más baja. De los silos de material crudo el material entra a los hornos de calcinación.

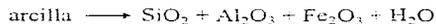
**Calcinación:** Es la operación más importante en la fabricación del cemento, durante esta etapa se realizan reacciones químicas que forman compuestos constituyentes del cemento. Existen dos tipos de hornos: el horno vertical y el horno rotatorio.

El horno rotatorio presenta una ligera inclinación en relación con la horizontal. El material crudo se introduce en la parte superior del horno, y a medida que va descendiendo se encuentra con temperaturas más elevadas, hasta llegar al extremo inferior donde se encuentra el quemador.

En el primer tramo del horno se le conoce como zona de calentamiento, su temperatura aproximada es de 700° C, en esta etapa se evapora el agua absorbida y combinada de la materia prima. En la siguiente etapa, los álcalis se evaporan, se lleva a cabo la combustión de cualquier materia orgánica y se descompone la caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) a una temperatura de 900 grados centígrados; desprendiéndose gas carbónico que es arrastrado hacia la chimenea, donde sale junto con los gases de combustión, quedando óxido de calcio (cal libre) en 15 a 20 %.



En la siguiente zona del horno se efectúa la descomposición de la arcilla en sus óxidos principales: sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), desprendiéndose agua.



Comienza la combinación de la cal ( $\text{CaO}$ ) proveniente de la caliza con los óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para formar el ferroaluminato tetracálcico y el aluminato tricálcico a los 1250° C.

## Capítulo 1

La etapa de clinkerización se lleva a cabo entre los 900° C y los 1500° C, donde se efectúa la combinación de la cal con la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) formándose el silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), el cuál en presencia de más cal, forma el silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ). Estos forman aglomerados de cristales y vidrios cálcicos de forma aproximadamente esférica, con un diámetro que varía de 0.5 hasta unos 4 cm. que se conoce con el nombre de clínker.

*Enfriamiento:* Esta etapa también es importante ya que determina las características finales en cuanto a molturabilidad en la molienda y resistencia mecánica, durabilidad química y estabilidad de volumen del cemento como producto final. El clínker sale del horno a una temperatura de 1500°C, y debe tener un enfriamiento rápido por lo menos hasta los 1000°C, ya que a esta temperatura se forman las estructuras cristalinas del cemento. Al final de esta etapa, la temperatura debe estar limitada, debido a que en la molienda de clínker-yeso, se genera mucho calor y esto puede deshidratar al yeso lo que ocasiona el falso fraguado del cemento. El aire que se utilizó para el enfriamiento se aprovecha como aire de combustión secundario en el horno aumentando la eficiencia en el proceso de combustión del horno, para secar materias primas o para producir vapor.

En seguida se almacena el clínker para ser molido.

*Molienda del cemento:* Finalmente, el clínker pasa a los molinos de acabado junto con una cantidad de yeso previamente dosificado (2-5%), donde se muele a una finura muy elevada de 3000 a 3300  $\text{cm}^2/\text{g}$  Blaine. La finura del cemento es un factor que junto con la composición química tiene una influencia definitiva en la mayor parte de las propiedades del cemento. El aumento de la finura incrementa la velocidad de hidratación del cemento, aumenta la resistencia mecánica, principalmente a edades tempranas (antes de 28 días), produce una más rápida generación de calor, y aumenta la trabajabilidad y cohesión del concreto.<sup>13</sup> Otro aspecto importante durante la molienda es la distribución del tamaño de las partículas, ya que mientras más uniforme sea se tiene una mayor resistencia bajo las mismas condiciones de superficie específica. La eficiencia de la molienda se verifica clasificando el material.<sup>14</sup>

Cuando se producen otros tipos de cemento, se les añade puzolanas, cenizas volantes, escoria de los hornos, etc.

No obstante que el proceso de fabricación termina cuando el cemento sale de los molinos de acabado, se realizan otras maniobras, como son la conducción del cemento a los silos de almacenamiento, a través de bombas de aire que trabajan a alta velocidad, o por medio de bandas de hule. Finalmente se carga directamente a carros o camiones tolva cuando se entregan a granel, o es envasado en bolsas de papel.

---

<sup>13</sup> Aguilar, Ausencio, *Cemento Portland: fabricación, propiedades y empleo*, México, p. 18-22.

<sup>14</sup> *Manufacture of structural cements*, p. 3-28

### **1.3.2 Proceso húmedo**

Otro proceso de fabricación de cemento es el proceso vía húmeda, el cuál difiere del de vía seca en algunos aspectos.

La elección entre los diferentes procesos está determinada por la economía del proceso.

Este proceso consume una gran cantidad de energía específica (1500-2000 kcal/kg de clinker), sin embargo el proceso húmedo es necesario cuando:

- a. Se tiene un gran contenido de humedad en la materia prima (más del 20%) y el secado requeriría grandes cantidades de calor auxiliar.
- b. La materia prima puede ser procesada mejor como lechada, debido a sus características específicas; como en ciertos tipos de arcillas o yeso.
- c. La única alternativa de transporte de la materia prima es a través de tuberías.
- d. La composición química de la materia prima es inadecuada para el uso de precalentadores.

En este proceso, la arcilla no se tritura sino que se descarga en un molino de rastrillos que la desmenuza y la mezcla con agua para producir una lechada bastante fluida (65% de agua) que se bombea a través de tuberías hasta descargarla en un tanque de concreto provisto de agitadores. Esta lechada se dosifica junto con la caliza previamente triturada, se alimenta a los molinos de crudo donde se añade agua para facilitar la molienda, manejo, control y mezclado de los materiales.

De los molinos, el crudo pasa a unos tanques correctores y de ahí a otros mezcladores, de donde a su vez pasa al horno. En este proceso, el secado se realiza en el horno para mejorar el intercambio térmico, desmenuzar debidamente los aglomerados de polvo crudo y disminuir el arrastre, se utiliza un sistema de cadenas que se mueven lentamente conforme gira el horno.

La transferencia del proceso vía húmeda a vía seca, no se justifica por razones de carácter energético tomando en cuenta los niveles de precios, sino por un incremento en la producción.<sup>15</sup>

Los siguientes pasos de la fabricación son iguales a los que se siguen en el proceso por vía seca.

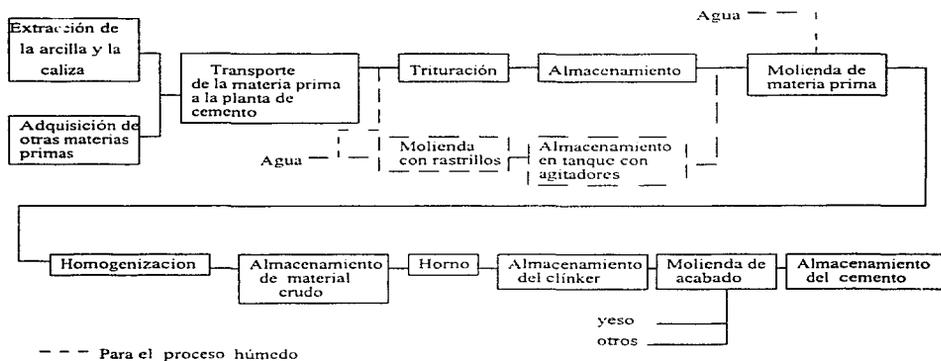
El consumo de energía térmica en el proceso seco es substancialmente menor que en el proceso húmedo, particularmente en los sistemas con precalentadores y precalcinadores, sin embargo el proceso seco es un gran consumidor de energía eléctrica, debido a los molinos y a un gran número de ventiladores que operan con grandes caídas de presión en las áreas de homogenización y de calcinación.

---

<sup>15</sup> "Vía húmeda. ¿Tecnología del pasado?" en *Combustión y clinkerización*, Abril - Junio, 1995, Año 1, No. 1, p. 17-18

## Capítulo 1

Figura 1 Esquema del proceso de fabricación del cemento



### 1.4. Características tecnológicas de cada etapa

En el proceso de fabricación, se consumen grandes cantidades de energía calorífica y de energía eléctrica. En el horno de cemento requiere de 100 a 150 litros de combustóleo o su equivalente en gas natural (1004.8-1507.2 Mcal) para producir una tonelada de cemento. La energía eléctrica se utiliza para mover el equipo de molienda, de trituradoras, hornos, elevadores, bandas y ventiladores. En cada tonelada de cemento se consumen aproximadamente 150 kWh.<sup>16</sup>

En términos generales se describe el equipo utilizado en cada etapa.

#### 1.4.1. Etapa de calcinación

La etapa de calcinación está constituida por el enfriador de clinker, el horno de calcinación y dependiendo del tipo del proceso, utiliza precalentadores y precalcinadores para las materias primas. Durante ésta etapa se consume la mayor cantidad de combustibles.

**Horno de calcinación:** En el horno de cemento no se funden completamente los materiales, sino que llegan a una semifusión durante el cuál se forman aglomerados de forma esférica que se designan con el nombre de clinker. Existen dos tipos de hornos:

<sup>16</sup> Arredondo, R. "La industria del cemento y el medio ambiente" en *Revista IMCYC*, vol. 24, no. 200, enero, 1988, p. 13-18.

Horno vertical. Tienen un bajo consumo de combustible debido a su principio de transferencia de calor directo. Debido a su baja productividad y capacidad limitada (20 a 200 ton. de clínker/día), sólo un 5% de la hornos utilizados en la producción mundial del cemento son verticales. Sin embargo, en India se han planeado la construcción de miniplantas de cemento, donde se aproveche esta tecnología.

Horno rotatorio. La estructura del horno está constituido por un largo cilindro de acero, forrado en su interior con material refractario (de unos 15 cm. de espesor) para resistir las elevadas temperaturas. Los hornos utilizados en la industria del cemento en México miden desde 1.8 hasta 6 m. de diámetro y desde 50 a 120 m. de longitud, con capacidades diarias de 100 hasta 1500 toneladas de material calcinado. Los hornos presentan una inclinación en relación con la horizontal de aproximadamente 4 por ciento. El cilindro está provisto de llantas metálicas que se apoyan sobre rodillos. y cuenta además con una corona conectada al piñón de un motor que lo hace girar.<sup>17</sup>

El sistema de combustión primario está constituido por un quemador que se instala en el extremo de descarga del horno. Si se efectúa una inyección del combustible en forma óptima (granulometría, lugar, ángulo e impulsión) se tendrá una captación adecuada de éste y de los gases calientes del frente de llama, consiguiéndose una zona permanentemente alimentada con el oxígeno del aire comburente, mezclado con el combustible y a una temperatura suficiente que mantenga la ignición de la mezcla, esto permitirá tener una flama estable y un recubrimiento uniforme en la zona de clinkerización.

La naturaleza del combustible condiciona la forma óptima en la que debe ser inyectado<sup>18</sup>. Existen quemadores multicircuitos, tienen una componente radial del aire interior que provoca la expansión del chorro de combustible, estabiliza la flama y genera una zona de recirculación interna; una componente axial del aire exterior que origina el estrechamiento de la flama y un conducto de alimentación del combustible<sup>19</sup>. Esto permite ajustar la forma de la flama, regulando individualmente la longitud y diámetro de la misma, lo que favorece el control de formación de costra, la temperatura del casco, y la calidad del clínker.

Los quemadores actuales se conocen como de alta velocidad, se considera que la alta velocidad del chorro axial exterior succiona el aire secundario hacia el interior de la flama, lo que facilita la rápida ignición del combustible.

El quemador debe operar con el menor porcentaje de aire primario posible, esto mejorará la recuperación de calor en el enfriador.

---

<sup>17</sup> Aguilar, Ausencio. *op. cit.* Referencia 13

<sup>18</sup> Martínez, V., "Nuevos equipos de combustión para hornos rotativos de clínker y similares. Toberas centríco-al" en *Cemento y Hormigón*, no. 718, abril, 1993, p. 427-439.

Erens, F. y Olivier Saint Paul, "High-Level Process control of a cement plant" en *International Cement Review*, Estados Unidos, abril, 1995, p. 94-100

<sup>19</sup> Endres, G. "Reducción de emisiones y consumo de energía en hornos rotativos, por medio de una tecnología punta de combustión" en *Cemento y Hormigón*, no. 718, p. 413-421.

## Capítulo 1

Cuando se utiliza combustóleo, éste no es atomizado, se inyecta lentamente a la harina cruda caliente y fluida.<sup>20</sup>

Para evitar las entradas de aire falso se recomienda el sellado de todas las entradas, o bien la instalación de quemadores auxiliares que empleen el aire falso como carburante en lugar de aire primario.

La velocidad del horno, la proporción de combustible que puede ser quemado en el horno, la forma y longitud de la flama, la cantidad de aire en exceso son los parámetros necesarios para controlar el tiempo de residencia en el horno, la zona de combustión y el grado de volatización del material.

**Precaentador :** Su función es calentar la materia prima a la temperatura de decarbonación utilizando el calor recuperado del horno y separar el carbonato de calcio mientras simultáneamente se crean nuevos minerales.<sup>21</sup> Los gases de salida del horno se mueven en dirección opuesta, crean una turbulencia que mezcla los gases con la harina cruda, lo que permite un eficiente intercambio de calor que induce una calcinación de la materia prima del 40 al 50%.

Existen principalmente dos tipos de sistemas de precaentadores:

- *Precaentadores de suspensión (SP).* La materia prima entra en el extremo superior, y se mueve gradualmente a través de los ciclones hasta llegar al horno rotatorio. Su ventaja es que debido a que la harina cruda se calcina parcialmente antes de entrar al horno, su tiempo de retención disminuye y la productividad del horno aumenta. Su desventaja es que se crea un ciclo de álcalis, los álcalis no son muy deseables por lo que se requiere removerlos a través de un sistema de bypass. Si los gases se remueven en un 10%, el consumo de calor adicional es del orden de 60 kcal/kg clinker.<sup>22</sup>
- *Precaentadores de parrilla (Lepol).* Se utilizan en los procesos semiseco y semihúmedo, como un precaentador externo. La harina cruda es procesada como pellets con una humedad del 12 al 22%. Los pellets están colocados en una banda transportadora que la conduce a la entrada del horno. Dentro de sus ventajas, es que las emisiones de polvo de los sistemas que utilizan estos precaentadores es muy baja (de 0.5 a 1% de la producción de clinker) y se puede reducir notablemente el contenido de álcalis.<sup>23</sup> El consumo de calor mejora con el tamaño, debido a que se tiene menores pérdidas por radiación.

El consumo de calor específico y de energía eléctrica dependen de la temperatura de los gases de escape, la caída de presión y la eficiencia de separación de cada una de las etapas

---

<sup>20</sup> Andersen, K., "Kiln selection", *Energy conservation potential in cement industry conservation paper no. 26*, 1975, p. 189-211.

<sup>21</sup> *Manufacture of structural cement, op cit.* Referencia 14

<sup>22</sup> Fog, M. y Nadkarni, K., *Energy efficiency and fuel substitution in the Cement Industry with Emphasis on Developing countries*, Banco Mundial, p. 6, 8, 49-54.

<sup>23</sup> Schroth, G. "Grate preheater kiln systems" , *Energy conservation potential in the Cement Industry Conservation Paper no. 26*, 1975.

de ciclones.<sup>24</sup> El ciclón más importante es el del extremo inferior ya que la materia prima de este ciclón es parcialmente calcinado y parte del polvo que escapa a la siguiente etapa se recarbonizará y liberará calor. Si la eficiencia de esta etapa se reduce, el consumo de calor específico aumentará notablemente. En cambio, en las etapas superiores el deterioro de la eficiencia no es tan importante, sin embargo influirá en el dimensionamiento del filtro, del conducto de polvo y del ventilador para remover los gases. Dependiendo de las necesidades del horno, se pueden aumentar las etapas de ciclones. Para un horno de 4 etapas con un consumo de 780 kcal/kg clinker, se obtiene una mejora de 16 a 20 kcal/kg clinker pueden ser obtenidas al instalar una 5a. etapa. Sin embargo, esto aumentaría de 0.5 a 0.6 kWh/ton el consumo de energía eléctrica en el ventilador. Generalmente no se instala una 6a. etapa.<sup>25</sup>

*Sistemas con precalcinadores* : Cuando se tiene un sistema con un precalentador de suspensión (SP) y precalcinador, la etapa de combustión se divide en dos, de acuerdo a las dos temperaturas aplicadas durante la calcinación y la clinkerización. La combustión primaria en el extremo de descarga del horno proporciona sólo el flujo de calor requerido para sinterizar el material neutraizado. Y la combustión secundaria se lleva a cabo en el precalcinador proporcionando calor para la descarbonatación de la harina cruda en un 90%.<sup>26</sup>

Ventajas:

- Optimiza la eficiencia de combustión.
- Aumenta la capacidad del horno, sin aumentar las dimensiones de éste.
- Permite utilizar combustibles de bajo poder calorífico, cuyo valor calorífico sea de hasta 3600 kcal/kg en el precalcinador.<sup>27</sup>
- Disminuyen notablemente las emisiones de los óxidos de nitrógeno (NOx).
- Si se utilizan sistemas de recirculación, se puede obtener un nivel deseado de calcinación a temperaturas más bajas, lo que reduce el consumo de combustible, con esto se disminuye el flujo de gas en el sistema y por consiguiente las pérdidas de presión en el precalentador y el consumo de energía eléctrica.<sup>28</sup>
- Bajas caídas de presión.
- Mayor facilidad para remover los álcalis a través de un sistema de bypass.
- Óptimas condiciones para una buena absorción de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

En cuanto a las dimensiones del horno, en los últimos años se han estado instalando hornos cortos con precalcinadores, cuya relación de diámetro y longitud es de 11:1, eliminándose una zona. El tiempo de retención es de 20 minutos aproximadamente: 2 minutos en la zona de calcinación, 6 minutos en la zona de transición, 10 minutos en la

---

<sup>24</sup> *Manufacture of structural cements, op. cit.* Referencia 14

<sup>25</sup> Birch, E., "Energy savings in Cement kiln systems". *Energy efficiency in the cement industry*, 1990, p. 118-128.

<sup>26</sup> Fog, M. y Nadkarni, K., *op. cit.* Referencia 22

<sup>27</sup> Kresiberg, A. y G. Kapoor, "Avances en precalcinadores y precalentadores" en *World Cement*, marzo, 1990, p. 89-93

<sup>28</sup> Kresiberg, A. y G. Kapoor, 1990, *op. cit.* Referencia 27

## Capítulo 1

zona de clinkerización y 2 minutos en la zona de enfriamiento . Estos hornos presentan ventajas para todo tipo de materias primas, si éstas son difíciles de sinterizar, los hornos cortos ofrecen una mayor flexibilidad en el tiempo de residencia y en la carga; para reducir la cantidad de álcalis el porcentaje de bypass puede ser mayor en este tipo de hornos, obteniéndose mejores resultados que en los hornos de dimensiones normales.<sup>29</sup>

*Sistemas de bypass* : Algunos componentes secundarios (álcalis, cloruros, sulfatos) contenidos en las materias primas y en los combustibles se evaporan parcialmente a altas temperaturas y se condensan en la parte baja de los precalentadores, formando recirculaciones que pueden perjudicar la operación del horno formando capas indeseables o disminuyendo la calidad del clinker. El material que no ha sido retenido pasa a los filtros de polvo a través del molino de materia prima, el cuál regresa al sistema a través de una recirculación externa. Existen 3 formas posibles de interrumpir y remover un sistema con recirculaciones:

- Bypass del gas. Es el método más común, se conecta en el punto de transición entre el horno y el precalentador. De esta forma los cloruros álcalis y sulfatos son removidos eficientemente. También es aplicable para metales pesados.
- Bypass de la harina caliente. Este remueve una porción del flujo de la alimentación al horno con compuestos condensados que forman el sistema de recirculación.
- Bypass del polvo. Este remueve a partir de los filtros de polvo y puede interrumpir el sistema de recirculación externa.

Desde el punto de vista operativo, lo óptimo es colocar el bypass en un punto de máxima concentración en el sistema de combustión, de esta forma se minimizan las pérdidas de material, gas y calor.<sup>30</sup> Si en el sistema de bypass se remueve un 1%, el consumo de combustible aumentará de un 5 a un 9 % dependiendo de la cantidad de polvo.<sup>31</sup>

*Refractarios* : El uso de ladrillos de aislamiento apropiados permite una reducción del 10 al 15% en las pérdidas de calor.<sup>32</sup>

En la siguiente página se presenta una tabla en la que menciona el consumo de calor específico, de energía eléctrica y productividad de los diferentes hornos utilizados en la industria del cemento.

---

<sup>29</sup> Wolter, A. "Pyrorapid-short rotary kiln-advantages for all raw materials", en *Zement-Kalk-Gips*, no. 11, 1990, p. 253-256.

<sup>30</sup> Kreft, W., "Comparison of various bypass systems in clinker burning plants", en *Zement-Kalk-Gips*, mayo, 1990, no. 3, p. 59-62.

<sup>31</sup> Andersen, 1975, *op. cit.* Referencia 20

<sup>32</sup> Fog, M. y Nadkarni, K, *op. cit.* Referencia 22

**Tabla 1. 4 Consumo específico, consumo de energía eléctrica y productividad para diferentes tipos de hornos**

Horno	Proceso	Consumo de calor específico [kcal/kg clinker]	Consumo de energía eléctrica [kWh/ton clinker]	Productividad
Rotatorio largo	Húmedo	1856-2121	11-18	0.36-0.59 ton/m <sup>3</sup>
Rotatorio largo	Seco	1220	20	0.2-0.77 ton/m <sup>3</sup>
Rotatorio con SP (2 etapas)	Seco	1087	20	0.7 ton/m <sup>3</sup>
Rotatorio con SP (4 etapas)	Seco	1037	20	1.23 ton/m <sup>3</sup>
Rotatorio con SP (4 etapas) y precalcinador	Seco	957	35	2.1 ton/m <sup>2</sup>

Fuente: Pemex. *Consumo de energía en la Industria del Cemento. Perfiles energéticos industriales no. 1.*, 1982, p. 63-89

Dentro del consumo de calor, se incluye el calor teórico de reacción de clinkerización (415 kcal/kg clinker constante), calor para la evaporación del agua, las pérdidas de calor en los gases de salida, pérdidas en el enfriador y pérdidas por radiación y convección.

*Enfriadores* : Durante esta etapa del proceso se recupera energía, ya que el aire calentado por el clinker se utiliza para precalentar el aire de combustión secundaria del horno, para secar materias primas o para producir vapor y en algunas plantas producir energía eléctrica. En la industria del cemento en México casi todos los enfriadores son de parrilla.

La cantidad de aire secundario depende del consumo de calor específico del proceso, del consumo de aire primario y del consumo de aire excedente. La cantidad de aire secundario aumenta al disminuir la cantidad de aire primario, y al aumentar la cantidad de aire excedente.

Los enfriadores planetarios y rotatorios requieren mayor mantenimiento que los de tipo parrilla. Una medida para mejorar el consumo de combustible en cualquier planta es reducir la cantidad de aire primario en el quemador del horno y aumentar proporcionalmente el aire secundario proveniente de los enfriadores. Un ahorro de aproximadamente 50 kcal/ kg clinker se puede obtener al disminuir el aire primario de combustión de un 10 a un 30 %.<sup>33</sup> Para el enfriador de parrilla, el consumo de energía puede ser disminuido si acepta temperaturas de descarga del clinker más altas.

En la tabla 1.5, se presentan una descripción de los diferentes tipos de enfriadores, su eficiencia calorífica, su potencia requerida y su flexibilidad.

<sup>33</sup> Rosemann H. y P. Künne, "Operating experience with a new type of burner for rotary cement kilns" en *Zement-Kalk-Gips*, no. 11, 1990, p. 247-250.

**Tabla 1.5 Tipos de enfriadores, eficiencia calorífica, potencia requerida y flexibilidad.**

Tipo de enfriadores	Descripción	Eficiencia calorífica [%]	Potencia requerida [kwh/ton]	Flexibilidad
Parrilla móvil	Es un intercambiador de calor de flujo cruzado. Se obtiene la rápida extinción inicial de temperatura inicial. Requiere más aire de enfriamiento del que puede ser utilizado como aire secundario. Para temperaturas de clinker mayores de 672° C, la eficiencia de recuperación del calor es total (100%).	68-71	6-9	alta
Arreglo Tubular planetario	Es un intercambiador de calor contracorriente. Los tubos están sujetos a la etapa final del horno, aumentando en 10% su peso, y en 30% su longitud. No se puede controlar el tiempo de enfriado. Se tiene una distribución desigual en los tubos, por lo que la temperatura de descarga del clinker y del aire secundario, puede fluctuar. Se utiliza agua para mejorar la eficacia del enfriamiento, pero el calor resultante o la evaporación de esta agua no puede ser aprovechado por el proceso.	64-71	0.5-1.5 (motor del horno)	ninguna
Rotatorio	Es un intercambiador de calor contracorriente. La caída de presión en este enfriador es menor que en los de parrilla y los de tiro de ventilación. Es un tubo similar al horno, pero con su propio motor. Utiliza agua para enfriar la carcaza o para enfriar directamente el clinker.	66-70	± 3.15	moderada
Híbrido De parrilla y arreglo de tubos planetario	Está destinado para utilizarse con un precalcinador que requiera una alimentación separada de aire secundario. El enfriador planetario proporciona el aire secundario para el horno, y el de parrilla recibe el clinker parcialmente enfriado, completa el enfriamiento y provee al calcinador de aire secundario.			

Tabla 1.5 Continuación

Tipo de enfriadores	Descripción	Eficiencia calorífica [%]	Potencia requerida [kwh/ton]	Flexi-bilidad
De tiro para ventilación	Es un intercambiador de calor contracorriente, el clinker caliente entra por el extremo superior y parte del aire frío entra por el extremo inferior y otra parte es introducido en el extremo superior para la rápida extinción de la temperatura inicial. La enorme caída de presión requerida para forzar la circulación de aire a través del compartimiento, demanda una gran potencia eléctrica.	Bajo estudio	> 9	bajo estudio

Fuente: Warshawsky, J. "Energy consideration in clinker cooling", en *Energy Conservation Potential in Cement Industry*, 1975.

#### 1.4.2. Molienda

Los molinos de clinker son los mayores consumidores de energía eléctrica en las plantas de cemento, éstos consumen el 40% de la energía eléctrica total, seguidos por los molinos de materias primas.

La mayor parte de la energía consumida en la molienda del material no es utilizada por el proceso propiamente, sino que es desechado en forma de calor.

Los molinos utilizados en la industria del cemento son los molinos de bolas, los molinos de rodillos, y recientemente se están utilizando sistemas integrales, los cuales utilizan ambos tipos de molinos.

La industria del cemento en México, utiliza molinos de bolas, cuya eficiencia energética es entre 5 y 9 %<sup>34</sup>. Si se implementaran molinos de rodillos, se podría ahorrar del 15 al 25% en energía eléctrica, ya que sólo requiere del 70 al 80% de la potencia utilizada por un molino de bolas para efectuar el mismo trabajo.

Cabe mencionar que la molienda y secado de materias primas permite absorber cerca del 40 al 100% de las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)<sup>35</sup>.

*Molino de bolas:* Es un cilindro horizontal de 2 a 5 m. de diámetro y de 3 a 22 m. de largo, revestido de placas de acero con motores de 300 hasta 8700 HP, está dividido en 2 compartimientos, en uno de ellos contiene bolas de acero de 50 a 80 mm. y en el otro de

<sup>34</sup> Schroth, G.A., "Roller mills, why and when" en *Energy Conservation Potential in the Cement Industry Conservation Paper no. 26*, 1975.

<sup>35</sup> Küper, D. y M. Seebach, "Designing a cement plant for the most stringent Environmental Standards", *IEEE 1994 Cement Industry Technical Conference*, mayo, 1994, p. 332-333.

## Capítulo 1

20 a 25 mm.<sup>36</sup> El movimiento de rotación rápido provoca el choque de las bolas entre sí y con las paredes, mezclando y pulverizando los materiales contenidos. Para mejorar la eficiencia del molino de bolas, se han introducido las siguientes medidas:

- Uso de clasificadores de alta eficiencia en circuito cerrado, esto incrementa la producción en un 40% (25% es atribuible al clasificador), mejora la calidad del cemento aumentando su resistencia en un 6%,<sup>37</sup> se reduce la temperatura de descarga del cemento de 120° C en circuito abierto a 80° C en circuito cerrado (debido al efecto enfriante del clasificador),<sup>38</sup> y reduce el consumo de energía en un 13% (6 kWh/ton clinker aproximadamente). En los últimos años se han desarrollado los clasificadores con ciclones y los clasificadores de aire espiral.
- Trituración preliminar, esto puede ahorrar 6 kWh/ton de materia prima aproximadamente, o 9 kWh/ton clinker.<sup>39</sup>
- Uso de auxiliares para la molienda, el consumo de energía específica se reduce de 4-12 kWh/ton clinker, dependiendo del tipo de cemento producido.<sup>40</sup>
- Optimización de la carga del molino, esto implica tener un nivel adecuado de material a lo largo del molino que permite tener un flujo de material suficiente sin sobrecargar el primer compartimento, y un tamaño adecuado de las bolas.
- Uso generalizado de líneas de separación y clasificación.
- Introducción de motores de velocidad controlada.

**Molino de rodillos:** La pulverización se realiza a través de la compresión de material en dos pistones planos. Se lleva a cabo una primera compresión, las partículas menores llenan los espacios entre las partículas mayores. Al aplicar mayor presión, las partículas grandes se fracturan, y las pequeñas se reducen por fricción. Esta acción compresiva se repite aproximadamente 30 veces.<sup>41</sup>

Las ventajas del molino de rodillos son:

- Alta capacidad de secado y bajos requerimientos de energía.
- Tamaño de la alimentación, la materia que entra al molino puede ser de 7 a 10 cm. por lo que se evita la etapa de trituración.

---

<sup>36</sup> Cemex, *El cemento Portland y su proceso de fabricación en México y en el mundo*, México, p. 4-11.

<sup>37</sup> *Manufacture of structural cements*, op. cit. Referencia 14

<sup>38</sup> Parkes, P.F. "Energy saving by utilization of high efficiency classifier for grinding and cooling of cement on two mills at Castle Cement limited. Clitheroe, Lancashire, U.K.", en *Energy efficiency in the Cement Industry*, mayo, 1990, p. 92.

<sup>39</sup> Organización de las Naciones Unidas, *Energy conservation in the Cement Industry - some experiences*, 1982, p. 4, 6-8,34-38.

<sup>40</sup> Fog, M. y K. Nadkarni, op. cit. Referencia 21

<sup>41</sup> Beke, B., "Importance of roller milling in cement production" en *World Cement Technology*, marzo, 1982, p. 76-80.

- Produce menor ruido.
- Menor tiempo de retención en el molino, que depende del espesor de las capas.
- Mayor control en la calidad del cemento, se pueden hacer ajustes inmediatos cambiando la presión de los rodillos.
- Distribución del tamaño de las partículas más uniforme.<sup>42</sup>
- Se necesita menos espacio para un molino de rodillos de la misma capacidad de un molino de bolas.

Las desventajas del molino de rodillos son:

- La inversión inicial es muy alta.
- No es adecuado para todo tipo de materias primas, algunos tipos de sílice y cuarzo incrementan el desgaste en los elementos que se utilizan en la molienda a niveles económicamente intolerables.<sup>43</sup>

*Sistemas de molienda integral:* estos sistemas utilizan rodillos de alta presión para la molienda gruesa, y un molino de bolas para la molienda fina. Este tipo de molienda aumenta considerablemente la capacidad en el molino de bolas, así como todo su mecanismo de reducción por lo que requiere una optimización adecuada de la carga. Existen cuatro modos de operación: premolienda, molienda híbrida, molienda combinada y molienda final; las cuáles consisten en moler previamente a una finura determinada el clinker y el yeso en molinos de rodillos, y una molienda final en los molinos de bola. La capacidad del molino de bolas es variable de acuerdo al modo de operación; al tener una operación más uniforme en el molino de rodillos, se disminuye la carga en el molino de bolas y éste aumenta su capacidad y se incrementa el ahorro de energía.<sup>44</sup>

### 1.4.3 Almacenamiento y Manejo

Una gran variedad de materiales como el cemento, escoria de altos hornos, ceniza volante, es transportada y almacenada en silos (cilindros muy altos con paredes de concreto gruesas y resistentes capaces de contener miles de toneladas de material a ser procesado), extraídos y pesados. Debido a la necesidad de contar con equipo adecuado para pesar el cemento con una alta precisión, equipo de alta flexibilidad en la línea de empaquetamiento y una protección adecuada del producto final contra el polvo y la humedad, se han desarrollado diferentes tipos de silos, extractores y máquinas empaquetadoras.

---

<sup>42</sup> Schroth, G.A., 1975, *op. cit* Referencia 34

<sup>43</sup> *Ibid*

<sup>44</sup> Schwarz, S. y M. Seebach, "Grinding optimisation using high pressure grinding roll and downstream ball mills" en *World cement*, septiembre, 1990, p. 385-388. Y Patzert, N. "High-Pressure Grinding Rolls. A survey of Experience", *IEEE 1992 Cement Industry Technical Conference*, mayo, 1992.

## Capítulo 2.

### Características de los cambios en la intensidad energética de la Industria del cemento

Existen dos métodos para la fabricación del cemento: la vía seca y la vía húmeda. En México se utiliza casi en su totalidad la vía seca. Actualmente las plantas que fabrican mediante la vía húmeda están quedando fuera de servicio o están cambiando del proceso húmedo al proceso seco, ya que la eficiencia energética de éste es mayor que la de vía húmeda.

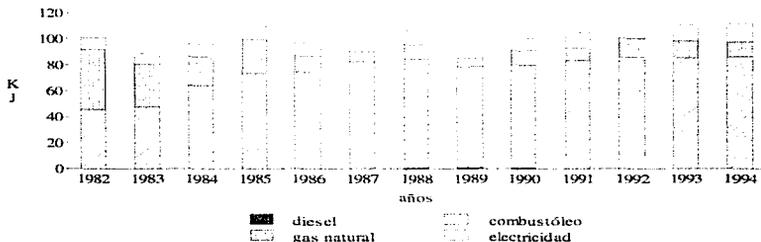
Dentro del proceso de fabricación, los hornos de cemento requieren de una gran cantidad de energía calorífica. En México, las principales fuentes energéticas son el combustóleo y el gas natural. La energía eléctrica es utilizada principalmente para mover el pesado equipo de molinos, hornos, trituradores, bandas, elevadores y ventiladores. Asimismo el diesel, que se consume en cantidades mínimas, se emplea fundamentalmente en el bombeo y calentamiento del combustóleo dentro del proceso productivo, y en el transporte. Los combustibles representan aproximadamente un 75 % de los insumos energéticos utilizados en el proceso, el 25 % restante es consumido por la electricidad. Actualmente para producir una tonelada de cemento se consume de 90 a 150 litros de combustóleo o su equivalente en gas natural, y aproximadamente 150 kWh de energía eléctrica.

El hecho de que se consuma el 90 % de la energía térmica en los hornos de cemento durante la etapa de clinkerización, y el 40 % de la energía eléctrica en la molienda final del cemento ha dado lugar a cambios tecnológicos y energéticos que aumenta la productividad y la eficiencia de estas etapas.

La Gráfica 2. 1 muestra el consumo de energía de las principales fuentes energéticas de la Industria del cemento en México de 1982 a 1994.

Gráfica 2. 1

Consumo de energía  
Industria del Cemento en México

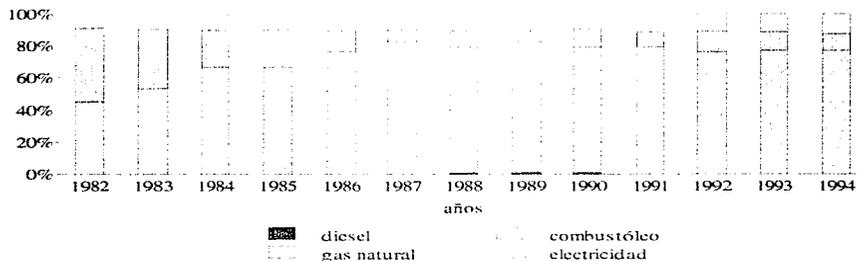


De acuerdo a la Gráfica 2. 1, el consumo de energía global disminuyó drásticamente en un 11.9% en 1983. En el periodo de 1983 a 1985 su incremento fue pronunciado, el consumo se redujo y creció paulatinamente de 1986 a 1988, se comportó de la misma manera entre 1989 y 1991, y a partir de 1992 se mantuvo constante.

Por otro lado, se puede apreciar en la Gráfica 2. 2 las variaciones en el empleo de cada fuente energética durante este periodo. En 1982, la industria cementera mexicana consumía casi la misma cantidad de gas natural que de combustóleo. A partir de 1983 el gas natural comienza a ser sustituido por el combustóleo; el consumo de gas natural disminuyó en un 85.56% desde 1982 a 1989, en este último año representó solamente el 7% del consumo total de esta rama industrial. Actualmente el porcentaje del consumo de combustóleo es de 77.78%, mientras que el del gas natural es del 11.3%. Por otro lado, el consumo de energía eléctrica aumentó en un 56.78% de 1982 a 1994.

Gráfica 2. 2

Consumo energético  
en la industria del cemento



De las 32 plantas cementeras que existen actualmente, veinte utilizan únicamente combustóleo, siete utilizan combustóleo o gas natural, una emplea exclusivamente gas natural, y de las cuatro restantes no se tiene información respecto al combustible utilizado.<sup>4n</sup>

De acuerdo con la metodología planteada por Schipper (1994), la evolución del consumo energético de esta rama industrial responde a tres tipos de cambios:

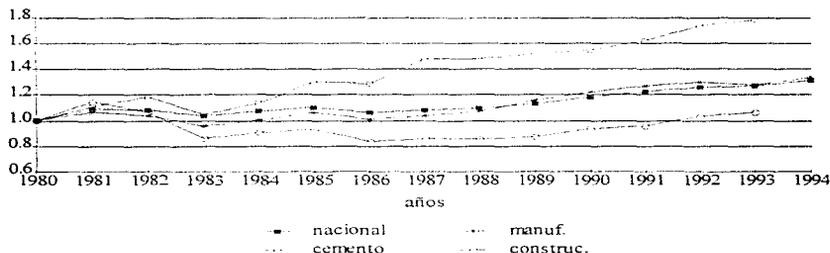
- 1) Actividad, se refiere a la evolución del PIB manufacturero.
- 2) Estructura, es la participación de la industria del cemento dentro de la Industria Manufacturera.
- 3) Intensidad energética, se define como la proporción entre la energía consumida y el crecimiento o debilitamiento del Producto Interno Bruto.

<sup>4n</sup> SEMIP. *Características del consumo de energía en la Industria del Cemento en México: evolución y perspectivas*, México, 1992.

## 2.1 Actividad y estructura

La industria del cemento está fuertemente ligada con la industria de la construcción, esta última es muy sensible al crecimiento o debilitamiento de la actividad económica nacional. La crisis económica hizo que la actividad de la industria de la construcción disminuyera drásticamente en 1983, y a partir de ese año se ha recuperado paulatinamente. A pesar de la relación entre ambas industrias, el incremento en la producción de la industria cementera ha sido superior al de la construcción, inclusive al de la industria manufacturera y al conjunto de la economía nacional, como se puede observar en la Gráfica 2.3.

Gráfica 2.3  
Producto Interno Bruto



Fuente: Sexto Informe de Gobierno 1994.  
INEGI, Banco de datos.

En 1993, la producción del cemento fue 47.2% mayor que la de 1982.<sup>46</sup> A pesar del debilitamiento de la economía mexicana entre 1982 y 1988, la producción del cemento logró recuperarse mediante las exportaciones, lo cual se vio reflejado en 1987 cuando las ventas externas representaron el 16.5% de la producción nacional.<sup>47</sup> Actualmente, las exportaciones de la industria cementera siguen en una etapa de expansión, pese a una disminución en las exportaciones, debido a una cuota compensatoria impuesta por el gobierno estadounidense al cemento mexicano como se observa en la tabla 2.1.<sup>48</sup>

Como se observa en la Gráfica 2.4, la estructura que indica la participación de la industria del cemento en el PIB manufacturero disminuyó entre 1982 y 1983, creció notablemente hasta 1987, decreció nuevamente en 1990 y tendió a aumentar en los últimos años. En 1995 la actividad de la industria cementera se redujo debido a la crisis económica.

<sup>46</sup> Con datos del Anuario 1987, CANACEM y del Sexto Informe de Gobierno, 1994.

<sup>47</sup> Salomón, 1995, *op. cit.* Referencia 3

<sup>48</sup> *Ibid dem*

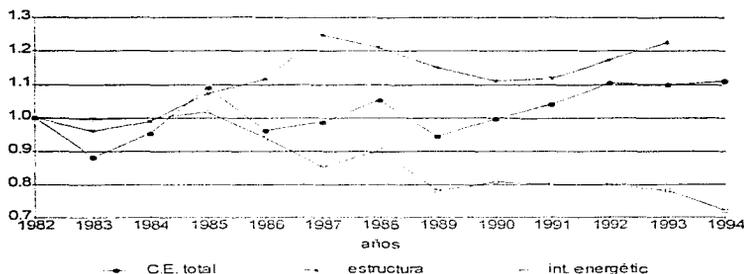
Capítulo 2

Tabla 2.1 Producción, Consumo Nacional y Exportaciones de cemento de 1982-1994

Año	Producción [miles de toneladas]	Consumo Nacional [miles de toneladas]	Exportaciones [miles de toneladas]
1982	19298	19300	202
1983	17068	16184	865
1984	18436	16659	1619
1985	20680	19010	1745
1986	19751	16801	3036
1987	22347	18522	3682
1988	22512	18289	4224
1989	23333	19841	3889
1990	23824	21326	2498
1991	25092	23614	1479
1992	26700	26489	1100
1993	27142	26857	3340
1994	29674	28800	n.d.

Fuentes: Salomón, "Industria del cemento : pruebas del tiempo" en *Comercio exterior*, 1995, CANACEM, *Anuario 1987*, México, 1987.

Gráfica 2. 4  
Industria del cemento en México



Fuentes: SEMIP, Balance nacional de energía 1987-1994, Cámara Nacional del Cemento, *Anuario 1987*, Sexto Informe de Gobierno, 1994, INEGI, Sistema Nacional de Cuentas Nacionales.

En la Gráfica 2. 4, se puede observar que las variaciones en la intensidad energética, de las que se habla en el siguiente inciso, están fuertemente ligadas a los cambios estructurales de la industria del cemento.

## 2.2 Intensidad energética

Entre 1982 y 1985, la intensidad energética, que es el consumo de energía por unidad del PIB del cemento, se mantiene casi constante. A partir de este año, la tendencia es decreciente, con un ligero aumento en 1988. Entre 1990 y 1992 la intensidad se mantiene constante, pero registra una nueva caída entre 1992 y 1994. La intensidad energética de la industria cementera registró una importante disminución durante la última década. En 1994, el consumo de energía por unidad de PIB decreció cerca del 28% respecto a 1982. Este decremento no fue continuo, como lo muestra la Gráfica 2. 4. Entre 1982 y 1985 la intensidad permanece constante, en tanto que disminuye entre 1985 y 1988.

La disminución de la intensidad energética en la industria del cemento tiene tres causas principales:

### i) Disminución de la producción con proceso húmedo e instalación de nuevas plantas

En 1980, el 7.3% de la producción se realizó en 2 plantas con 6 hornos largos de proceso húmedo. Entre 1987 y 1990 una de las plantas dejó de utilizar 3 de estos hornos. En 1990 la producción realizada mediante este proceso sólo fue del 3 %.<sup>49</sup>

De 1982 a 1994, la capacidad instalada aumentó en un 34.8 %, alcanzando 39.34 millones de toneladas.<sup>50</sup> Esto fue debido principalmente a la construcción de 6 plantas de cemento en Tabasco (1982), Hidalgo (1985), Sinaloa(1990), Coahuila(1991), Colima(1993) y Puebla(1994). La disminución del consumo de energía por unidad del PIB se ve reflejado en el incremento de la producción debido a los avances tecnológicos con los que disponen las plantas de Puebla, Colima y Coahuila que han sido construidas en los últimos 5 años.

### ii) Incremento del cemento puzolánico

La fabricación de cemento puzolánicos, al añadir puzolanas al clinker, permite tener un incremento en la producción con la misma cantidad de clínker, con ello se reducen el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad producida.

En los últimos años la producción de cementos puzolánicos ha aumentado notablemente, en 1990 llegó a representar el 42% de la producción total. Entre 1982 y 1986, el ahorro en el consumo de energía debido a la fabricación de estos cementos fue

<sup>49</sup> Cembreau, *World Cement Directory 1987* y *World Cement Directory 1991, anuarios*, y SEMIP, 1992, *op. cit.*

<sup>50</sup> Rock products, *1994 North American Cement Directory*, Estados Unidos, 1994.

## Capítulo 2

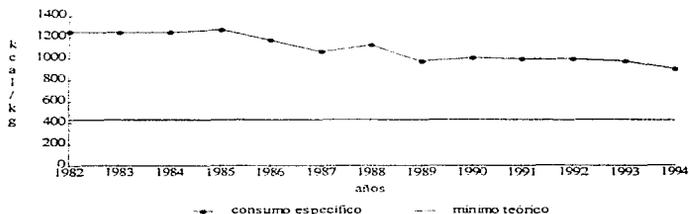
de 2.6% en promedio. De 1987 a 1990, el ahorro se incrementó al producir una mayor cantidad de cementos puzolánicos.

### iii) Modernización de las plantas existentes

La capacidad instalada de plantas existentes ha aumentado, y se han instalado sistemas de precalentamiento y precalcificación, sistemas automatizados del proceso de producción, sistemas de molienda más eficientes, equipo para el control de emisiones contaminantes, y equipos especiales para el uso de combustibles alternativos.<sup>51</sup>

El consumo específico definido como la cantidad de energía necesaria para realizar una actividad específica se comporta de manera similar a la intensidad energética. En México, el consumo específico se redujo de 1249.95 kcal/kg de cemento a 970.192 kcal/kg de cemento, es decir, en 1994 el consumo de energía por unidad de valor agregado fue 28 % menor que en 1982.<sup>52</sup> A medida que la industria cementera ha crecido inevitablemente el consumo de energéticos también ha aumentado, pero se han utilizado de manera más eficiente. Como se observa en la Gráfica 2. 5, el consumo específico se ha reducido en los últimos años. Sin embargo, existe una gran diferencia entre el consumo específico real y el consumo teórico necesario para la fabricación del cemento. En esta diferencia existe un gran potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones de dióxido de carbono. El consumo de energía térmica mínimo para la formación de clínker es de 430 kcal/kg (1.8 GJ/ton).<sup>53</sup> En 1994 se tiene el mínimo consumo específico obtenido en la industria cementera nacional que es de 970.192 kcal/kg (4.06 GJ/ton). Es importante mencionar que la nueva planta localizada en Tepeaca Puebla reporta un consumo específico de 725 kcal/kg. clínker, un indicador de eficiencia comparable con los mejores del mundo.

Gráfica 2. 5  
Consumo específico  
Industria del Cemento en México



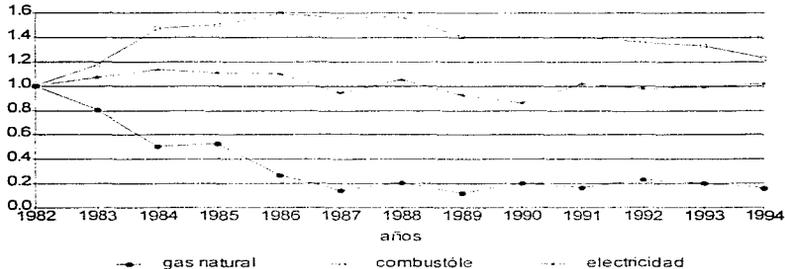
<sup>51</sup> Apasco, 1990-1994 y Cemex, 1994. *Op. cit.* Referencias 11 y 12

<sup>52</sup> De acuerdo a los datos del Balance Nacional de Energía publicado por la SEMIP, el Anuario 1987 de la CANACEM, el Sexto Informe de Gobierno 1994 y el Sistema Nacional de Cuentas Nacionales (INEGI).

<sup>53</sup> Organización de la Naciones Unidas, 1982, *op. cit.* Referencia 39

La Gráfica 2. 6 muestra los cambios en el consumo de energía por unidad del PIB para las principales fuentes energéticas. Como se puede observar, la intensidad del gas natural ha ido en descenso, mientras la del combustible crece entre 1982 y 1988, y disminuye a partir de este último año. La electricidad ha tenido un comportamiento más constante.

**Gráfica 2. 6**  
Intensidad energética por fuente  
Industria del cemento



Para el ahorro de energía las plantas cementeras se han equipado con sistemas de precalentamiento y precalcificación. Estos sistemas reducen notablemente el consumo de energía en el horno durante la etapa de clinkerización, ya que utilizan el contenido energético de los gases de combustión proveniente de los hornos para calentar la mezcla cruda que se introduce al horno. En 1991 sólo cinco plantas, que representan menos del 3% de la capacidad instalada total, no cuentan con sistema de precalentamiento.<sup>54</sup>

La electricidad consumida por tonelada de cemento no presenta variaciones muy pronunciadas. De 1984 a 1990, la intensidad energética de la electricidad disminuye, y a partir de 1990 tiende a aumentar. El consumo de energía eléctrica podría disminuir si se implementan molinos de rodillos en lugar de los molinos de bolas comúnmente utilizados en la Industria Cementera Mexicana. Dentro de los cambios en la etapa de molienda, se sabe que una nueva planta ha implementado en la etapa de molienda final de cemento, un sistema híbrido integral de molienda que utiliza un molino de rodillos y un molino de bolas, aumentando la capacidad de molienda de la planta.

La industria del cemento en México ha utilizado otras opciones para ahorrar energía, entre ellas se encuentran el uso de combustibles alternativos, que sustituyen parcialmente a los combustibles fósiles, y la fabricación de cementos puzolánicos que tengan propiedades similares al cemento Portland. Estas alternativas son estudiadas en capítulos posteriores.

<sup>54</sup> SEMIP, 1992, *op. cit.* Referencia 45

## 2.4 Emisiones de Bióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

El bióxido de carbono es el gas que se produce en mayores cantidades durante el proceso de combustión, y debido a su gran capacidad de absorber y emitir calor es el principal componente de los gases invernadero.

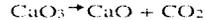
El objetivo de analizar las emisiones de CO<sub>2</sub> es evaluar las implicaciones de este contaminante respecto al cambio climático en el mundo, y relacionar el uso de la energía con los efectos ambientales.<sup>7</sup>

La Industria del Cemento mundial contribuye con un 2% a las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, producidas principalmente en:

1. La combustión necesaria para alcanzar el calor requerido (1450° C) en la zona de clinkerización, representa el 45.5% de las emisiones.

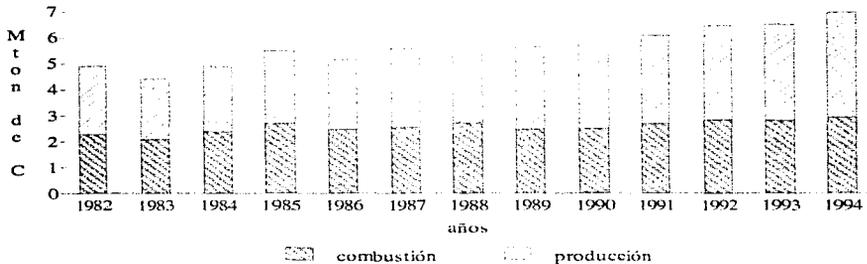


2. La reacción de decarbonatación, es decir, la descomposición de la caliza para formar clínker; representa el 54.5% de las emisiones.



La Gráfica 2. 7 muestra que las emisiones totales de dióxido de carbono de esta rama industrial han aumentando en los últimos años, principalmente las emisiones que resultan de la decarbonatación de la caliza debidas al incremento en la producción del cemento. En 1982, la industria cementera mexicana generó 4.9 millones de toneladas de carbono provenientes al CO<sub>2</sub>, para 1994 estas emisiones aumentaron a 7 millones de toneladas, lo que representa un incremento del 42.2 % respecto a 1982.

Gráfica 2. 7  
Emisiones de CO<sub>2</sub> totales  
Industria del Cemento en México



<sup>7</sup> Sheinbaum, 1994

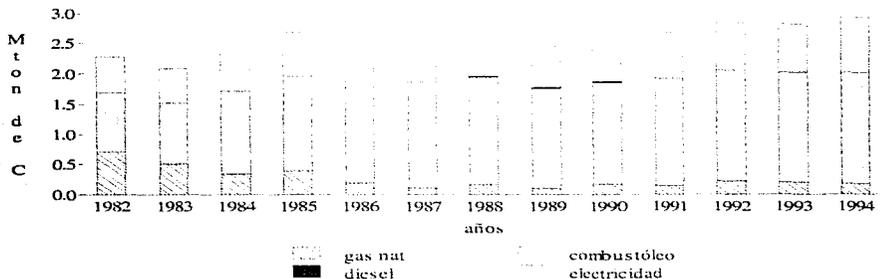
Es importante mencionar que las emisiones de carbono debidas a la combustión son producidas al quemar combustibles fósiles tanto en el proceso de fabricación del cemento como en la generación de energía eléctrica consumida por el mismo. Por esta razón se deben mejorar tanto la eficiencia del proceso de fabricación como la eficiencia de conversión de energía. Los cálculos de las emisiones de CO<sub>2</sub> se realizaron en base a los índices de emisión de cada fuente energética utilizada. Estos índices estiman que tanto carbono se emite al producir cierta cantidad de energía.<sup>38</sup> Para el combustóleo, gas natural, y diesel, los índices de emisión son fijos y tiene los siguientes valores: 21.3, 15.3, y 21.2 kg. de C por GJ de combustible, respectivamente.<sup>39</sup> El índice de emisión de la electricidad varía dependiendo de la proporción de los combustibles utilizados en los diferentes tipos de generación de energía eléctrica del país durante cada año, y el contenido de carbono en dichos combustibles. Para obtener las emisiones debidas al consumo de electricidad se debe tomar en cuenta la eficiencia de generación, que en México se considera del 30%. La metodología utilizada para los cálculos de las emisiones por cada fuente energética están descritos en el anexo 1.

La Gráfica 2. 8 muestra como varían las emisiones de carbono debidas a la combustión de los diferentes fuentes energéticas que se utilizan en la Industria Cementera Mexicana. Se observa que el comportamiento de las emisiones es muy sensible la sustitución de energéticos. Por otro lado, en los últimos años el consumo de electricidad ha aumentado lo cual ha incrementado en forma proporcional las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Gráfica 2. 8

Emisiones de CO<sub>2</sub> por combustibles

Industria del Cemento en México



Las emisiones de bióxido de carbono debidas a la decarbonatación no se pueden evitar, es una etapa esencial dentro de la fabricación del cemento, sin embargo, las emisiones se pueden reducir al utilizar materiales con propiedades cementantes como

<sup>38</sup> SEMIP, 1992

<sup>39</sup> Factores de emisión del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)

## Capítulo 2

sustitutos parciales para el cemento. La sustitución de clínker por aditivos, como la puzolana, disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en la formación del clínker tanto en la decarbonatación de la caliza como en la combustión. La mayor parte de las estrategias que se utilizan para la reducción de estas emisiones están dirigidas a mejorar la eficiencia de la combustión:

i) Uso eficiente de la energía; a fin de reducir los productos de la combustión.

Existe un gran potencial de ahorro en la industria del cemento, ya que de la energía consumida por el horno el 48% son pérdidas; 24% debidas a los gases de salida, 14% en el enfriador, y 10% son pérdidas por radiación y por convección. Para reducir estas pérdidas se recomienda implementar sistemas con precalentadores que incluyan válvulas y ciclones con bajas caídas de presión; una combinación adecuada de éstos permite ahorros de energía del 3 al 8%. Las pérdidas en el enfriador pueden reducirse al mejorar el intercambio de calor entre el clínker caliente y el aire, y utilizar el calor recuperado en la combustión secundaria en los precalentadores.

ii) Uso de desechos industriales y orgánicos como sustitutos parciales de combustibles primarios.

Esta medida sigue generando CO<sub>2</sub> como producto de la combustión. Sin embargo, al quemar estos desechos para la fabricación de clínker en lugar de quemarlos en incineradores comerciales, se reduce el volumen total de las emisiones de manera proporcional a la sustitución de combustibles primarios.

Al quemar desechos, además de reducir las emisiones, disminuye el volumen de desechos en el medio ambiente, se aprovecha la energía generada durante la combustión, y se incorporan al clínker algunos compuestos secundarios como cenizas, zinc, metales pesados, etc.

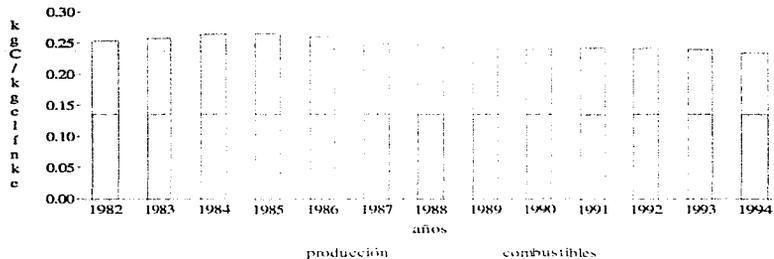
iii) Uso de desechos de cal u otros desperdicios como sustitutos parciales para la caliza.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> debidas a la decarbonatación de la caliza disminuyen al reemplazar cierta cantidad de caliza por desechos que contengan los óxidos principales (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que constituyen al cemento. Algunos materiales como las cenizas de combustibles no requieren ser decarbonatadas debido a su contenido de cal (CaO), de esta manera disminuye la generación de CO<sub>2</sub> al reducirse la proporción de caliza y la combustión de combustibles fósiles.

La Gráfica 2. 9 muestra las emisiones de carbono provenientes del CO<sub>2</sub> por unidad de valor agregado, también conocidas como emisiones específicas, de acuerdo al proceso donde se forman. Las emisiones específicas debidas a la decarbonatación de la caliza se consideraron constantes, en un valor de 136 kg. de carbono por tonelada de clínker producido según Worrell y colaboradores (1995).<sup>58</sup> Mientras que las emisiones específicas debidas a la combustión varían ligeramente alrededor de los 98 y los 130 kg. de carbono por tonelada clínker.

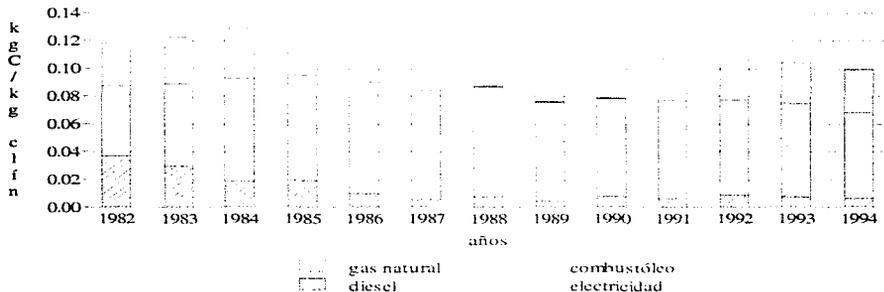
<sup>58</sup> Worrell, Ernest, et. al., *International comparison of energy efficiency improvement in the cement industry*, E.U.A., agosto, 1995.

**Gráfica 2. 9**  
**Emisiones específicas de CO2 totales**  
 Industria del Cemento en México



Como se desea analizar con mayor detalle las variaciones en las emisiones de CO2 por unidad de valor agregado debidas a la combustión; en la Gráfica 2. 10 se muestran las emisiones específicas por fuente energética utilizada.

**Gráfica 2. 10**  
**Emisiones específicas de CO2 por fuente**  
 Industria del Cemento en México



De 1982 a 1985, las emisiones específicas debidas a la combustión aumentaron principalmente por la sustitución del gas natural por combustóleo, el cuál tiene un mayor contenido de carbono. A partir de 1985 a 1990, las emisiones específicas disminuyeron, aumentaron ligeramente hasta 1992 y se redujeron nuevamente hasta 1994. Durante este periodo la intensidad energética de esta rama industrial se comporta de manera similar, estas variaciones se deben a la construcción y modernización de plantas con equipo de

## Capítulo 2

alta eficiencia energética, y al incremento en la producción de cementos puzolánicos que requieren menos cantidad de clinker y, por lo tanto, menos combustibles y menos caliza.

De acuerdo a Worrell, existe un mayor potencial de reducción de emisiones al disminuir la proporción de clinker en el cemento produciendo cementos con aditivos, ya sean puzolanas, escoria granulada de alto horno o cenizas volantes.

### 2.5 Comparación internacional

Como se mencionó anteriormente la industria del cemento es una de las mayores consumidoras de energía, y es responsable de cerca del 2 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo. El cemento es producido por 80 países, y en 1990 la producción mundial fue de 1150 millones de toneladas.<sup>59</sup> Por lo que es importante analizar las posibilidades de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> que tiene esta industria. México se encuentra dentro de los diez principales productores de cemento en el mundo, y resulta interesante observar la eficiencia energética y el impacto ambiental de la industria cementera nacional respecto a otros países.

De acuerdo a la metodología utilizada por Sheinbaum y Schipper (1994), la energía puede ser analizada en tres niveles:

- Energía final: es la cantidad de energía utilizada directamente para realizar una actividad o un servicio, en este caso, la producción de cierto volumen de cemento.
- Energía primaria: es la suma de la energía final más las pérdidas que existen durante la generación, transmisión y distribución de la electricidad.
- Emisiones: indican la relación que existe entre el uso de la energía con el impacto ambiental.

El consumo específico de energía (SEC por sus siglas en inglés) se define como la cantidad de energía por unidad producida. Para la comparación se analiza el consumo específico de energía primaria (SECp), que representa la demanda de energía primaria de este sector industrial. Y se obtiene sumando el consumo específico de los combustibles fósiles (SECf) y el consumo específico de electricidad (SECe) dividido entre la eficiencia de generación de la electricidad. A partir de este último se estima la demanda de energía primaria para la producción de la electricidad consumida.<sup>60</sup>

El consumo específico está influenciado principalmente por 3 factores: el tipo de cementos producidos, el tipo de materias primas utilizadas y la eficiencia del proceso utilizado.<sup>61</sup>

De acuerdo a Worrell, el ahorro de energía en la industria del cemento se obtiene al mejorar la eficiencia energética y al incrementar la producción de cementos mezclados.

---

<sup>59</sup> Worrell, 1995. *op. cit.* Referencia 58

<sup>60</sup> SEMIP, 1992. *op. cit.*. Referencia 45

<sup>61</sup> SEMIP, 1992. *op. cit.*. Referencia 45

los cuáles demandan una menor cantidad de clínker porque se les añade aditivos hidráulicos como las puzolanas, escoria granulada de alto horno o cenizas volantes.

Para comparar la eficiencia energética de la industria cementera en los distintos países se asume un consumo específico de 3.05 GJ de combustible por tonelada de clínker producido para un horno corto de proceso seco con un precalentador de 4 etapas, que se considera como la mejor tecnología disponible. La demanda de electricidad para la molienda de clínker se considera de 0.36 GJ de electricidad por tonelada de clínker. Si se utiliza escoria de alto horno, el consumo eléctrico para su secado es de 0.75 GJ de combustible por tonelada de escoria; y para moler y mezclar puzolanas se consumen 0.24 GJ de electricidad por tonelada de aditivo.<sup>62</sup>

El potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al producir cementos mezclados depende del aditivo disponible en cada país y de la proporción de clínker en el cemento. La escoria de alto horno se obtiene al procesar la caliza, el coque y el mineral de hierro en la fundición de este mineral; esta escoria fundida al rojo vivo y enfriada bruscamente con agua se transforma en una masa de granulos porosos de estructura vítrea con propiedades cementantes. Los cementos mezclados con escoria de alto horno se les puede añadir de un 20 a un 70% de este material. Otro material utilizado para producir estos cementos mezclados son las puzolanas, ya sean naturales o artificiales. Las puzolanas naturales son rocas de origen volcánico, como tobas y pumicitas, que tienen propiedades hidráulicas debido a su composición química y mineralógica. Estas puzolanas se pueden encontrar en Italia, la cordillera de los Andes, México, etc. Dentro de las puzolanas artificiales, las más representativas son las cenizas volantes que se generan como residuo de la combustión del carbón en las centrales termoeléctricas. Los cementos puzolánicos se les puede añadir de un 10 a un 30% de puzolanas o de cenizas volantes.<sup>63</sup>

La producción mundial en 1990 estaba dividida de la siguiente manera: el 34 % de la producción (390 millones de toneladas) se produjo en los países de la OECD, 38% (433 millones de toneladas) en Asia sin incluir a Japón, 16% (188 millones de toneladas) en los países con economías en transición, 7% (84 millones de toneladas) en Latinoamérica y 5% (55 millones de toneladas) en África.<sup>64</sup>

Los países analizados se agrupan en 3 bloques principales:

1. Países pertenecientes a la OECD que son: Bélgica (B), Dinamarca (D), Francia (F), Alemania (D), Irlanda (Ir), Luxemburgo (L), Holanda (Hol), Portugal (P), España (E), Gran Bretaña (GB) y Estados Unidos (EU).
2. Países con economías en transición (Europa Oriental): Bulgaria (Bul), Hungría (Hun), Polonia (Pol), Rep. Eslovaca (RS), Rusia (Ru).

<sup>62</sup> SEMIP, 1992, *op. cit.* Referencia 45

<sup>63</sup> Villaseñor, J. M., "Cementos producidos en México" en *Revista IMCYC*, México, enero, vol. 25, 1988, p. 4-12.

<sup>64</sup> Worrell, 1995, *op. cit.* Referencia 58

## Capítulo 2

3. Latinoamérica: Argentina (Ar), Brasil (Br), Colombia (Co), Costa Rica (CR), El Salvador (Sa), Guatemala (Gu), Honduras (Hon), México (Me) y Uruguay (Ur).

En la Tabla 2. 2, se muestran las características de la producción del cemento en los países analizados.

Analizando el primer bloque se observa que Estados Unidos es el principal productor de cemento de los países de la OECD, muy por debajo le siguen España, Alemania y Francia. Estos países, con Estados Unidos a la cabeza, son también los principales emisores de CO<sub>2</sub>. Esto indica que la eficiencia energética de la industria cementera en estos países no es buena. Países como Estados Unidos y Gran Bretaña pueden reducir su alto consumo específico, si la parte de su industria cementera que produce mediante vía húmeda se transforma a vía seca. Otra medida de ahorro de energía es la producción de cementos mezclados. Algunos países como Estados Unidos, Gran Bretaña y Alemania tienen la posibilidad de producir cementos de escoria de alto horno y cementos con ceniza volante ya que cuentan con una industria siderúrgica importante, y utilizan carbón para la generación de electricidad. Dinamarca e Irlanda también pueden aprovechar la ceniza volante generada en sus carboeléctricas para producir el tipo de cemento correspondiente. Es importante mencionar que la Asociación Europea de cemento (CEMBUREAU) estima que en Francia en 1990, el 20.1% del consumo calorífico en los hornos proviene de combustibles alternativos.<sup>65</sup>

Una medida para incrementar la fabricación y consumo de cementos mezclados es su normalización. Sólo 58 países en el mundo cuentan con legislaciones para estos tipos de cemento, los países restantes sólo permiten la producción de cemento Portland. En Luxemburgo, que es uno de los países con menor consumo específico, la producción de cementos Portland representa menos del 10% de la producción total.

Las características de los países con economías en transición deben interpretarse con cuidado, porque el proceso de cambio redujo drásticamente su capacidad productiva y esto aumentó el consumo específico de sus hornos. Rusia es el principal productor de cemento de este bloque, y también el mayor emisor de CO<sub>2</sub>. El consumo específico de Rusia y Polonia puede disminuir si se transforman las plantas que producen mediante proceso húmedo por plantas de proceso seco.

Por último, dentro de los países latinoamericanos Brasil es el principal productor de cemento del bloque, seguido por México. Sin embargo, las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo específico en México son mayores que en Brasil. En este bloque los países tienen varias limitaciones para mejorar su eficiencia energética y para fabricar cementos mezclados, ya que carecen de una industria siderúrgica sólida y la generación de electricidad se realiza principalmente en hidroeléctricas. Por otra parte, la mayoría de estos países no cuentan con normalización para la fabricación de cementos mezclados.

---

<sup>65</sup> CEMBUREAU, 1991. *op. cit.* Referencia 49

**Tabla 2. 2 Características de la producción del cemento en diversos países del mundo**

<b>País</b>	<b>Producción [kton]</b>	<b>Proporción clinker/ cemento</b>	<b>SECf [GJ/ton]</b>	<b>SECe [GJ/ton]</b>	<b>SECP [GJ/ton]</b>	<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> [Mton de C]</b>
Bélgica	6766	0.71	3.19	0.37	4.2	1.2
Dinamarca	1597	0.95	4.5	0.55	5.9	0.4
Francia	26827	0.78	3.25	0.39	4.3	5.1
Alemania	27700	0.83	2.75	0.4	3.8	5.5
Irlanda	1869	0.95	3.75	0.42	4.9	0.4
Luxemburg	582	0.5	1.79	0.3	2.6	0.1
Holanda	3479	0.27	1.48	0.22	2.1	0.3
Portugal	6743	0.9	2.98	0.38	4	1.4
España	28217	0.81	3.01	0.38	4	5.6
G. Bretaña	15764	0.97	4.03	0.44	5.2	4
E.U.A.	67714	0.94	4.33	0.52	5.7	17.6
Bulgaria	4900	0.87	5.7	0.4	6.7	1.4
Hungría	3900	0.82	4.2	0.4	5.3	0.8
Polonia	12482	0.82	5	0.4	6.1	3.3
R. Eslovaca	3780	0.74	3.4	0.5	4.7	0.8
Rusia	137300	0.72	6.3	0.4	7.3	34.9
Argentina	3580	0.9	3.86	0.46	5.1	0.8
Brasil	26030	0.79	3.29	0.45	4.5	5
Colombia	6180	0.82	4.8	0.44	6	1.5
Costa Rica	750	0.93	3.33	0.48	4.6	0.2
El Salvador	632	0.95	3.88	0.42	5	0.1
Guatemala	920	0.9	3.2	0.4	4.3	0.2
Honduras	580	0.85	3.65	0.47	4.9	0.1
México	23824	0.85	3.77	0.39	5.1	5.2
Uruguay	430	0.9	5.02	0.43	6.2	0.1

Nota: Los datos de los países que pertenecen a la OECF corresponden al año de 1989, excepto Alemania cuyos datos son de 1990. Los datos de los países con economías en transición son de 1990, y los datos de los países latinoamericanos son de 1988, excepto México cuyos datos son de 1990. Worrell (1995) consideró una eficiencia de generación de la electricidad del 38%, y un índice de emisión de 24.8 kg de C por GJ de combustible para todos los países. Para México, la eficiencia de generación es del 30%, y las emisiones se calcularon como se menciona en el anexo 1.

## Capítulo 2

Comparando las características de la industria cementera nacional con las condiciones óptimas que consideran la mejor tecnología disponible, se observa que esta rama industrial en México es eficiente. México dispone de una gran cantidad de puzolanas naturales; y tanto la fabricación como el empleo de los cementos puzolánicos cuentan con legislación, lo que ha permitido que se utilicen ampliamente en todo el país.

Tabla 2. 3 Características de México

Año	Producción [miles de ton]	Proporción clinker- cemento [%]	SECF [GJ/ton]	SECE [GJ/ton]	SECP [GJ/ton]	Emisiones de CO <sub>2</sub> [Mton de C]
1982	19298	85	4.775	0.458	6.303	4.899
1983	17086	85	4.715	0.489	6.348	4.410
1984	18436	85	4.699	0.520	6.433	4.878
1985	20680	85	4.813	0.506	6.5	5.497
1986	19751	85	4.408	0.504	6.089	5.149
1987	22347	85	4.025	0.431	5.463	5.572
1988	22513	85	4.2	0.481	5.804	5.776
1989	23333	85	3.616	0.423	5.027	5.629
1990	23824	85	3.786	0.393	5.097	5.732
1991	25092	n.d.	3.715	0.466	5.268	6.096
1992	26700	n.d.	3.773	0.448	5.266	6.468
1993	27140	n.d.	3.632	0.454	5.146	6.513
1994	29674	n.d.	3.304	0.467	4.861	6.967

Como se vió en los apartados anteriores, la Tabla 2. 3 muestra que en el periodo de 1982 a 1994, la producción de cemento aumentó considerablemente. El consumo específico de combustibles fósiles disminuyó, y en 1994 su valor es muy cercano al consumo que considera la mejor tecnología disponible. Lo que indica que el incremento de producción por la modernización y expansión de la industria cementera nacional ha sido muy eficiente. Por otro lado, el consumo específico de electricidad fluctuó entre 0.39 y 0.52 GJ por tonelada de cemento, esto significa que existe un potencial de ahorro de energía eléctrica si se mejoran los sistemas de molienda. A pesar de estas variaciones la demanda de energía primaria ha disminuido, es decir, la eficiencia del consumo de energía tanto en la fabricación del cemento como en la generación de electricidad ha aumentado. A partir de 1990, la participación de la nucleoelectrica Laguna Verde en la generación eléctrica hizo que el índice de emisión de CO<sub>2</sub> disminuya. Sin embargo, las emisiones aumentaron debido al incremento de la producción.

### Capítulo 3.

## Impacto ambiental del uso de la energía en la industria del cemento

La producción y uso de la energía contribuyen a la contaminación ambiental y a la emisión de gases invernadero.

Actualmente cerca del 90 % de la energía mundial utilizada para satisfacer diferentes necesidades se obtiene al quemar combustibles fósiles, principalmente carbón, petróleo y gas, lo que inevitablemente genera emisiones contaminantes.<sup>66</sup>

Los principales contaminantes generados en el proceso de combustión son: dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, monóxido de carbono CO, óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, óxidos de azufre SO<sub>x</sub>, hidrocarburos HC y partículas sólidas. Las emisiones de estos contaminantes producen los siguientes efectos negativos en la salud y en el medio ambiente:

**Tabla 3. 1 Efectos en la salud debidas a diversas emisiones contaminantes**

Contaminante	Efectos en la salud	Efectos al medio ambiente
CO	Muy peligroso. Al ser inhalado forma un compuesto estable con la hemoglobina, que al introducirse en el circuito sanguíneo reduce la cantidad de hemoglobina libre, por lo tanto la oxigenación del organismo. Provoca sueño, náuseas, vómito e incluso la muerte	Gases invernadero
NOx	Concentraciones altas en periodos prolongados afectan gravemente el sistema respiratorio	Gases invernadero
SO <sub>2</sub>	Irritaciones en las vías respiratorias, agudizan los problemas broncopulmonares y puede ocasionar la muerte	Reacciona con hidrocarburos y óxidos de nitrógeno presentes en el aire, y forma SO <sub>3</sub> que al combinarse con la humedad ambiental produce ácido sulfúrico; y cuando llueve es absorbido por el agua generando la lluvia ácida
Hidrocarburos	Efectos cancerígenos	Combinado con los óxidos de nitrógeno y luz ultravioleta forma el smog fotoquímico
Partículas	Problemas en las vías respiratorias	
CO <sub>2</sub>	Efectos secundarios	Principal gas que produce el efecto invernadero, al producirse en grandes cantidades y por su gran capacidad de absorber y emitir calor

<sup>66</sup>Kreft, W., "Ecological aspects of cement-Environmentally-oriented application of technology as a contribution to climatic protection" en *Zement-Kalk-Gips*, no. 5, mayo, 1990, p. 123-127

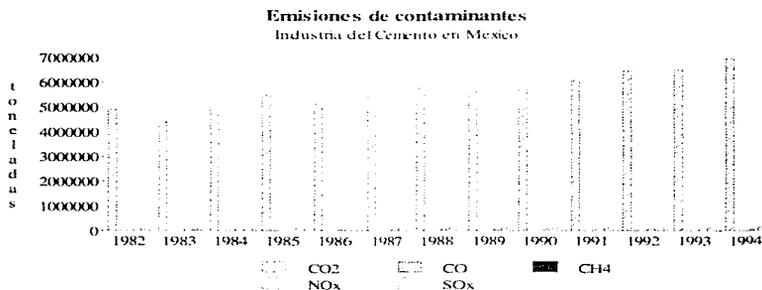
### Capítulo 3

Las emisiones típicas en los gases de combustión de un horno de cemento están compuestos principalmente por partículas, un 66% de nitrógeno, de un 18-24% de dióxido de carbono, un 7% de oxígeno, de un 3-9% de vapor de agua y de menos del 0.2% del conjunto de contaminantes como óxidos de nitrógeno, de azufre y monóxido de carbono.<sup>87</sup>

La Industria del Cemento en México, dentro de los 10 principales productores de cemento en el mundo, tiene una gran responsabilidad dentro del impacto ambiental local y global, por lo que se analizan las principales emisiones de esta rama industrial de 1982 a 1994. En este capítulo se explica como se produce cada contaminante en la fabricación del cemento, algunas medidas para reducir las emisiones, y se analiza las modificaciones en las gráficas de emisiones, en toneladas de contaminante y en toneladas de contaminante por valor agregado, debidas a los cambios energéticos realizados en esta rama industrial.

La Gráfica 3. 1 muestra las emisiones de contaminantes en miles de toneladas por contaminante.

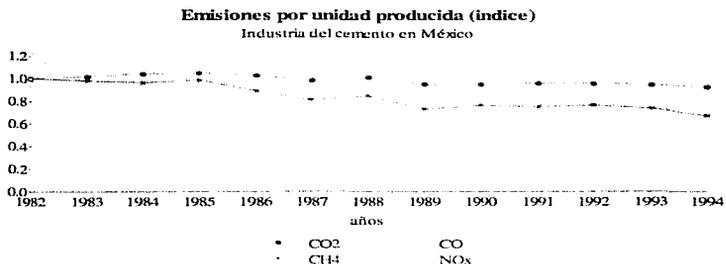
Gráfica 3. 1



La Gráfica 3. 2 muestra las variaciones de las emisiones específicas, que son las emisiones de contaminantes por unidad de valor agregado.

<sup>87</sup>Del compendio de ponencias del "Workshop of technology for energy recovery in cement kilns using alternative fuels", 1994

Gráfica 3. 2



Además de las emisiones generadas en el proceso de combustión, las plantas cementeras también generan una gran cantidad de emisiones de partículas sólidas a la atmósfera, que deterioran la calidad del ambiente. Los industriales del cemento se han preocupado por reducir estas emisiones instalando colectores de polvo en puntos estratégicos del proceso de fabricación. Por otro lado, el gobierno ha establecido ciertas regulaciones, primero la Ley de Mejoramiento Ambiental y el Reglamento de Humos y Polvos. A partir de esta ley se promulgó la Norma Oficial Mexicana NOM-040-ECOL-93 que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas, y los requisitos de control de emisiones fugitivas del proceso de fabricación del cemento. Por emisiones fugitivas, se refiere a la descarga de contaminantes a la atmósfera que no son canalizados por una chimenea.

### 3.1 Características de los principales combustibles fósiles utilizados en la industria del cemento

Los principales combustibles fósiles que se utilizan en el proceso de calcinación del cemento son: el carbón mineral, el combustóleo y el gas natural.

En México, debido a la escasez de carbón, se emplea preferentemente el combustóleo por su precio y disponibilidad, y en menor medida el gas natural. En Europa y Estados Unidos se utiliza el carbón.

Para poder evaluar las ventajas, desventajas, emisiones y potencialidad de sustitución de estos combustibles fósiles es necesario conocer sus principales características, que son:

*Estado físico:* si es sólido es importante conocer su tamaño, forma, molidurabilidad; si es líquido, su viscosidad a ciertas temperaturas para poder apreciar las posibilidades de bombeo y atomización en forma adecuada a cada tipo de quemador; si es gaseoso, su grado de impurezas y si es sólido-líquido, las proporciones de la mezcla.

### Capítulo 3

**Densidad:** se define como la relación entre la masa del combustible y el volumen que ocupa a una determinada temperatura y presión.

**Poder calorífico P.C.:** es la cantidad de calor liberado en la unidad de volumen o de peso en un combustible. Cabe notar que mientras mayor sea la densidad de un combustible, mayor es su masa por unidad de volumen, y por lo tanto, mayor es su poder calorífico por unidad de volumen. Esto es muy importante, ya que los combustibles se venden por unidad de volumen (galones).

**Análisis aproximado:** contenido de humedad, cenizas, volátiles, etc. La presencia de estas impurezas pueden causar trastornos en el equipo de combustión.

**Análisis esencial:** contenido de carbono C, hidrógeno H, oxígeno O, nitrógeno N y azufre S.

**Presencia de halógenos (cloro Cl, bromo Br y flúor F) y contenido de elementos tóxicos (Vanadio V, plomo Pb, zinc Zn, mercurio Hg, cadmio Cd, talio Tl, etc.):** para conocer qué tanto porcentaje de estos se introduce al clínker y qué porcentaje se emite a la atmósfera.

**Emissiones principales:** dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, monóxido de carbono CO, metano CH<sub>4</sub>, óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub> y óxidos de azufre SO<sub>x</sub>.

En la Tabla 3. 2 se describen las principales características de los combustibles fósiles que se utilizan en la industria del cemento.

Para quemar combustóleo en el horno rotatorio, se utiliza un quemador tubular que se proyecta coaxialmente al interior del horno en el extremo de descarga; el combustóleo necesita precalentarse a temperaturas de 100 a 120°C para reducir su viscosidad a niveles manejables. Por medio de una boquilla con diámetro reducido y diseño especial colocada en el extremo del quemador, el combustóleo es bombeado a alta presión y se atomiza al chocar con un chorro de aire también a presión en un tubo concéntrico al del combustóleo.<sup>68</sup>

En el caso de gas natural, la mezcla aire-combustible, se obtiene fácilmente sin requerir boquillas especiales, ni altas presiones, ni precalentamiento.

---

<sup>68</sup> Garmendia, J., "El uso de combustibles en la Industria Cementera Mexicana" en *Revista IMCYC*, vol. 25, no. 200, enero, 1988, p. 28-31.

Tabla 3. 2 Características de los principales combustibles fósiles

Combustible	Edo. Físico <sup>69</sup>	P.C. [MJ/kg] <sup>70</sup>	Análisis aprox.	Análisis esencial <sup>71</sup> [%]	Halógenos [ppm] <sup>72</sup>	Elem. tóxicos [ppm] <sup>73</sup>
Carbón mineral	Sólido (Bituminoso)	24-29	humedad 7%	C 63.9% H 3.6% S 4.6%	Cl 100- 2800 F 50-370 Br 7-11	Zn 16-220 Cr 5-80 Ni 20-80 Pb 11-270 As 9-50 Cd 0.1-10 Tl 0.2-4 V 30-50
	Sólido (Lignítico)	16-21	cenizas 25%	N 1.8% O 0.9%	Cl 1000- 1300	Zn 1-70 Cr 0.9-8 Ni 0.6-1.9 Pb 0.8-6 As 0.3-9 Cd 0.1-2.4 Tl 0.07-0.3 V 2-7
Combustóleo	Líquido Viscosidad:500 SSF a 122°F <sup>74</sup>	39.6- 40.6	cenizas 0.1%	C 86% H 10.3% S 3.7% N 0% O 0%	Cl < 10 F 10-20	Zn 5-85 Cr 2-4 Ni 5-43 Pb 1-34 As<0.01-0.1 Cd 0.02-0.4 Tl<0.02-0.1 V 2-117
Gas natural	Gaseoso Proporción de metano 95%	51.6	cenizas 0%	C 75.4% H 23.4% S 0.1% N 1.1% O 0%		

<sup>69</sup> "Criterios de selección de combustibles para el horno cementero" en *Combustión & clinkerización*, no. 1. P. 4-7.

<sup>70</sup> Da Silva, J., et. al. "Consideration about the use of secondary fuels in Cement Plants" en *Third International conference of waste management in the chemical and petrochemical industries*, octubre, Brasil, 1993, p. 4-8 y *Combustión & clinkerización. op. cit.* Referencia 69

<sup>71</sup> Da Silva, J., et. al. 1993, *op. cit.* Referencia 70

<sup>72</sup> Datos del compendio de ponencias del "Workshop of Technology for energy recovery in cement kilns using alternative fuels", México, D.F., 1994

<sup>73</sup> *Combustión & clinkerización. op. cit.* Referencia 69

<sup>74</sup> La viscosidad se expresa en unidades prácticas: Segundos Saybolt Universal (SSU) a 100 °F para combustibles livianos, y Segundos Saybolt Furol (SSF) a 122 °F para combustibles pesados; los cuáles se miden en viscosímetros que registran el tiempo que se demora un volumen determinado en pasar a través de un capilar de características estandarizadas.

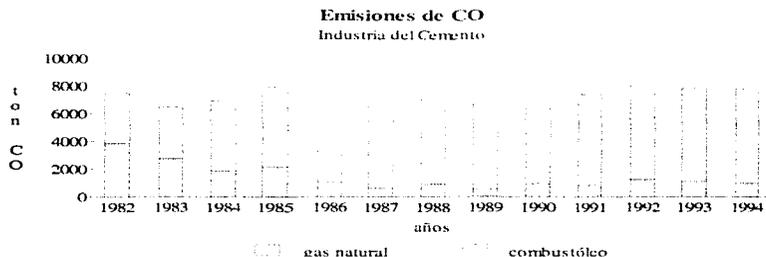
### 3.2 Emisiones de Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono es letal para el ser humano, ya que al ser inhalado forma con la hemoglobina de la sangre un compuesto estable que se queda en el circuito sanguíneo; lo que provoca una disminución de hemoglobina libre, y por lo tanto reduce la oxigenación del organismo.”

La presencia de estas emisiones es un indicador de combustión incompleta ya sea por deficiencia de aire o por una mezcla deficiente entre aire y combustible. En presencia de oxígeno, automáticamente se forma CO<sub>2</sub>, por lo que el nivel de contaminación y riesgo se limita a las zonas cercanas a los puntos de emisión. Dentro del horno, cuya atmósfera es altamente oxidante, puede producir explosiones por lo que se monitorea continuamente para evitar su presencia.

Como se puede observar en la Gráfica 3. 3, el nivel de emisiones de monóxido de carbono de la industria cementera debido al consumo de energía no ha aumentado en los últimos años a pesar del incremento de la producción. Las emisiones de CO por unidad producida han disminuido de 0.387 kg de CO/kg clínker en 1982 a 0.262 kg de CO/kg clínker en 1994, como resultado de una mayor eficiencia en el equipo de combustión y un adecuado monitoreo y control de emisiones.

Gráfica 3. 3



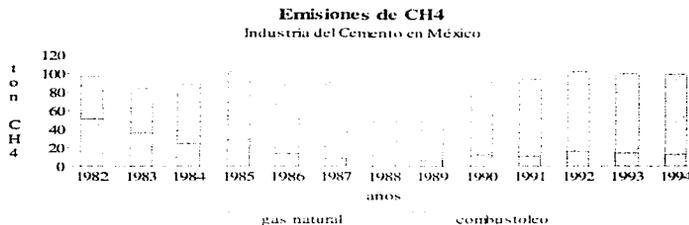
### 3.3 Emisiones de metano (CH<sub>4</sub>)

El metano, al igual que el monóxido de carbono, se produce en las combustiones incompletas si las condiciones de quemado son inadecuadas como la distribución de combustible, la temperatura, la cantidad de oxígeno, etc. Se obtiene a partir de monóxido de carbono e hidrógeno. Su presencia es indeseable debido a que combinado con óxidos de nitrógeno y luz ultravioleta, forma el esmog fotoquímico.

<sup>75</sup> Castillo, P., *Ahorro de energía en la operación de calderas industriales*, Perú, p. 176

Las cantidades de metano producidas por la Industria del Cemento son muy reducidas, como se puede observar en la Gráfica 3.4.

**Gráfica 3.4**



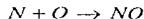
Las emisiones específicas de CH<sub>4</sub> han disminuido de 0.005 g de CH<sub>4</sub> /kg clínker en 1982 a 0.003 g de CH<sub>4</sub>/kg. clínker en 1994. Las emisiones específicas de CH<sub>4</sub> varían de manera muy similar al CO, como se muestra en la gráfica 2, por lo que al instalar equipos de combustión más eficientes también se reducen las emisiones de CH<sub>4</sub> por unidad de valor agregado.

### 3.4 Emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

Los óxidos de nitrógeno son producidos durante el proceso de combustión por la combinación del nitrógeno atmosférico con oxígeno, y también al combinarse el nitrógeno contenido en los combustibles. Están constituidos en un 90% por monóxido de nitrógeno (NO) y en menos de un 10% por dióxido de carbono (NO<sub>2</sub>).<sup>76</sup>

El NO denominado térmico, se forma a temperaturas mayores a 1200 °C al reaccionar el nitrógeno del aire con el oxígeno cerca de la flama en la zona de combustión del horno. Los factores que determinan la concentración de NO térmico son: la temperatura y forma de la flama, el exceso de aire, y los tiempos de residencia de los gases y del material.

La formación del NO a partir del nitrógeno del combustible se genera en el sistema de combustión secundaria, en los precalentadores y precalcinadores a temperaturas menores de 900 °C. La concentración de NO combustible depende del contenido de nitrógeno en el combustible. Una parte del nitrógeno reacciona con el oxígeno del aire



<sup>76</sup> Kreft, 1990, op. cit. Referencia 66

### Capítulo 3

mientras otra parte del nitrógeno del combustible reacciona con los gases de salida del horno que contienen óxidos de nitrógeno:



La concentración de NO combustible también depende de la temperatura de la zona de combustión secundaria. A mayor temperatura reacciona más rápidamente el nitrógeno del combustible con los óxidos de nitrógeno de los gases, que con el oxígeno.<sup>77</sup>

Al comparar las emisiones de NO<sub>x</sub> en distintos tipos de hornos, se observó que en los hornos largos vía seca las emisiones dependen exclusivamente de las condiciones en la zona de combustión primaria; los gases al salir de esta zona disminuyen rápidamente su temperatura a un nivel en el que la descomposición de los óxidos de nitrógeno es muy lenta.<sup>78</sup> El volumen total de las emisiones en los hornos con precalcinador son menores a los hornos largos; los gases del horno se mezclan con aire terciario proveniente del enfriador y reaccionan con el nitrógeno del combustible propiciando la formación y descomposición de los óxidos de nitrógeno.

Las emisiones de los óxidos de nitrógeno pueden reducirse con las siguientes medidas:

i) Instalación de un sistema de control automático del horno.

Es importante mantener constantes las condiciones de combustión del horno. Los óxidos de nitrógeno pueden ser monitoreados y medidos en tiempo real, lo que permite tomar acciones que mantengan esta variable dentro de un intervalo adecuado. Esta medida garantiza una reducción del 10 al 20% de las emisiones.<sup>79</sup>

ii) Instalación de quemadores de bajo NO<sub>2</sub> en los hornos.

El principio de estos quemadores es que la mayor parte de la combustión primaria se lleve a cabo en una zona de baja concentración de oxígeno para reducir la generación del NO. También se debe evitar que algunas partículas del combustible dejen la periferia de la flama principal y se quemen con exceso de aire secundario caliente. Las emisiones de óxidos de nitrógeno pueden reducirse hasta un 20%.<sup>80</sup>

iii) Uso de combustión escalonada.

Este método es utilizado en los hornos con precalcinador. La capacidad del precalcinador se divide en dos secciones. En la sección inferior, los gases de salida del horno se mezclan con parte del aire terciario en una zona reductora, es decir, con baja proporción de aire. Se introduce combustible en el precalcinador, pero éste no se quema completamente y genera una alta proporción de hidrocarburos y monóxido de carbono

<sup>77</sup> Nielsen, P. y Ove Jepsen, "The formation of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> in various pyroprocessing systems" en *World Cement*, E.U.A., diciembre, 1990, p. 528-536

<sup>78</sup> Da Silva, J., et. al., "Emission and control of pollutants in the cement industry", en *Third International Conference on waste management in the chemical and petrochemical industries*, octubre, 1993, Brasil, p. 365

<sup>79</sup> *Ibid*

<sup>80</sup> *Ibid*

de aire que permita completar la combustión del combustible. El grado de reducción del emisiones es de hasta un 40%."

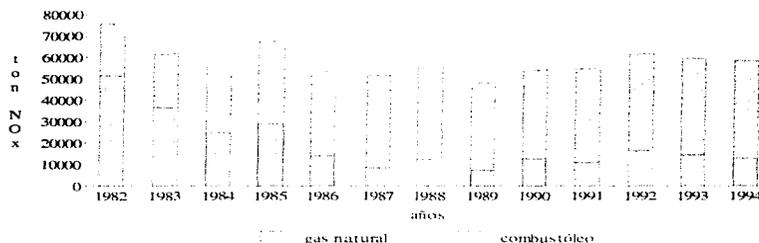
iv) Introducción de amonía ( $\text{NH}_3$ ) en el horno.

Este proceso consiste en introducir amonía en forma de sales puras o diluidas en agua al flujo de gases. Generalmente se introduce al precalentador en una zona donde la temperatura se encuentre entre 800 y 1200 °C, en la cuál los óxidos de nitrógeno vuelven a descomponerse en oxígeno y nitrógeno. Es posible disminuir la concentración de estos óxidos hasta un 80% dependiendo de la proporción molar  $\text{NH}_3/\text{NO}$  y la posición de la harina cruda (materia prima) en el precalentador.

La Gráfica 3. 5 muestra que las emisiones de óxidos de nitrógeno de la industria cementera mexicana, en toneladas de  $\text{NO}_x$ , se comportan de manera similar al consumo energético (Gráfica 2.1). En los años de mayor consumo energético como son 1982, 1985 y 1988, las emisiones de  $\text{NO}_x$  fueron altas; en 1989 tanto el consumo como las emisiones fueron reducidas, y a partir de 1982 a 1994, ambos disminuyeron.

Gráfica 3. 5

Emissiones de  $\text{NO}_x$   
Industria del Cemento en México



Por otra parte, las emisiones específicas de los óxidos de nitrógeno, emisiones de contaminante por unidad de valor agregado, justifican que la Industria del Cemento en México ha incrementado eficientemente su producción sin aumentar la emisión de este contaminante, como se muestra en la Gráfica 3. 6.

Las emisiones específicas de los óxidos de nitrógeno han disminuido de 3.922 g  $\text{NO}_x/\text{kg}$  clínker en 1982 a 1.971 g  $\text{NO}_x/\text{kg}$  clínker en 1994. Este importante descenso se debe principalmente a la sustitución del gas natural por combustóleo como combustible principal. En 1982, el consumo de gas natural representó un 46% del consumo energético

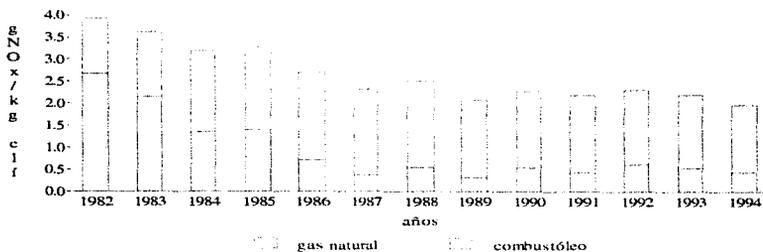
<sup>11</sup> Krefl, 1990, *op. cit.*, Referencia 66

### Capítulo 3

total de la rama; mientras que en 1994, únicamente se consumió un 10.5% de gas natural. Desde el punto de vista ambiental, esta sustitución ha sido benéfica, ya que el combustóleo tiene menos emisiones de óxidos de nitrógeno por energía consumida que el gas natural.

**Gráfica 3. 6**

**Emisiones específicas de NOx**  
Industria del cemento en México



**Tabla 3. 3 Factores de emisión para óxidos de nitrógeno**

Combustible	Factor de emisión [kg de NOx/TJ de combustible]
Gas natural	1111
Combustóleo	527

El combustóleo no contiene nitrógeno dentro de su composición química, mientras que el gas natural contiene por lo menos 1.1% de nitrógeno.

De acuerdo a la norma AP-42 de Estados Unidos establece que el factor de emisión de óxidos de nitrógeno, en términos de libras de NO<sub>2</sub> por tonelada corta de clinker, es de 2.8 lb. NO<sub>2</sub>/ton. corta clinker que en el sistema internacional equivale a 1.4 g NO<sub>2</sub>/kg. clinker. En cambio, las regulaciones alemanas son menos estrictas. Establecen que las emisiones de NO<sub>2</sub> de hornos con precalentador y precalcinador no deben ser mayores a 3.6 g NO<sub>2</sub>/kg clinker si los gases del horno entran directamente al precalcinador y se denominan sistemas en línea con el calcinador (ILC), ni mayores a 2.75 g NO<sub>2</sub>/kg. clinker si entran indirectamente al calcinador, denominados sistemas en línea separada al calcinador (SLC).

Actualmente las emisiones específicas de la Industria Cementera Mexicana son de 1.971 g NOx/kg. clinker, este valor está por debajo de las regulaciones alemanas.

### 3.5 Emisiones de óxidos de azufre (SOx)

Dentro de los compuestos gaseosos del azufre que emite la industria del cemento, más del 99% está formado por bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

El azufre se introduce al proceso a través de la materia prima y los combustibles en forma de sulfuros, sulfatos y compuestos orgánicos de azufre.

Los factores más importantes que influyen en la cantidad de óxido de azufre en los gases de salida son: la cantidad de sulfuros en la materia prima, el balance químico entre azufre y álcalis, las condiciones de combustión, el uso de gases del horno para secado, y el tipo de sistema del horno.

En las diferentes etapas del proceso, se genera y se absorbe el SO<sub>2</sub>, dependiendo de la temperatura, el contenido de cal libre y el exceso de aire.

En la zona de combustión, todo el azufre contenido en el combustible es oxidado y forma SO<sub>2</sub>; los sulfatos, ya sea por formación o por disociación, también generan SO<sub>2</sub> durante la clinkerización. Por otra parte, los álcalis en forma de óxidos de sodio (Na<sub>2</sub>O) y óxidos de potasio (K<sub>2</sub>O), y las cenizas del combustible reaccionan con el oxígeno, absorben SO<sub>2</sub> y forman sulfatos. Otro porcentaje de SO<sub>2</sub> reacciona con la cal libre y produce sulfato de calcio. Estos sulfatos se incorporan al clinker, modificando su calidad y características.<sup>82</sup>

Formación	Absorción
$S_{\text{combustible}} + O_2 \longrightarrow SO_2$	$Na_2O + SO_2 + 1/2 O_2 \longrightarrow Na_2SO_4$
sulfatos $\longrightarrow$ óxidos + SO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	$K_2O + SO_2 + 1/2 O_2 \longrightarrow K_2SO_4$
	$CaO + SO_2 + 1/2 O_2 \longrightarrow CaSO_4$

En la zona de calcinación en los hornos con precalcinadores, la mezcla de los gases del horno con la harina cruda permite la absorción de SO<sub>2</sub>. Mientras que la formación es debida tanto a la oxidación del azufre al quemar combustible en el precalcinador como por la reacción del CaSO<sub>4</sub> en presencia de carbono a temperaturas entre 900 y 1000 °C.

Formación	Absorción
$S_{\text{combustible}} + O_2 \longrightarrow SO_2$	$CaO + SO_2 \longrightarrow CaSO_3$
$4CaSO_4 + 2C \longrightarrow 4CaO + 4SO_2 + 2CO_2$	$CaSO_3 + 1/2 O_2 \longrightarrow CaSO_4$

En la zona de precalentamiento, se presentan ambas reacciones: la formación de SO<sub>2</sub> a partir de la oxidación de los sulfuros contenidos en la materia prima como la absorción de SO<sub>2</sub> por la caliza. Si las materias primas contienen compuestos de azufre

<sup>82</sup> Da Silva, 1993, *op. cit.* Referencia 78

### Capítulo 3

orgánico o piritita, la generación de  $\text{SO}_2$  ocurre entre los 450 y 600 °C. La absorción de  $\text{SO}_2$  en esta zona es limitada debido a que existe poca caliza, por lo que la mayor parte del  $\text{SO}_2$  que se genera es emitido en los gases de salida del horno.

Formación	Absorción
$\text{sulfuros} + \text{O}_2 \rightarrow \text{óxidos} + \text{SO}_2$	$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$
$\text{S}_{\text{orgánico}} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	

Si se aprovechan los gases del horno para el secado y la molienda de materia prima, la absorción del  $\text{SO}_2$  puede ser del 40 a casi el 100%, dependiendo de la entrada total de azufre al sistema de molienda.



Comparando los diferentes tipos de horno, las emisiones específicas totales de los hornos con precalentador y precalciner son menores a los hornos largos vía seca, ya que al tener mayor contacto entre el material y los gases, absorben mayores cantidades de  $\text{SO}_2$ .

La incorporación de los compuestos de azufre en el clínker por la absorción de  $\text{SO}_2$ , además de reducir emisiones pueden disminuir el consumo de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) en la molienda.

Algunas medidas que se pueden tomar para reducir las emisiones de  $\text{SO}_2$  son:

- i) Cambio de combustibles con menor contenido de azufre o quemar parcialmente combustibles de desecho en el horno.
- ii) Instalar una planta desulfuradora del gas

Consta de un intercambiador térmico para los gases de salida del horno que aprovecha el contenido de vapor de agua de los gases del horno para producir calefacción a distancia, torres absorbedoras donde el  $\text{SO}_2$  se combina con otros compuestos para formar yeso y además se produce agua excedente. Estas instalaciones son muy eficientes, pero también muy costosas.

- iii) Introducir aditivos como la caliza hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), como absorbente de  $\text{SO}_2$ , en el rango de temperaturas donde éste se genera.

En México, los combustibles utilizados en los hornos de clínker son el combustóleo y el gas natural. El más utilizado es el combustóleo, el cuál está compuesto en un 3.7% de azufre mientras que el gas natural sólo tiene un 0.1% de este elemento. Esto se ve reflejado en los índices de emisión, que es de 1358.6 kg  $\text{SO}_2$ /TJ para combustóleo, en contraste con 0.213 kg  $\text{SO}_2$ /TJ para el gas natural.<sup>83</sup>

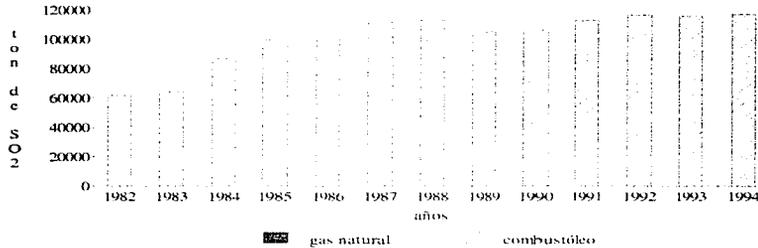
En la Gráfica 3. 7 se muestran las emisiones de  $\text{SO}_2$  de la Industria del Cemento en México. Se observa que la contribución del gas natural es despreciable. Las emisiones

<sup>83</sup> Eberhardt, Claudio, *Reglamentación anticontaminante en la Industria del Cemento*, en 4a. asamblea general FICEM, Chile, 1992, p. 3-12.

de este contaminante han aumentado en un 89% de 1982 a 1994, comportándose de manera similar al consumo de combustóleo (Gráfica 2.1).

Gráfica 3. 7

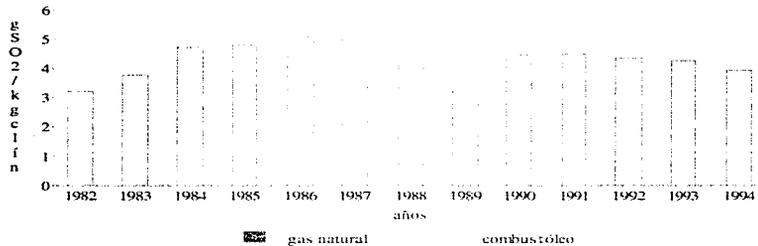
**Emisiones de SO<sub>2</sub>**  
Industria del Cemento en México



Las emisiones específicas del SO<sub>2</sub>, presentadas en la Gráfica 3. 8, muestran que éstas aumentaron de 1982 a 1987 y, a pesar del incremento en el consumo de combustóleo, descendieron de 1987 a 1994. Esto implica que las mejoras tecnológicas en el proceso han contribuido a incrementar la producción de cemento sin emitir tanto SO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Gráfica 3. 8

**Emisiones específicas de SO<sub>2</sub>**  
Industria del Cemento en México



Los estándares alemanes para las emisiones de SO<sub>2</sub> son muy exigentes, y van desde 0.7 gramos de SO<sub>2</sub> por kilogramo de clínker para hornos con sistemas de precalcinadores de operación directa (ILC) hasta 1.7 g. de SO<sub>2</sub>/kg clínker para hornos ineficientes de vía húmeda. En cambio, las normas estadounidenses AP-42 para un horno

### Capítulo 3

que queme carbón con bajo contenido de azufre establecen un límite de 5.4 g SO<sub>2</sub>/kg. clinker. En México, las emisiones de SO<sub>2</sub> de la industria cementera en 1994 son de 3.95 g SO<sub>2</sub>/kg clinker, cumpliendo con las regulaciones de Estados Unidos.

#### 3.5 Emisión de partículas

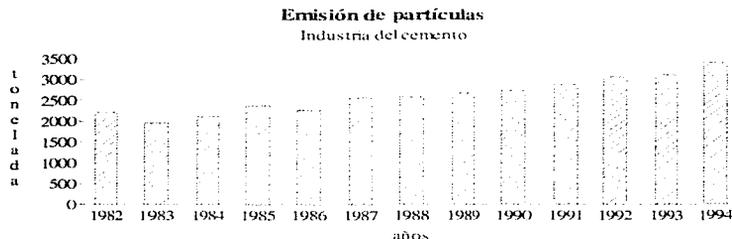
En las plantas de cemento el mayor problema relacionado con el medio ambiente es la emisión de partículas. El polvo generado durante el proceso llevan consigo materias primas no calcinadas, pequeñas cantidades parcialmente calcinadas y clinker de cemento. Estos materiales se llaman en conjunto polvo de horno del cemento (CKD), y son perjudiciales al ambiente de acuerdo al tamaño de sus partículas: las más finas son peligrosas para las vías respiratorias del ser humano, y las más gruesas ocasionan inconvenientes para las plantas y sus alrededores.

Las fuentes de emisión de partículas dentro del proceso de fabricación son:

- En los hornos y enfriadores de clinker donde las partículas son arrastradas por los gases de combustión hacia la atmósfera.
- En la extracción de la materia prima en las canteras, en la trituración, la molienda, transportación y almacenamiento de materia prima, clinker y cemento, a estas emisiones se les conoce como emisiones fugitivas.

El factor de emisión para la manufactura del cemento, sin control, es de 115 kg. de polvo por tonelada de cemento.<sup>84</sup> En la Gráfica 3. 9, se observan las emisiones de partículas debidas a la producción de cemento, sin equipo recolector de polvos.

Gráfica 3. 9



Para reducir las emisiones de partículas antes de que los gases de combustión sean emitidos a la atmósfera, éstos pasan a través de equipos recolectores de polvo cuyas principales características son:

<sup>84</sup> Millán, Judith E., *Análisis de la industria del cemento y su problemática ambiental*. Tesis de licenciatura. UNAM, 1994

**Tabla 3. 4 Características de los equipos recolectores de polvo en la industria cementera**

Equipo Recolector	Principio de operación	Eficiencia	Usos	Costo
Cámaras de sedimentación	Se disminuye la velocidad del caudal gaseoso para que las partículas se asienten por acción de la gravedad	Muy Baja	Como separador previo para partículas grandes delante de recolectores más eficientes	Bajo
Filtro de mangas	Consta de una cámara metálica que aloja en su interior una serie de mangas tubulares de tejido natural o sintético, suspendidas verticalmente. Los gases cargados de partículas pasan a través del medio poroso (tejido del filtro) y depositan las partículas en los huecos	99.5%	En los hornos, en la molienda	Elevado
Filtro de lecho de grava	Combina un separador de ciclón para depositar partículas más gruesas, y con una cama de grava retiene las partículas más pequeñas.	99.9%	Depura en aire de los enfriadores de clínker, particularmente los de gran tamaño	
Ciclones centrífugos	La fuerza centrífuga hace que las partículas sólidas se depositen en las paredes del ciclón, y posteriormente por acción de la gravedad, y por el torbellino creado por el ciclón se desplacen hacia abajo.	Inversamente proporcional a su diámetro	Recolección de polvo en la trituración de la materia prima, molienda, y antes de un filtro electrostático después del enfriador de clínker	Baja

Tabla 3.4 Continuación

Equipo Recolector	Principio de operación	Eficiencia	Usos	Costo
Filtros electrostáticos	Se basa en el efecto de ionización de los gases en un campo eléctrico intenso, formado entre los electrodos emisores (negativos) conectados al polo negativo de un rectificador de alta tensión y los electrodos de precipitación (positivos) conectados a tierra. Bajo la influencia de la intensidad del campo eléctrico, se ioniza el gas. Si el gas contiene partículas sólidas entonces los electrones ceden su carga a estas partículas y se desplazan hacia el electrodo positivo. Al llegar al electrodo, las partículas se descargan y se quedan pegadas en la placa hasta que se forme una capa de polvo con espesor conveniente para que sea eliminada por vibraciones de corta duración y caen en una cámara recolectora	99.9%	Principalmente en los hornos	Muy elevado (inicial, operación y mantenimiento)

Del equipo recolector de polvo instalado en la industria cementera mexicana en 1988, el 75% eran filtros de mangas, el 13.42% eran filtros electrostáticos, 9.3% eran ciclones, 0.94% eran cámaras de sedimentación, y 0.47% eran filtros de lecho de grava<sup>85</sup>. La industria cementera mexicana invierte el 15% del costo total de las nuevas plantas y de la ampliación de las ya existentes en equipo anticontaminante.<sup>86</sup> Principalmente se están equipando con filtros electrostáticos que son los más adecuados para cumplir con las más estrictas normas de emisión, y que cada día mejoran su eficiencia.

El polvo recolectado de los filtros electrostáticos o de mangas puede ser reincorporado al proceso de fabricación, siempre y cuando las características fisico-químicas del polvo no deterioren la calidad del clinker, ni la operación del sistema. El polvo residual, que ya no puede ser reciclado, se convierte en un subproducto cuyo uso final debe ser elegido cuidadosamente. Se puede utilizar como relleno de suelos, vigilando que el contenido de metales y otros componentes no afecten el manto freático del subsuelo. También se emplea como fertilizante, en el tratamiento de desechos municipales, como endulzador de suelos y como agente estabilizador para terrenos.

<sup>85</sup> Millán, 1994. *op. cit.* Referencia 84

<sup>86</sup> Arredondo, 1988, *op. cit.*, Referencia 15

## Impacto ambiental

De todos los contaminantes antes mencionados, la legislación Ambiental Mexicana se preocupa principalmente por la emisión de partículas. La reglamentación está establecida en la norma NOM-040-ECOL-1993, basada en las regulaciones impuestas por el organismo EPA (Asociación de protección al ambiente) de los Estados Unidos.

Esta norma establece lo siguientes niveles máximos de emisión de partículas:

- Para el proceso de calcinación, que se refiere a las operaciones conjuntas realizadas en el precalentador, precalcinador y en los hornos rotatorios. Se basa en la alimentación al horno en toneladas de harina cruda por hora. Si la alimentación es menor a 300 ton/hora, la emisión de partículas no debe exceder a  $0.6319 \cdot C^{0.7502}$  kg de partículas por hora, donde C es la cantidad alimentada al horno en ton/hora. Si la alimentación al horno es mayor o igual a 300 ton/hora, el límite máximo de emisiones es de  $0.15 \cdot C$  kg. de partículas por hora.
- Para las operaciones de trituración, molienda y enfriamiento de clinker establece los siguientes requisitos de control de emisiones fugitivas:

**Tabla 3.5 Límites para emisiones fugitivas**

<b>Operación</b>	<b>Partículas [mg/ m<sup>3</sup> N]</b>
Trituración	80
Molienda de materias primas sin secador integrado	80
Molienda de materias primas con secador integrado	380
Molienda del cemento	80
Enfriamiento del clinker	150
<b>Opacidad:</b>	
Hornos	20%
Otras operaciones	15%

Fuente: Cuarta Asamblea General FICEM, 1992 (Hedeager).

A continuación se muestran las legislaciones de otros países respecto a la emisión de partículas.

**Tabla 3.6 Límites de emisión de partículas para diversos países**

	Estados Unidos [mg/m <sup>3</sup> N]	CEE [mg/m <sup>3</sup> N]	Japón [mg/m <sup>3</sup> N]	Venezuela [mg/m <sup>3</sup> N]	España [mg/m <sup>3</sup> N]
Hornos	120	100	50-100	250	150
Enfriador de clinker	40	100	50-100	100	50
Molinos de cemento	45	75	50-100	250	150

Fuente: Cuarta Asamblea General FICEM, 1992. Existen países con reglas más estrictas, como Alemania que establece como límite máximo en la emisión de hornos 30 mg/m<sup>3</sup> N. Japón determina la emisión permitida de acuerdo a la ubicación de la planta. El valor general es de 10 mg por m<sup>3</sup> N con 10% de oxígeno, pero si la planta se encuentra cerca de una concentración urbana, el valor es de 50 mg por m<sup>3</sup> N con 10% de oxígeno.

La norma mexicana establece los siguientes requisitos par el control de las emisiones fugitivas:

- Colocar casetas, mamparas o cobertizos en los lugares de descarga de la materia prima, en los lugares donde se apilen materiales o realizar los almacenamientos en tolvas, y en los lugares donde se efectúe la carga a granel del producto o instalar equipo de control.
- Colocar equipos de control en los silos de almacenamiento, y en todas aquellas operaciones que presenten emisiones fugitivas.
- Confinar los transportadores de bandas e instalar equipo de control en los puntos de transferencia de materiales.

## **Capítulo 4.**

### **Perspectivas del uso eficiente de la energía en la Industria del Cemento**

En 1994 la Industria Nacional del Cemento produjo 29.7 millones de toneladas de cemento y la energía necesaria para producir esta cantidad fue de 111.900 TJ en combustibles y electricidad. Consumió cerca de 2,058.2 millones de litros de combustóleo (86,344 TJ) y al quemarlo emitió 1.84 millones de toneladas de carbono y otros contaminantes.

El consumo de energéticos en la industria del cemento representa alrededor del 45% del costo total de producción (30% los combustibles y 15% la electricidad).<sup>87</sup> Para reducir el consumo de energéticos no renovables y sus emisiones resultantes, la Industria del Cemento en México ha tomado dos estrategias importantes:

1. La sustitución parcial del clinker por materiales con propiedades cementantes. Esta medida reduce la cantidad de clinker necesario para producir cemento, por lo tanto, se requiere menos combustibles y disminuyen las emisiones.
2. La sustitución parcial de combustibles por materiales de desecho para recuperar energía.

La aplicación de estas medidas en cualquier planta en funcionamiento representa un potencial permanente de ahorro de energía y reducción de contaminantes. Este capítulo presenta una información general de cómo la Industria Nacional del cemento ha utilizado estas estrategias y cuál ha sido el ahorro de energía resultante.

#### **4.1 Ahorro de energía y reducción de emisiones debidas a la producción de cementos mezclados**

Los cementos mezclados o extendidos son aquellos que sustituyen parte del clinker por materiales activos, como son las puzolanas naturales o artificiales, escorias granuladas de alto horno, cenizas volantes, etc. La característica de estos materiales es que al ser finamente molidos, y en presencia de humedad reaccionan químicamente y forman compuestos con propiedades cementantes.

De los cementos mezclados existentes, la industria del cemento en México produce exclusivamente cementos puzolánicos, ya que México cuenta con una gran cantidad de puzolanas naturales de origen volcánico, principalmente tobas y pumicitas. Los cementos portland de escoria de alto horno casi no se fabrican debido a la baja producción de escoria granulada de la industria siderúrgica mexicana; ni tampoco los cementos con cenizas volantes, ya que éstas se generan como residuo de la combustión del carbón en centrales termoeléctricas. Estos tipos de cementos se producen en grandes cantidades en países con

---

<sup>87</sup> Salomón, 1995, *op. cit.* Referencia 3

## Capítulo 4

numerosos yacimientos de carbón natural. México tiene una escasa reserva de este combustible, por lo que la producción de estos cementos son casi nulos.<sup>88</sup>

Desde el punto de vista energético y ambiental, la fabricación de los cementos mezclados permiten producir una mayor cantidad de cemento con la misma cantidad de clinker, y reducir el consumo de combustibles y las emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada producida.

En México, los cementos puzolánicos se comenzaron a producir desde la década de los cuarentas o cincuentas en una planta de Sinaloa para construir presas hidroeléctricas en la zona noroeste del país. A partir de entonces, tanto la producción como el empleo de los cementos puzolánicos han aumentado y su uso se ha expandido por todo el país. En 1978, la producción de cemento estaba constituida en un 79% de cemento Portland gris, y un 19% de cementos puzolánicos. Para 1990, se estimó que la producción de cementos puzolánicos fue de 42% y la de cemento Portland gris fue del 58%.<sup>89</sup>

Este cambio en la composición de la producción nacional tiene implicaciones en la reducción de la intensidad energética de esta rama industrial. Para cuantificar el ahorro de energía que representa este cambio es necesario conocer la proporción de clinker, de yeso y de puzolanas en el cemento, a esta relación se le denomina factor de utilización.

Cuando se tiene exclusivamente clinker el factor de utilización es de 1; el cemento Portland gris que está constituido de un 93% de clinker y un 7% de yeso tiene un factor de utilización de 0.93. El contenido de puzolanas en el cemento Portland puzolánico varía entre el 10 y el 30% de acuerdo a las características requeridas por el fabricante.<sup>90</sup> Considerando que para fabricar cementos puzolánicos se le añade al clinker alrededor de un 5% de yeso y un 10% de puzolanas, el factor de utilización de este tipo de cemento es de 0.85.

Al fabricar cemento Portland a partir del clinker, tomando en cuenta los factores de utilización mencionados, el consumo específico de energía se reduce un 7%. Si se fabrica cementos puzolánicos a partir del clinker, se ahorra un 15%. Como en los capítulos anteriores el consumo específico fue calculado para la fabricación de cemento Portland gris, para estimar la disminución se considera que al producir cementos puzolánicos se ahorra un 8%.

Para calcular la variación de la intensidad energética se tomaron en cuenta tanto los porcentajes de los cementos Portland como de los cementos puzolánicos en la producción nacional, y el ahorro de energía estimado debido a la fabricación de estos últimos (8%).

Variación de la intensidad energética = (% de Cem. Portland)(1) + (% de Cem. Puzolánicos)(0.92)

De 1978 a 1982 la participación de los cementos puzolánicos en la producción nacional de cemento se incrementó considerablemente, en ese periodo la disminución de la intensidad energética también es pronunciada como se observa en la Gráfica 5. 1. Entre 1982 y 1987 el porcentaje de los cementos puzolánicos varió alrededor del 35% y de

<sup>88</sup> Villaseñor, 1988, *op. cit.* Referencia 63

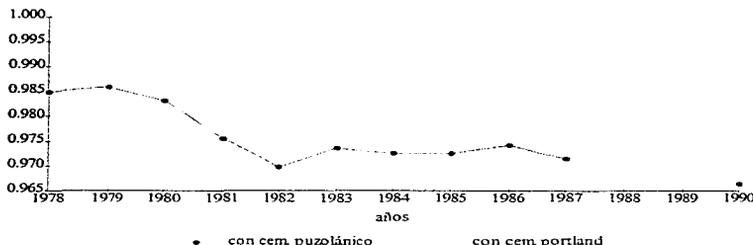
<sup>89</sup> SEMIP, 1992, *op. cit.* Referencia 45

<sup>90</sup> NOM-C2-1986.

manera análoga se comporta la reducción de la intensidad energética. A partir de 1987 hasta 1990 se estima que la producción de cementos puzolánicos creció hasta alcanzar un 42% de la producción nacional, que resultó en una importante disminución de la intensidad energética.

Gráfica 4. 1

Porcentaje de la intensidad energética al producir cementos mezclados



Esta reducción del consumo energético junto con una mayor participación de los cementos puzolánicos en la producción nacional dieron lugar a los siguientes ahorros:

Tabla 4.1 Participación de los cementos puzolánicos en la producción nacional de cemento y el porcentaje de ahorro

Año	% de Cem. Pozolánicos en la producción nacional	% de Ahorro
1978	18.9	1.51
1979	17.6	1.41
1980	21	1.68
1981	30.4	2.43
1982	37.6	3.01
1983	32.8	2.63
1984	34.2	2.73
1985	34.2	2.73
1986	32.1	2.57
1987	35.6	2.85
1988	n.d.	n.d.
1989	n.d.	n.d.
1990	42	3.36

Datos: Anuario, 1987. CANACEM y "Características del consumo de energía en la industria del Cemento en México, evolución y perspectivas", SEMIP, 1992.

## Capítulo 4

No se cuentan con datos de 1991 a 1994, pero se estima que el ahorro ha sido mayor debido a que la producción de cementos puzolánicos se ha incrementado, y el factor de utilización se ha reducido.

Se observa que mientras mayor es la proporción de cementos puzolánicos dentro de la producción nacional de cemento, esta estrategia tiene una mayor importancia en la disminución de la intensidad energética.

### 4.2 Recuperación de energía al sustituir parcialmente los combustibles no renovables por materiales de desecho

A medida que la población aumenta se requiere una mayor cantidad de productos que satisfagan sus necesidades de alimentación, vestido, vivienda, etc. Durante el proceso de fabricación de estos artículos se generan residuos que por su calidad, ya no pueden ser incorporados nuevamente al proceso que los generó. Si estos residuos no se manejan adecuadamente se produce un impacto ambiental en el aire, suelo y agua.

Estos residuos industriales se pueden clasificar en residuos peligrosos y no peligrosos. Los residuos no peligrosos provienen de desechos agrícolas, de la industria química y de subproductos de la minería y fundiciones. Los residuos peligrosos, de acuerdo a la definición dada en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, son aquellos que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas inflamables, biológicas, infecciosas o irritantes representan un peligro para el equilibrio ecológico o al ambiente, sin importar el estado físico en el que se encuentren.

En 1994 la cantidad de residuos sólidos generados en México fue de 525,885 toneladas diarias, de las cuales 465,500 toneladas son desechos industriales, 60,185 toneladas son residuos municipales y 200 toneladas provienen de los hospitales. De los residuos industriales 15,500 toneladas son residuos peligrosos, de los cuales un 14.03% tiene una disposición adecuada y el resto tiene un paradero desconocido. En cuanto a la basura municipal, se recolectan 42,130 toneladas (70%), 18,116 toneladas se destinan a rellenos sanitarios y 24,014 toneladas a tiraderos abiertos.<sup>91</sup>

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), México cuenta con una infraestructura mínima para el tratamiento de residuos. Al existir una gran desproporción entre el volumen de desechos generados y la capacidad de destruirlos, la industria almacena los residuos en sus instalaciones o se deshace de ellos clandestinamente, depositándolos en los basureros municipales, mezclándolos en el drenaje o en cuerpos acuáticos.<sup>92</sup>

En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (USEPA por sus siglas en inglés) solicita información a las industrias acerca de las descargas de desechos en los diferentes medios: agua, aire y suelo. Recopilando esta información en 23,000 instalaciones industriales se obtuvo para 1993 una cifra de 2,134 millones de toneladas de residuos, de

<sup>91</sup> Sedesol y centro de Calidad Ambiental, ITESM.

<sup>92</sup> Meza, L., et. al. , "Manejo de aceites usados. Residuos peligrosos", en *CENAPRED*, México, julio, 1995, p. 17-23

los cuáles se transfirieron para su reciclaje el 69.1%, para recuperación de energía el 10.3%, para tratamiento 7%, para plantas de tratamiento 6.7% y para disposición final el 6.9%. Esta información se presenta en un reporte anual denominado Inventario de descargas tóxicas (TRI por sus siglas en inglés), que incluye las emisiones de más de 300 sustancias que son cancerígenas o materiales tóxicos que afectan adversamente la salud.<sup>93</sup> En México, el Instituto Nacional de Ecología (INE) coordina el trabajo para realizar un inventario similar, con el fin de regular el manejo de residuos peligrosos, para reducir su generación y fomentar su reuso, reciclaje y recuperación. Se estima que se generan anualmente alrededor de 5 a 8 millones de toneladas anuales de residuos peligrosos.<sup>94</sup>

El horno de cemento, por sus características operativas, permite recuperar energía a partir de desechos en forma segura y controlada sin generar residuos adicionales. De esta forma, el combustible alterno se define como un producto obtenido a partir de uno o más residuos que posean un poder calorífico significativo y que cumplan con una especificación definida y reglamentada por una autoridad ecológica.

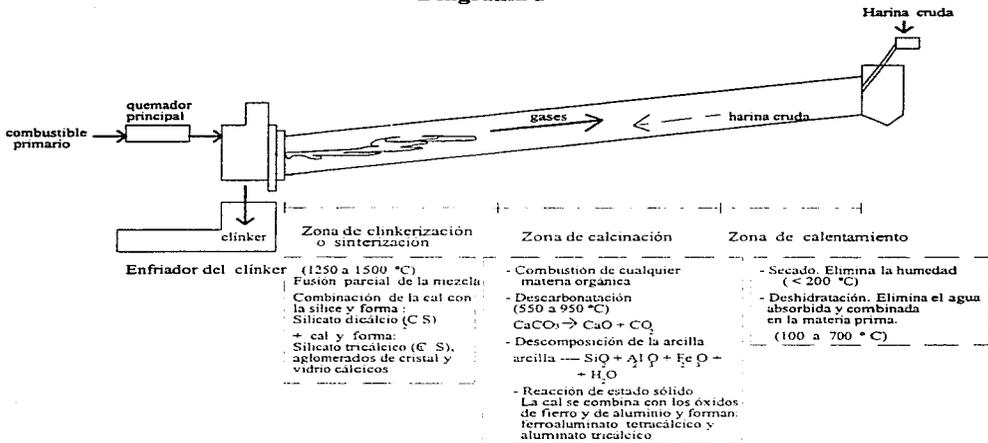
Las características del proceso de fabricación del cemento que permiten destruir y remover compuestos orgánicos de los desechos, y recuperar su energía calorífica son:

- Tiempo de residencia de gases de combustión: entre 4 y 6 segundos.
- Tiempo de residencia de la harina cruda es de 30 minutos a dos horas.
- Medio gaseoso turbulento. Existe un intensivo contacto, en forma de contra-corriente, entre los gases de combustión y la harina cruda que permiten una buena transferencia de calor y absorción de compuestos tóxicos.
- Atmósfera oxidizante. Al existir un exceso de oxígeno del 1 al 2% algunos componentes del azufre o del cloro forman óxidos y posteriormente sales que se incorporan a los constituyentes del clínker.
- Alto nivel de dilución. Las trazas de elementos de metales pesados se diluyen en el clínker. Con las altas temperaturas los compuestos que contienen metales pesados se descomponen y forman óxidos metálicos que se integran a las estructuras de los minerales del clínker, silicatos y aluminatos, asegurando su fijación y eliminando su riesgo ambiental.
- Elevada temperatura. En el sistema de combustión primaria, la llama tiene una temperatura de 1800 a 2000°C a la salida del quemador, a esta temperatura incluso los compuestos orgánicos más estables, como el freón, metil etil cetona, tricloro etano y el tolueno, son completamente destruidos. En la combustión secundaria se manejan temperaturas de 800 a 1200°C que son suficientes para quemar otros tipos de desechos. El siguiente diagrama muestra las diferentes zonas del horno y las reacciones químicas que se llevan a cabo en dichas zonas:

<sup>93</sup> Meza, L. "Estudio de la problemática del manejo de los aceites usados generados por diferentes medios de transporte", en CENAPRED, México, julio, 1995, p. 51.

<sup>94</sup> Garfias, Conferencia del Curso de Tecnologías Limpias de manejo de residuos peligrosos - México, Programa Universitario de Medio Ambiente (PUMA), Noviembre, 1994, p.p. 12-22

Diagrama 1



- **Baja temperatura en los gases de la chimenea.** Al tener un buen intercambio de calor, la harina cruda absorbe o condensa las concentraciones de las sustancias tóxicas en los gases y disminuye su temperatura, por lo tanto, a más bajas temperaturas de los gases de salida más baja será la concentración de compuestos tóxicos. La temperatura de los gases de salida dependen del tipo de horno utilizado:

Tabla 4. 2. Temperatura de los gases de salida de acuerdo al tipo de horno utilizado

Tipo de Proceso	Temperatura de los gases de salida [°C]
<b>Proceso Húmedo</b> Horno rotatorio largo	180-260
<b>Proceso Seco</b> Horno rotatorio largo	550-760
Horno con precalentador	330-380
Horno con precalentador y precalciner	300-360

Fuente: Da Silva, 1995

- Alta eficiencia de desempolvamiento. Las plantas modernas que cuentan con un eficiente equipo de recolección de polvo, como son los precipitadores electrostáticos y los filtros de bolsa, tienen un estricto control de emisión de partículas, las cuáles pueden contener cierta cantidad de elementos absorbidos por el polvo en el proceso del horno.

Al quemar desechos es importante estimar el cambio en el nivel de emisiones contaminantes, por lo que se deben analizar las siguientes características:

- \* Tipo de desecho, propiedades físicas.
- \* Análisis químico de los desechos.
- \* Tipo de sistema de horno y temperatura de los gases de escape.
- \* Método de introducción de desechos en el sistema del horno.
- \* Porcentaje de sustitución de combustible.
- \* Niveles normales de emisión, antes de utilizar los desechos como combustible.

En la Tabla 4. 3 se presentan diferentes tipos de residuos que se han utilizado como combustibles alternos dentro de los hornos de cemento.

El porcentaje de sustitución no se debe calcular basándose únicamente en el poder calorífico ya que al quemar desechos se tienen mayores pérdidas de calor. Estas pérdidas son debidas al contenido de agua en los desechos, ya que se incrementan la cantidad de gases y la temperatura; el contenido de cenizas, porque al tener una menor cantidad de material en el precalentador aumenta la temperatura en los gases de escape; y si los desechos son sólidos y gruesos, la combustión será pobre, se formará monóxido de carbono y aumentará el nivel de oxígeno, lo que provoca una mayor pérdida de calor en los gases de escape.<sup>95</sup>

Un factor importante en la utilización de desechos como combustible es el aprovisionamiento de ellos. Se debe tomar en cuenta la cantidad disponible, la recolección, la preparación o tratamiento por compañías especializadas, el costo de transporte y almacenamiento, las propiedades termoquímicas y la calidad de los desechos.

**Tabla 4. 3. Poder calorífico de varios combustibles de desecho**

Residuos	Poder calorífico (neto) [MJ/kg]
Poliétileno puro	46
Poliestireno puro	40
Alquitrán (subproducto)	38
Caucho puro (sin materiales inertes)	36
Desechos de aceites, desechos varios de refinería	30-38
Coque de petróleo	33
Restos de llantas	28-32
Lodos ácidos, ácidos de alquitrán (de refinación de aceite)	16-22
Gráfico de la industria de aluminio	20

<sup>95</sup> Holderbank. "Curso de cemento. Tecnología de Proceso. Uso de combustibles alternativos".

**Tabla 4.3 Continuación**

Residuos	Poder calorífico (neto) [MJ/kg]
PVC	19
Cáscara de nueces de palma (10% de humedad)	19
Torta de oliva prensada	18
Semillas desecadas (10% de humedad)	18
Tierras de Fuller (de refinación de aceite)	13-18
Madera desecada, cortezas, aserrín (10% de humedad)	16
Cáscara de arroz (10% de humedad)	16
Desechos trizados	15
Combustible de desechos domésticos (10% de humedad)	15
Cartón y papel (10% de humedad)	15
Lodo de aguas servidas (10% de humedad)	10
Restos domésticos (30% de humedad)	8.5
Lodo de aguas servidas (30% de humedad)	7.5
Hierro puro (en el resto de las llantas)	7.5
Aceite de esquiló	4

En México los desechos utilizados como combustibles alternos en los hornos de cemento son: llantas, aceites y lubricantes usados.

#### 4.2.1 Legislación

La legislación vigente en materia ambiental es la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente que se promulgó el 28 de enero de 1988 en el Diario Oficial de la Federación. Consta de 6 títulos: el primero trata de disposiciones generales; el segundo, de áreas naturales protegidas; el tercero, del aprovechamiento racional de los elementos naturales; el cuarto, de la protección al ambiente; el quinto, a la protección social y el sexto, las medidas de control y de seguridad, y las sanciones. Además se han publicado diversos reglamentos y normas técnicas ecológicas que complementan la normatividad jurídica vigente en esta materia. Uno de estos reglamentos trata sobre residuos peligrosos.

Respecto a los residuos, en la norma NOM-CRP-001- ECOL/1993, publicada el 22 de octubre de 1993 en el Diario Oficial, se establecen los criterios para determinar si un residuo es peligroso en base a los siguientes criterios: corrosividad, toxicidad al ambiente, reactividad, explosividad e inflamabilidad. Dentro de estos residuos se encuentran ácidos, álcalis, asbestos, cianuros, fenoles, plaguicidas, bifenilos policlorados (PCB), metales pesados (Zn, Cd, Be, Pb, As, Ni, etc.), residuos de pinturas, residuos de procesos de refinación del petróleo, solventes orgánicos, etc. así como las materias primas y los productos químicos que caducan, se deterioran, se retiran del comercio o dejan de utilizarse.

En el artículo 151, del capítulo V, del Título Cuarto de la Ley General, establece que la instalación y operación de sistemas para la recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos, requiere la autorización previa de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), actualmente Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). En el artículo 152, se establece que el manejo de residuos peligrosos debe obedecer a las normas y procedimientos que también establezca la SEMARNAP.

Dentro del reglamento en relación con los residuos peligrosos, menciona que la industria nacional debe manifestar las características del residuo y el manejo de éste dentro de la empresa: la entrega, transporte y recepción de residuos peligrosos; dar información adicional en casos de derrame por accidente; y proporcionar información semestral sobre el reciclaje, tratamiento, incineración, o confinamiento de los residuos peligrosos.

Aún no existen normas oficiales mexicanas que contemplen el manejo adecuado de llantas de desecho, ni de aceites y lubricantes usados. Actualmente se han estado elaborando anteproyectos de normas para el manejo adecuado de estos desechos desde su recolección hasta su destino final, dando preferencia al reciclaje y al aprovechamiento del poder calorífico como combustible alternativo.<sup>96</sup>

Para poder quemar combustibles alternos, el INE debe autorizarlo. Para ello se debe solicitar a este Instituto ciertas pruebas. Los objetivos de estas pruebas es determinar los parámetros de operación del horno utilizando combustibles alternos, determinar los valores límite permisibles para los combustibles alternos y sus respectivas emisiones, y demostrar que bajo las peores condiciones de operación, el uso de estos combustibles no representa problemas de contaminación ambiental.

Existe un protocolo de pruebas para quemar combustibles alternos en los hornos de cemento y establece que se tiene que describir el proceso de fabricación del cemento bajo condiciones normales: tipo de horno (con o sin precalentadores y precalcinadores), dimensiones del horno, caudal de alimentación de materia prima, diagramas de flujo de material, tipo y caudal de combustibles, temperatura y presión a la que se alimenta el combustible en el horno (y en los precalcinadores), el porcentaje de oxígeno en la zona de combustión primaria del horno (y a la salida del precalcinador), emisiones, tiempo de residencia de los gases en el horno, producción de clinker, equipos y dispositivos de control de emisiones, etc. Además se tienen que indicar las modificaciones al proceso cuando se utiliza combustible alternativo, anexando los diagramas de flujo, combustibles y emisiones, mencionando donde se alimenta el combustible alternativo, los balances de materia y de energía. En el caso de las partículas es necesario especificar el manejo que se le da al combustible alternativo y las medidas de seguridad que se le aplican al mismo. Y posteriormente se evalúa el comportamiento y volúmenes de las emisiones, haciendo una comparación de las concentraciones de las emisiones obtenidas durante las operaciones normal y con combustible alternativo.

---

<sup>96</sup> Flores, J., *Lubricantes usados*. Curso de Tecnologías Limpias de manejo de residuos peligrosos. México, noviembre, 1994, p.p. 1-12

## Capítulo 4

En la Tabla 4. 4 se indica que la composición físico-química que deben tener los combustibles alternos de acuerdo al protocolo de pruebas :

**Tabla 4. 4 Composición físico química de los combustibles alternos**

Características	
Poder calorífico	min. 4995 kcal/kg
Agua libre	max. 12 %
Cloruros	max. 2%
Halógenos	max . 5%
Sulfuros	max. 1%
Plomo	max.4000 mg/l
Cromo hexavalente	max. 3000 mg/l
Arsénico	max. 100 mg/l
Plaguicidas	max. 5mg/l
Sólidos suspendidos	max. 20%
Mercurio	max. 50 mg/l
Plata	max.100 mg/l
Selenio	max. 100 mg/l
Bario	max 6000mg/l
Cadmio	max. 500 mg/l

Fuente : "Terminos de referencia de protocolo para pruebas de quema de combustibles alternos en horno de cemento".

El protocolo de pruebas se apoya en el Reglamento "17 BImSchV" 1990 (94-96) de Alemania para establecer los límites máximos permisibles de emisiones cuando se usa combustibles alternos en los hornos de clinker.

**Tabla 4. 5 Condiciones y límites de emisión máxima para hornos de cemento que queman combustibles alternos**

Condiciones	
Periodo	Valor promedio diario
Contenido de oxígeno	11%
Temperatura en el horno	1200 °C
Tiempo de retención de gases	2 segundos
Emisiones	
Compuestos de cloro HCl	50 mg/m <sup>3</sup>
Compuestos de fluoro HF	2 mg/m <sup>3</sup>
Bióxido de azufre SO <sub>2</sub>	100 mg/m <sup>3</sup>
Monóxido de carbono CO	100 mg/m <sup>3</sup>
Compuestos orgánicos	20 mg/m <sup>3</sup>
Partículas	30 mg/m <sup>3</sup>
Metales pesados	
Sb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	0.2 - 5 mg/m <sup>3</sup>
Hg, Cd, Tl	0.2 mg/m <sup>3</sup>

Fuente : "Terminos de referencia de protocolo para pruebas de quema de combustibles alternos en horno de cemento".

#### 4.2.2 Llantas

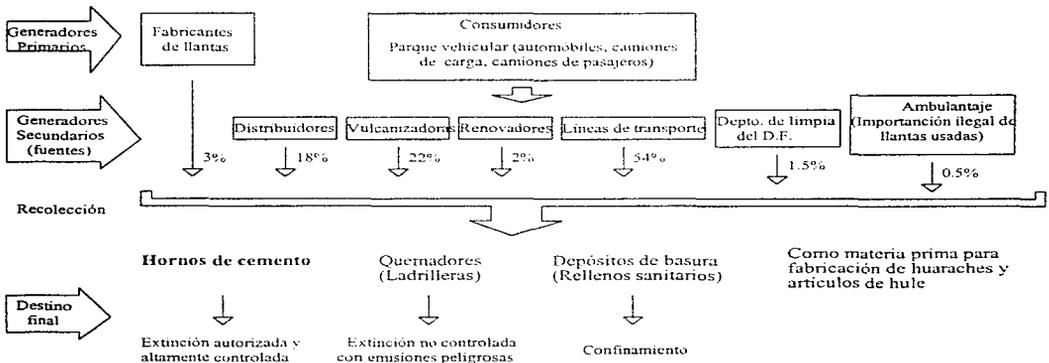
Las llantas para vehículos, al término de su ciclo de vida útil, se convierten en un desecho de muy lenta degradación. Además debido a la cantidad y forma física de las llantas es difícil manejarlas y darles una disposición final adecuada en rellenos sanitarios; y si son quemadas en procesos rudimentarios no controlados emiten contaminantes, como los furanos, a la atmósfera ocasionando grandes problemas a la salud y al medio ambiente.

La producción de la industria llantera mexicana en 1993 fue de 11,317, 200 de unidades, se importaron 5,747.500 unidades, tanto nuevas como usadas, lo que dan un total de 17, 064, 700 unidades.<sup>97</sup>

Las llantas de desecho que se generan en México están en función directa del parque vehicular nacional. En 1993 se estimó una generación de 225,000 toneladas anuales, y una generación media de 0.3 de llanta al año por habitante, esto se duplica en las zonas metropolitanas de la República Mexicana, como el Distrito Federal, Guadalajara, Monterrey y la zona fronteriza norte.<sup>98</sup>

A continuación se presenta en la Figura 4. 1 la generación y disposición final de las llantas de desecho en México:

**Figura 4. 1 Generación y disposición final de la llantas de desecho en México**



Fuente: INE

<sup>97</sup> Cortés, Fidel, *Sesión de llantas usadas. Taller sobre minimización de residuos y producción más limpia en América Latina y el Caribe*. INE, México, 1995.

<sup>98</sup> *Ibid* dem

## Capítulo 4

Existe un proyecto en México que consiste en triutrar las llantas y a través de un proceso criogénico obtener polvo de hule que se pueda emplear para la producción de diversos artículos de hule.

Las características físicas y químicas de las llantas son:

**Tabla 3. Características físicas y químicas de las llantas**

Estado físico	Peso Promedio	Poder calorífico	Análisis aproximado		Análisis esencial		Elementos tóxicos	
Sólido	Pasajero	28-32 MJ/kg	Caucho	36%	C	70%	Cr	97ppm
	7-10 kg		Llenado	37%	H	7%	Ni	77ppm
	Trailer		Acero y textiles	18%	S	1-3%	Pb	60-760 ppm
	45 kg		óxido de zinc	1.2%	Cl	0.2-0.6%	Cd	5-10ppm
			ablandadores	3%	Fe	15%	Tl	0.2-0.3ppm

Fuente: Apuntes del Curso de Cemento de Holderbank denominado "Tecnología de proceso, uso de combustibles alternativo"

Es importante considerar los siguientes puntos para introducir llantas en los hornos de cemento:

- Las llantas deben ser inyectadas en un lugar donde la energía producida por su combustión pueda ser absorbida por la harina cruda en la zona de calcinación y de sinterización.
- El tiempo de residencia de las llantas es crítico, se debe asegurar que éstas se quemem completamente antes de llegar a la zona de combustión.
- Las llantas deben ser introducidas en un lugar donde la temperatura sea lo suficientemente alta que asegure su completa combustión.

Existen varios métodos de alimentación de llantas a los hornos, y son:

- Llantas enteras: es el método más aplicado, y se introducen en el quemador secundario.
- Llantas troceadas: este método crea costos adicionales en su preparación. Se introducen en el quemador secundario, en la entrada o en la salida del horno; pero las entradas de aire falso pueden ser muy altas y ocasionar pérdidas de calor.
- Gasificación de llantas: Se utiliza en dos plantas de cemento de Japón, es un proceso muy costoso en el cual se obtiene un gas con alto poder calorífico al descomponer térmicamente las llantas aprovechando su combustión parcial. Por ser un combustible gaseoso ofrecen mayores ventajas de flexibilidad.<sup>99</sup>
- Llantas molidas en grano fino: Este método es muy costoso, y su única ventaja es que puede ser alimentado en el quemador primario.

<sup>99</sup> Saito, I., et. al., "Effective use of waste tyres by gasification in cement plant" en *World cement*, EUA, 1987.

En México las llantas se alimentan troceadas en el extremo final del horno. Para quemar llantas en necesario contar con la infraestructura necesario como son: un manejador automático de llantas que incluya una tolva de recepción, transporte reversible que las acepte o las rechace, una banda transportadora elevadora y un mecanismo que las introduzca en el horno; un sistema de control automatizado; un equipo de monitoreo de contaminantes ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}_3$ , polvos) y personal altamente capacitado.

Actualmente sólo 3 plantas de cemento en México cuentan con hornos acondicionados y autorizados por el Instituto Nacional de Ecología (INE) para quemar llantas de desecho: dos de ellas pertenecen al grupo de Cementos Mexicanos ubicadas en Ensenada y Huichapan, y desde 1992 cuentan con una capacidad instalada para el manejo de llantas de 8000 toneladas anuales y 350 toneladas mensuales respectivamente; y una planta del grupo Apasco ubicada en Estado de México, su capacidad instalada es de 2500 toneladas de llantas mensuales, sin embargo, sólo recopila entre 500 y 600 toneladas mensuales. Ambos grupos cuentan con centros de acopio, y coinciden en que el principal obstáculo es el costo de transportación. Debido a la falta de normatividad las llantas se reciben completas por lo que existen limitaciones de espacio y peso para almacenarlas y transportarlas. Los costos de transportación por GJ serían menores si se transportaran las llantas ya fraccionadas.

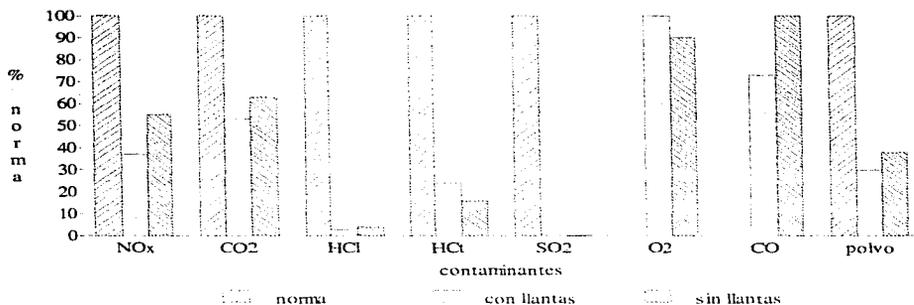
El porcentaje de sustitución de las llantas, de acuerdo a la experiencia de la planta de Apasco, es de hasta un 15 % del combustible.

Si todas las llantas de desecho generadas en el país, 225000 toneladas en 1993, se utilizaran como combustible alterno en los hornos de cemento se recuperarían 6750 TJ (1.61 PCal) de energía equivalentes a 161 millones de litros de combustóleo aproximadamente, considerando el poder calorífico de las llantas de 30 MJ/kg, lo que corresponde a una reducción del 6.84% del consumo de combustibles fósiles.

De acuerdo a la experiencia de la planta de Apasco las emisiones contaminantes al utilizar llantas de desecho como combustible alterno se mantienen debajo de las normas, tomando como referencia reglamentaciones de Alemania, Austria, Estados Unidos, Francia, Italia, Suiza y México (emisión de partículas) como se observa en la Gráfica 4. 1.

Las emisiones de óxidos de azufre no presentan cambios importantes, y las emisiones de óxidos de nitrógeno disminuyen hasta un 20 % al quemar llantas. Las emisiones de monóxido de carbono no varían mucho si las llantas se introducen en el punto óptimo, y además el contenido de oxígeno y el porcentaje de sustitución de llantas se controlan adecuadamente. Por otra parte, no se tienen problemas con las emisiones de partículas, ni con la emisión de metales peligrosos.

**Gráfica 4. 1**  
**Emissiones de prueba en h. cementeros**  
 con llantas como combustible alt



Fuente: Instituto Nacional de Ecología, 1996

Quemar llantas de desecho en los hornos cementeros es una excelente opción, desde el punto de vista ambiental y energético, ya que se les da una disposición adecuada y se recupera energía que se aprovecha en el proceso de fabricación del cemento. Es importante mencionar que los costos de inversión de un sistema completamente automatizado para quemar llantas varía entre 1.5 y 2.5 millones de dólares dependiendo de la situación de la planta, tipo de instalaciones y capacidad; para que esto sea costeable para las plantas de cemento en algunos países de Europa se les paga por incinerar las llantas.<sup>100</sup> Las ventajas del uso de llantas como combustible alterno para la industria del cemento dependerán de las disposiciones ambientales, las cuáles podrían auxiliar a construir una estructura que dirija el flujo de llantas de desecho a las plantas de cemento.

#### 4.2.3 Aceites y lubricantes usados

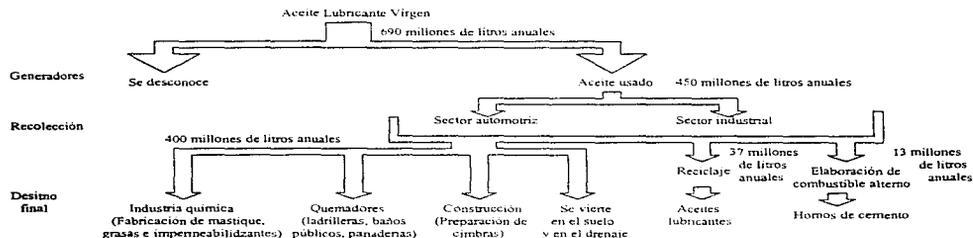
En México se producen cerca de 690 millones de toneladas de aceite lubricante virgen, los cuáles se emplean principalmente en el sector automotriz e industrial, como lubricantes en máquinas, turbinas, engranes, como fluidos hidráulicos, como fluidos para trabajar metales, y como fluidos aislantes y refrigerantes. Este aceite al ser utilizado se contamina y dependiendo de las impurezas que contenga podrá ser o no reciclable.

El aceite usado se clasifica como residuo peligroso de acuerdo a la norma NOM-CRP-001-ECOL/1993 publicada en el Diario Oficial el día 22 de octubre de 1993. Y la norma NOM-CCA-031-ECOL/1993, publicada el 18 de octubre de 1993 en el Diario Oficial, menciona que "no se deben depositar ni descargar en los sistemas de drenaje y

<sup>100</sup> Rosenhoj, J. "The cement kiln. The optimal solution for waste tyre burning" en *International cement review*. EUA, mayo, 1993, p. 30-36.

alcantarillado urbano, municipal, sustancias tóxicas o residuos considerados peligrosos en las Normas Oficiales Mexicanas." Sin embargo, gran parte de los aceites usados son vertidos en el suelo de minas o en el drenaje ocasionando la contaminación de mantos acuíferos, lagos, ríos y mares; otra parte es quemada en industrias sin ningún control lo que produce emisiones contaminantes peligrosas en el aire, y sólo una pequeña parte se recicla o se utiliza para elaborar combustible alternativo. La generación y disposición de los aceites usados se puede observar en la Figura 4. 2.

Figura 4. 2. Generación y disposición de aceites usados



Datos de los apuntes de la ponencia "Lubricantes Usados" del curso de Tecnologías Limpias para el Manejo de Residuos Peligrosos, 1994

El Instituto Nacional de Ecología (INE) junto con la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), las principales compañías fabricantes de lubricantes, de cemento y de combustibles alternos elaboraron un anteproyecto de Norma Oficial Mexicana con el objetivo de reglamentar el almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y reuso de aceites usados, dándole mayor prioridad al reciclaje y al aprovechamiento de su poder calorífico como combustible alternativo.<sup>101</sup>

En México existen 5 plantas que reciclan exclusivamente lubricantes usados. El proceso que utilizan se llama PROP (Phillips re-refined oil process); consiste en desmetalizar el lubricante usado, quitarle la humedad, y mediante una serie de filtros, altas temperaturas, un hidrotratamiento y el uso de catalizadores para quitar el cloro, azufre, nitrógeno, oxígeno e hidrocarburos livianos se obtiene un aceite básico con características similares a uno nuevo.

Por otra parte, existen 9 plantas que formulan combustibles alternos líquidos a partir de lubricantes usados.<sup>102</sup> Este combustible alternativo es una mezcla balanceada de desechos industriales como natas de pinturas, solventes, tintas para impresión, resinas,

<sup>101</sup> Flores, 1994, *op. cit.* Referencia 96

<sup>102</sup> Flores, 1994, *op. cit.* Referencia 96

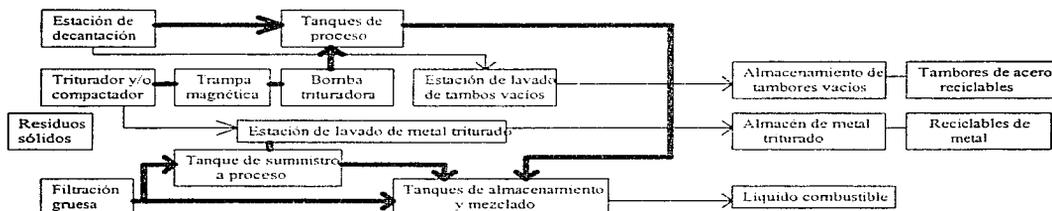
## Capítulo 4

desengrasantes y aceites usados, excepto los aceites solubles y los dieléctricos formulados a partir de bifenilos policlorados (PCB).

Para que estos residuos pueden ser utilizados en los hornos de cemento, la planta requiere de la siguiente infraestructura: laboratorios, transporte especializado y una planta formuladora que se maneje, trate, mezcle y homogenice los residuos industriales de tal manera que se obtenga un combustible uniforme que asegure la calidad del cemento y la protección ambiental.

Una vez que los residuos son recolectados se caracterizan en un laboratorio reconocido por las autoridades ecológicas, y sólo se utilizan aquellos que tienen un alto poder calorífico, que son inflamables, que tienen un bajo nivel de cloro y de metales, y que tiene un bajo contenido de agua. No se aceptan materiales corrosivos o reactivos, ni residuos radiactivos, ni explosivos, ni biológicos. Posteriormente son transportados y depositados en tambores. De acuerdo al tipo y estado físico de los residuos, éstos reciben una serie de procesos como se puede observar en la Figura 4. 3:

Figura 4. 3. Procesos para obtener combustible alternativo a partir de desechos



Fuente: De los apuntes de la ponencia " Recuperadores de energía en hornos cementeros" del curso Workshop of Technology for energy recovery in cement kilns using alternative fuels, agosto, 1994.

Las empresas elaboradoras de combustible alternativo líquido que proporcionan sus servicios a los diferentes grupos cementeros son: Química Omega a la Sociedad Manufacturera de Cementos Portland La Cruz Azul, Proambiente al Cementos Mexicanos y Ecoltec a Cementos Apasco.<sup>103</sup>

Algunas empresas como Química Omega se encargan de realizar todas las etapas del proceso, recolección, caracterización, procesamiento y transporte en pipas hasta los tanques de almacenamiento de las plantas cementeras. Otras empresas como Ecoltec tiene sus instalaciones de tratamiento dentro de la planta cementera. El combustible alternativo es líquido y se introduce al horno a través del quemador primario.

<sup>103</sup> Meza, 1995, *op. cit.* Referencia 93

Debido a la falta de normatividad, las plantas de cemento sólo pueden quemar combustible alterno en protocolo de prueba teniendo que obtener diferentes permisos, y demostrar la eficiencia y seguridad del proceso. Las plantas autorizadas son: del grupo de Cementos Mexicanos, las que se encuentran ubicadas en Torreón, Huichapan y Atotonilco de Tula; de Cementos Cruz Azul, las plantas de Jasso y Lagunas; de Cementos Apasco, la planta de Ramos Arizpe y de Cementos Portland Moctezuma, la planta de Jiutepec.<sup>104</sup>

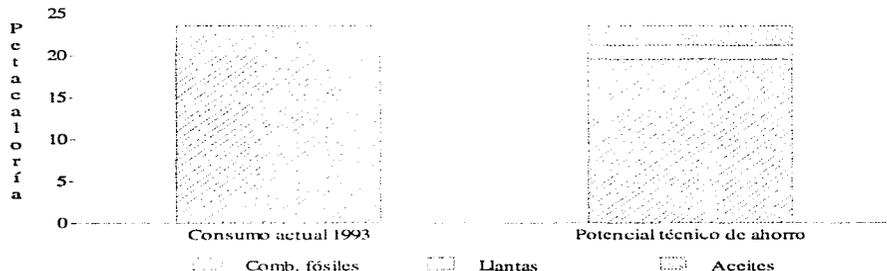
El combustible alterno derivado de aceites puede sustituir hasta un 40% del combustóleo o gas natural.

De acuerdo a datos de 1992, en México se generan cerca de 475 mil toneladas de residuos que pueden aprovecharse para la fabricación de combustible alterno para hornos de cemento. Si toda esta cantidad de residuos se quemaran en las plantas cementeras del país, se recuperarían cerca de 9,943 TJ (2.37 Pcal) de energía lo que equivale a un ahorro de aproximadamente 257 millones de litros de combustóleo, es decir, el consumo de combustibles fósiles se reduciría en un 10.065%.

En cuanto a las emisiones contaminantes de metales al utilizar combustibles derivados de aceites no son críticas, la mayor parte de las trazas de metal son absorbidas por el clínker y por el polvo del horno.

Como se puede observar en la Gráfica 4. 2 al quemar llantas de desecho y aceites usados se recupera una gran cantidad de energía contenida en estos residuos y al mismo tiempo se destruyen de manera eficiente y controlada, se contribuye al ahorro de combustibles no renovables, y el proceso de la fabricación del cemento se hace más eficiente y menos costoso.

**Gráfica 4. 2**  
**Ahorro de energía al quemar desechos**  
en hornos de cemento



<sup>104</sup> Meza, 1995, *op. cit.* Referencia 93

**SEGUNDA**

**PARTE**

## Descripción física del proceso a controlar: Horno rotatorio de cemento

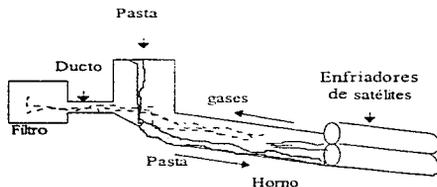
El horno que se analiza pertenece a la planta de Jiutepec, Morelos de Cementos Portland Moctezuma, S.A. La característica principal del horno es que utiliza el proceso húmedo, es decir, la materia prima se introduce en el horno en forma de pasta con una humedad del 30 al 36%. Esto es muy importante ya que dentro del horno la evaporación de la humedad es una de las etapas que consumen más energía.

Como se mencionó en el capítulo uno, la etapa de calcinación está constituida por el horno rotatorio, el enfriador de clínker y dependiendo del tipo de proceso, de precalentadores y precalcinadores. Está constituida principalmente por cuatro zonas :

1. La zona de secado y precalentamiento, donde toda el agua de la pasta se evapora y su temperatura se eleva a aproximadamente 800 °C, donde comienza la calcinación.
2. La zona de calcinación, en la cuál se libera bióxido de carbono de la caliza y del carbonato de calcio, dejando cal libre y magnesia ; esta zona es muy importante para el operador, ya que la calcinación completa de la pasta permite una sinterización apropiada del clínker.
3. La zona de clinkerización, en la cual se forman los últimos compuestos del clínker, donde la temperatura del material alcanza los 1400 °C
4. La zona de enfriamiento, en el cuál se enfría rápidamente el clínker para tener una mejor calidad y molturabilidad.

La planta analizada cuenta con un horno rotatorio largo, precalentadores y enfriadores de satélites. Es importante mencionar que en estos enfriadores no se puede recuperar calor. La capacidad del horno es de 18 toneladas por hora.

**Figura Esquema del transporte de materia prima (pasta) y de gases en el horno rotatorio de cemento**



La materia prima está compuesta de un 64 a un 70% de caliza, de un 30 a un 36% de arcilla y de 0.5 a 1% de óxido de hierro, y una vez que ha sido triturada, molida y homogenizada es transportada al horno auxiliada de bombas centrífugas especiales.

Como combustible utilizan una mezcla de combustóleo y de aceites de desecho. El grado de sustitución del combustible alterno es variable y depende de la disponibilidad del combustible. La mezcla se introduce en el quemador del horno, y el caudal promedio que se introduce al horno es de 3500 litros por hora. El combustible se debe introducir al horno a una temperatura aproximada de 120 °C y a una presión de 23 kg/cm<sup>2</sup>.

En cuanto al equipo de control de emisiones, se tienen filtros de mangas para las trituradoras y filtros electrostáticos para la etapa de calcinación.

Este horno cuenta con poca automatización, y pocos instrumentos de medición. El control de temperatura es manual y no se realiza a través de los instrumentos si no que el operador ve la coloración y la forma de la flama, el tamaño del clinker, etc., y de esta forma van controlando la cantidad de combustible, aire y alimentación de pasta.

El consumo específico de la planta es de aproximadamente 1500 kcal/kg. clinker,<sup>105</sup> por lo que existe un gran potencial de ahorro de energía. Como se mencionó anteriormente, una propuesta de la tesis, es evaluar que tanto beneficia, desde el punto de vista energético, un control automatizado del proceso.

---

<sup>105</sup> Dato proporcionado por el Ing. Mario Moreno, Ingeniero de Producción de la planta.

## Antecedentes del control y modelado del horno rotatorio de cemento

Los primeros hornos que fabricaron cemento eran verticales, intermitentes, cargados y controlados manualmente. A finales del siglo XIX, apareció en Inglaterra el horno rotatorio, lo que permitió tener un proceso continuo y de mayor capacidad. A partir de entonces se ha buscado mejorar sus sistemas de medición y de control, además de incrementar su eficiencia térmica en precalentadores, precalcinadores y enfriadores.

En 1930, surge un controlador mecánico en lazo abierto que regulaba el flujo de combustible al quemador de manera indirecta a través de un peso de palanca determinado midiendo la presión de entrada al quemador. Si se deseaba cambiar el punto de operación, se modificaba la cantidad de pesas.<sup>106</sup>

La aparición de la instrumentación neumática en 1940 facilitó que el control de proceso se acoplara más a las necesidades de los operadores, ya que ésta permite ajustar los puntos de operación, las ganancias del controlador, etc. En 1950, apareció el control electrónico que tenía ventajas similares a las del control neumático, además era más compacto, requería menos mantenimiento y podía estar localizado más cerca del proceso.<sup>107</sup>

En 1960, el control electrónico se centralizó en un cuarto de control con el fin de agrupar las señales y tener el control total del proceso en paneles que estaban equipados con instrumentos de lectura directa y dispositivos de control individuales. Una vez centralizado se vio la posibilidad de controlar el proceso mediante una computadora con un programa adecuado, utilizando ciertas variables de referencia y de control.

Como se mencionó en la sección anterior, el horno de la planta de Cementos Portland Moctezuma en Jiutepec, Morelos tiene una antigüedad aproximada de 27 años. Desde su construcción y puesta en marcha no se ha actualizado, cuenta con poca automatización y pocos instrumentos de medición, y es controlado principalmente por los operadores.

A partir de 1970, se introdujeron los controles en lazo cerrado para variables de proceso individual. Mientras tanto, los componentes electrónicos se miniaturizaron y aparecieron los microprocesadores, esto permitió el desarrollo de controladores de varios lazos.<sup>108</sup> También, se introdujeron las minicomputadoras de propósito general y se desarrollaron las primeras versiones del control directo digital y los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA).

En este periodo, los sistemas de control generalmente estaban integrados por 3 partes : controladores lógico programables (PLC) para el control de los motores; sistemas analógicos para los lazos de control, y una minicomputadora que sirve de interface entre los operadores y el proceso. Posteriormente estas partes se integraron en los Sistemas de Control Distribuido

<sup>106</sup> Ramírez, C., "Evolución del control en la Industria del Cemento" en *Revista IMCYC*, México, vol. 25, no. 200, enero, 1988, p. 45-52.

<sup>107</sup> *Ibid*

<sup>108</sup> Jensen, S., "Total plant control : utiliza DCS or PLC" en *IEEE Cement Industry Conference*, EUA, mayo, 1992, p. 198-200.

(DCS), los cuáles concentran el control de operaciones y el equipo de monitoreo en un cuarto central y el manejo de actuadores, sensores, motores y maquinaria mecánica en PLCs.<sup>109</sup>

Actualmente, el estado del arte en los sistemas automáticos de control de procesos es el uso de sistemas descentralizados con sistemas inteligentes distribuidos cuyos componentes tienen una base de datos común y están comunicados por 'buses' de datos. La estructura de estos sistemas consta principalmente de 4 niveles: el de procesos, que es interface entre las máquinas, el sistema de control y el equipo eléctrico de producción de la planta; 2) el de control, en donde las señales son monitoreadas y reguladas por controladores programables o computadoras de procesos; 3) el nivel de la computadora principal ('servidor'), en donde se organiza y evalúa la información del proceso y sirve de unión entre el operador y las máquinas; y 4) el nivel administrativo, donde se encuentra la base de datos, las estadísticas así como los programas para el control de calidad, manejo de la energía y planeación del mantenimiento.<sup>110</sup>

La automatización de las plantas de cemento se centra principalmente en el control del horno rotatorio debido a que éste es el mayor consumidor de energía térmica de las plantas, por lo que representa un mayor potencial de ahorro de energía. De acuerdo a Bentrup<sup>111</sup> al operar de manera óptima los hornos de cemento se han obtenido incrementos en la producción de clínker, mejoras en la calidad de éste y sobretodo una mayor estabilidad en el proceso que da lugar a una reducción del consumo térmico y ahorros en los refractarios.

Un método usual para proponer un sistema de control se basa en el establecimiento de un modelo matemático que describa el comportamiento dinámico del horno. Pero, debido a que el proceso que se lleva a cabo en el horno es no lineal, variable en el tiempo y tiene muchas variables acopladas, su descripción es muy complicada.

Un ejemplo de ello, es descrito en un artículo de Aizawa de una planta en Onoda, Japón que cuenta con un sistema de control del horno basado en un modelo físico del horno el cual consta de aproximadamente 50 ecuaciones diferenciales parciales que describen el intercambio de calor y masa dentro del proceso. Para ello el horno es dividido en varios segmentos y la materia prima pasa a través de cada segmento a una velocidad que depende de la velocidad de rotación del horno y las condiciones de la materia prima dentro de él. Se calcula el calor total producido en cada segmento del horno y el sistema manipula las variables de tal forma que éste sea mínimo. La configuración del sistema de control utilizado es un regulador integral óptimo en los límites de linealidad.<sup>112</sup>

En plantas con poca automatización, como es el caso analizado, el operador humano es el encargado de monitorear y regular el horno. Desde el punto de vista de control, se tiene un control realimentado donde el operador humano forma parte integral del lazo de control. En este tipo de procesos tan complicados, en los cuáles se carece de modelos matemáticos del sistema, resulta que el operador puede controlar más efectivamente el proceso que un sistema automático, debido a la manera en que se presenta la información y a que puede tomar

<sup>109</sup> Drews, H. "The basic concept of process control in cement plants" en *World cement*, agosto, 1993, p. 11-14.

<sup>110</sup> "Process control technology for the cement industry" en *World cement*, julio, 1995, p.p. 26-30.

<sup>111</sup> Bentrup, K., "Sistemas expertos en la Industria del Cemento" en *World cement*, agosto, 1994, p. 16-21.

<sup>112</sup> Aizawa, T., "Control strategy for automation in Onoda's cement plants" en *IEEE Cement Industry Technical Conference 1994*, p. 254-267

decisiones. Esta característica de la lógica del razonamiento humano de poder manejar datos cualitativos a través de la pertenencia a conjuntos definidos de manera vaga, y poder sintetizar la información fue estudiada por Lofti Zadeh<sup>113</sup>, quien propone una nueva técnica conocida como lógica difusa para trabajar con sistemas muy complicados sin requerir de un análisis cuantitativo exacto.

La primera aplicación de la lógica difusa para el control de procesos se llevó a cabo en un horno de cemento. La compañía F. L. Smidth's de Copenhage fue la primera en poner en funcionamiento un controlador difuso implantado en un microprocesador. A partir de esta aplicación se comprobó que formular estrategias de control basadas en la experiencia práctica de los operadores a través de la lógica difusa es muy sencillo y eficiente.<sup>114</sup> Este controlador se lanzó al mercado en 1980, y actualmente se utiliza en varios hornos de cemento.

Es importante definir las variables del proceso que se utilizan para controlar el horno. Sin embargo, la selección de las variables de proceso y de control dependen principalmente del tipo de proceso (húmedo o seco, con precalentadores, precalcinadores), del tipo de enfriadores (de parrillas, planetarios, etc.) y de los instrumentos de medición con los que cuente el horno rotatorio. Por ejemplo, las variables que indican las condiciones en la zona de clinkerización son: 1) el color y forma de la flama, el color y el tamaño del clinker, las condiciones de la 'costra', etc.<sup>115</sup> (que son observadas a simple vista por el operador); 2) el contenido de cal libre (o peso litro) del clinker, sin embargo, este análisis refleja los requerimientos que existían en el horno una o dos horas antes, las cuáles corresponden al tiempo en el que el clinker llega a la zona de clinkerización, sale y se analiza; 3) el par del horno; 4) la temperatura, a través de pirómetros ópticos y termómetros de luz infrarroja; 5) el contenido de óxidos de nitrógeno, este compuesto depende de la temperatura de la atmósfera oxidizante que rodea la flama especialmente en el rango de temperaturas de la zona de clinkerización (1500 °C), y responde rápidamente.<sup>116</sup> Las mejores opciones son las dos últimas, pero son muy costosas y no todos los hornos cuentan con dichos instrumentos de medición.

A continuación se describen casos prácticos del modelado y control del horno rotatorio en diversas plantas de cemento, y los resultados obtenidos al utilizar controladores difusos.

En 1991 se puso en operación un controlador difuso en una planta de cemento en Maastrich, Holanda. Se reconoció que el controlador difuso resolvió diversos problemas de estabilidad del horno, disminuyó el consumo excesivo de combustibles y las emisiones de óxidos de nitrógeno. Para modelar y controlar el horno se analizaron tres alternativas. Una proposición era calcular un modelo físico-químico del horno, pero no era práctico debido a la presencia de demasiadas variables obscuramente relacionadas, es decir, existen una gran cantidad de reacciones químicas que se llevan a cabo en el horno; características físicas como

<sup>113</sup> Zadeh, 1973, *op. cit.* Referencia 1

<sup>114</sup> Ostergaard, 1982, *op. cit.* Referencia 2

<sup>115</sup> Peray, K. E. y Wadell, *The rotary cement kiln*, Nueva York, 1972, p. 334-331

<sup>116</sup> Sheridan, 1983, "Automatic kiln control at Oregon Portland Cement Company's Durkee Plant, utilizing Fuzzy Logic" en *FLS-review*, no. 65, mayo, 1983, p. 3-8 y Egélov, A. "Experience with NO measurements in connection with Fuzzy Logic Control of rotary kilns" en *Zement-Kalk-Gips International*, no. 3, enero, 1982, p. 6-8

son la longitud y el diámetro que, en este caso, afectan el refractario del horno, etc. Otra opción era hacer una identificación del sistema, es decir, ajustar un modelo a través de procedimientos estadísticos hasta que la respuesta sea igual a la del proceso real, pero por razones de tiempo no la eligieron. Y por último, un controlador difuso el cuál como se mencionó anteriormente simula el comportamiento de un operador ideal y no requiere de mediciones exactas de datos. De los tres modelos mencionados anteriormente, este último fue el que se seleccionó<sup>117</sup> y está actualmente en operación. Este artículo resalta la facilidad en la que las estrategias de control fueron programadas y ajustadas a las necesidades de la planta de cemento.

En 1993, Ruiz Navarro propone un Sistema de Control Adaptable Predictivo (SCAP) junto con un Sistema Maestro para minimizar el consumo de energía a través del control y estabilización de las variables críticas del horno y posteriormente maximizar la producción. El sistema de control adaptable maneja 6 lazos de control: la alimentación de materia prima, la velocidad del horno, el nivel térmico, el tiro, la presión entre las parrillas del enfriador y el ventilador del flujo de aire en el enfriador. Los programas del sistema maestro son ejecutados cuando se tienen condiciones extremas en el horno; cuando se tienen valores confusos en las variables y se cambia el modo de operación del lazo ; y cuando una vez que el horno opera establemente, los programas lleven los puntos de operación de los diferentes lazos a sus valores óptimos.<sup>118</sup>

Carrión y Navarro, de la Compañía Valenciana de Cementos Portland, S.A., modelaron al horno a través de dos subprocesos: uno de material y otro de gases. Los dos subprocesos se presentan como bloques diferenciados. El subproceso de gases está relacionado con el proceso de combustión, forma parte del lazo de control rápido y se controla mediante técnicas clásicas basadas en un modelo de primer orden que satisface los objetivos de control. El subproceso de material está relacionado con el transporte de material, su dinámica es muy lenta, y no tiene un modelado analítico fácil; de acuerdo a su experiencia, ellos recomiendan las técnicas de control inteligente, que incluyen técnicas 'difusas' para la interpretación de valores numéricos de las variables y el cálculo de las acciones de control. Mencionan que una de las ventajas de la estructura de control que propusieron es que el horno se controla como lo haría un operador experto, pero con una actuación más frecuente y uniforme.<sup>119</sup>

En México, varias plantas de cemento cuentan con estos controladores difusos en sus hornos, con sofisticados instrumentos de medición y equipos de procesamiento de información. Se tienen referencias de las plantas de Apasco en Orizaba, Apaxco<sup>120</sup>, Ramos Arizpe<sup>121</sup> y Macuspana<sup>122</sup>; de las plantas de Cruz Azul en Jasso y en Lagunas<sup>123</sup> y de la planta de Cementos Chihuahua en Salmalayuca.<sup>124</sup>

<sup>117</sup> Erens . y Saint Paul, 1995, *op. cit.* Referencia 17

<sup>118</sup> Ruiz Navarro, A., et al., "Minimizing energy consumption in kilns by the SCAP system" en *World cement*, marzo, 1993, p. 23-28

<sup>119</sup> Carrión C. y A. Navarro, "RIGAS. Sistema Inteligente para el control de procesos en la Industria del Cemento" en *Cemento y Hormigón*, no. 733, España, junio, 1994, p. 645-650

<sup>120</sup> *World Cement*, septiembre 1994, p.p.116

<sup>121</sup> "Bailey in Mexico" en *International Cement Review*, mayo, 1993, p.p. 57

<sup>122</sup> "Control system improves kiln stability" en *World cement*, Marzo, 1993, p.p. 30

Debido a la complejidad del modelo del horno rotatorio y a las ventajas del controlador lógico difuso que se observaron en los diferentes casos prácticos resulta evidente la conveniencia de su aplicación para el control del horno.

---

<sup>123</sup> García-Luna, C., "A new generation of Expert Kiln Control can provide extraordinary R.O.I. and process benefits" en *IEEE Cement Industry Technical Conference 1994*, p. 245-252

<sup>124</sup> Guardiata, C. "Summit control system for Cementos de Chihuahua" en *World cement*, abril, 1994, p. 32-37

## **Capítulo 5.**

### **Modelo del horno rotatorio de cemento**

Para poder simular y determinar el desempeño del sistema de control propuesto es necesario contar con el horno o con un modelo que represente el comportamiento dinámico del proceso.

El proceso en el horno rotatorio involucra dos flujos: uno de material y otro de gases. El material crudo es introducido al horno, donde se calienta hasta alcanzar la temperatura de clinkerización (1450°C). El material avanza mediante un efecto combinado de la gravedad y la rotación del horno. El flujo de material responde lentamente y con un largo tiempo muerto, es decir, después de modificar una entrada en el horno se observa un cambio después de cierto tiempo (de 20 minutos a una hora dependiendo del proceso y longitud del horno utilizado).

Los gases responden casi instantáneamente. Éstos son introducidos por el aire primario del mechero principal, y por el aire secundario que proviene del enfriador; a lo largo del horno los gases calientan al material crudo el cuál fluye a contracorriente.

Si el proceso de clinkerización en el horno rotatorio es considerado como un proceso total, entonces este es un sistema multivariable porque varias variables individuales acopladas entre sí son influidas al mismo tiempo.

Un modelo que describa esto a través de leyes termodinámicas es muy complicado, por lo que la determinación del modelo dinámico se hizo a través de un proceso de identificación con datos experimentales de entrada y salida del horno no. 3 de la planta de cementos Portland Moctezuma en Jiutepec, Morelos. El modelo obtenido es lineal e invariante en el tiempo; éste sólo es una aproximación de cómo se comporta el horno bajo ciertas condiciones alrededor de un punto de operación. sin embargo, es suficiente debido a que un controlador lógico difuso logra un buen desempeño sin la necesidad de un modelo numérico preciso.

En la sección 5.1 se describe la obtención y validación del modelo del horno a través del método de identificación de parámetros.

En la sección 5.2 se analizan las propiedades cualitativas del modelo.

#### **5.1 Obtención del modelo por identificación**

La identificación de un sistema consiste en obtener un modelo matemático a partir de mediciones de entrada y de salida de un experimento. Existen principalmente dos métodos de identificación: el paramétrico, el cuál dada una representación del modelo, consiste en calcular el valor de ciertas constantes para el modelo válidas únicamente para

## Capítulo 5

ese experimento; y el no paramétrico, que consiste en aplicar una entrada conocida y analizar las características de salida.

El modelo del horno rotatorio de cemento está representado en variables de estado, en donde los elementos de las matrices  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  forman el vector de parámetros que hay que calcular, de tal manera que el comportamiento del modelo se aproxime al comportamiento del fenómeno observado.

En la subsección 5.1.1 correspondiente a los conceptos teóricos de la identificación se describen los diferentes tipos de modelos, el método de regresión lineal comúnmente usado en la identificación, y las diferentes estructuras de modelos. En la subsección 5.1.2 se explica el método de predicción del error utilizado para identificar el horno de cemento estudiado. En la subsección 5.1.3 se describe la obtención del modelo del horno en tiempo discreto a partir de los datos reportados en la planta de cementos. Y en la subsección 5.1.4 se realiza la conversión del modelo en tiempo discreto al tiempo continuo para poder simularlo junto con el controlador difuso propuesto.

Por último, es importante recalcar que en el horno rotatorio de cemento se llevan a cabo muchas reacciones químicas, su comportamiento es no lineal y variante en el tiempo, sin embargo, debido a la complejidad de modelar un proceso con estas características y para el alcance de esta tesis se simplificó a un modelo lineal e invariante en el tiempo, ya que como se mencionó anteriormente servirá para determinar el desempeño del sistema de control propuesto.

### 5.1.1 Fundamentos teóricos

Para el diseño de esquema de control es de vital importancia contar con el modelo matemático del sistema a controlar. Generalmente los sistemas dinámicos lineales e invariables en el tiempo son representados a través de sistemas de ecuaciones diferenciales, las cuáles se pueden combinar en una ecuación diferencial matricial de la siguiente manera :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A(\theta)x + B(\theta)u \\ y &= C(\theta)x + D(\theta)u\end{aligned}\tag{5.1}$$

A esta representación se le conoce como variables de estado. El vector  $u$  es el vector de entradas, el vector  $x$  representa el vector de estados del sistema y el vector  $y$  es el vector de salidas. Considerando que el sistema es invariante en el tiempo, la matrices  $A(\theta)$ ,  $B(\theta)$ ,  $C(\theta)$  y  $D(\theta)$  son constantes y al vector  $\theta$  se le denomina vector de parámetros. Un parámetro es una constante en cualquier experimento, pero cuyo valor puede cambiar de experimento en experimento.

La identificación de un sistema consiste en obtener un modelo matemático a partir de mediciones de entrada y de salida de un experimento. En este caso, el objetivo radica en obtener los valores del vector de parámetros  $\theta$ , de tal manera que el comportamiento del

modelo se aproxime al comportamiento del fenómeno observado. Esto se puede lograr al minimizar el error entre las salidas del modelo y del modelo identificado. A este método de identificación se le conoce como método paramétrico.

Otro método de identificación es el no paramétrico y se utiliza cuando el modelo es descrito por una curva, una función o una tabla. Consiste en aplicar una entrada conocida y analizar las características de la salida. Este método de identificación es fácil de usar, pero los resultados no son precisos y generalmente son muy sensibles al ruido. Existen 4 tipos de identificación no paramétrica:

- **Análisis transitorio:** donde la entrada es un escalón o un impulso, y la salida registrada constituye el modelo. Este método permite intuir la constante de amortiguamiento, el tiempo de levantamiento, la constante de tiempo dominante, la ganancia estática y el posible retardo.
- **Análisis de frecuencia:** la entrada es una senoide, y si el sistema es lineal, la salida también es una senoide. Los cambios en fase y en amplitud darán la respuesta en frecuencia, la cuál puede ser presentada en un diagrama de Bode o su equivalente en funciones de transferencia.
- **Análisis de correlación:** la entrada es ruido blanco<sup>125</sup>, y el modelo obtenido es una función de peso (weighting function) que resulta de calcular una covarianza cruzada entre la entrada y la salida.<sup>126</sup>

$$r_{y,u}(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)r_u(\tau - k) \tag{5. 2}$$

donde  $r_{y,u}(\tau)$  es la función de covarianza cruzada entre la entrada y la salida

$h(k)$  es una secuencia de pesos (weighting sequence)

$r_u(\tau)$  es la función de covarianza de la entrada

- **Análisis espectral:** la entrada es arbitraria siempre y cuando ésta no esté correlacionada con la perturbación. La función de transferencia se obtiene en la forma de un diagrama de Bode (o su equivalente).

---

125 El ruido blanco se define como una secuencia independiente, idénticamente distribuida, con variables aleatorias y media cero, cuya densidad espectral es constante en todo el rango de frecuencias.

126 Söderström, T. y P. Stoica, *System identification*, Gran Bretaña, 1989, Cap. 3

## Capítulo 5

Para identificar un sistema es importante seguir los siguientes pasos<sup>127</sup> :

1. Se excita el sistema con una señal de entrada conocida y se observan las entradas y salidas del sistema en un intervalo de tiempo dado. Estas señales son registradas y almacenadas para un procesamiento de información posterior.
2. Se determina una representación apropiada del modelo : funciones de transferencia, variables de estado, etc.
3. Se estiman, a través de métodos estadísticos, los parámetros desconocidos del modelo. Esto es, se elige una estructura tentativa del modelo y con los datos medidos en los experimentos se determinan sus parámetros. Se examina si el modelo obtenido es una representación adecuada del sistema. Si no lo es, se selecciona una estructura más complicada y se estiman sus parámetros hasta encontrar el modelo más apropiado.

### Estructura de los modelos paramétricos

El método utilizado para la obtención del modelo del horno es paramétrico, por lo que en esta subsección se explica la manera en que se establece una relación entre los datos medidos y el vector de parámetros  $\theta$  elegido.

La estructura del modelo para sistemas multivariables pueden ser escrita como :

$$Y = \Phi^T \theta + \varepsilon \quad (5.3)$$

donde  $Y$  es un vector de dimensión  $p$  de cantidades medibles

$\Phi^T$  es una matriz de dimensión  $n \times p$  de las cantidades conocidas

$\theta$  es un vector de dimensión  $n$  de parámetros desconocidos, a este vector se le conoce como vector de parámetros

$\varepsilon$  es el error de medición o residuo y se define como la diferencia entre la salida de la planta y la del modelo de predicción.

Por ejemplo, si consideramos que el modelo está definido como :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + \varepsilon(t)$$

donde

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb}$$

$$\theta(t) = [a_1 \dots a_{na} \quad b_1 \dots b_{nb}]$$

$$\Phi(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-na) \quad u(t-1) \dots u(t-nb)]$$

---

127 Södertström, T. y P. Stoica, 1989. *op. cit* Referencia 126

Se propone un modelo estimado

$$\hat{y}(t) = -\hat{a}_1 y(t-1) - \dots - \hat{a}_{na} y(t-na) + \hat{b}_1 u(t-1) + \dots + \hat{b}_{nb} u(t-nb)$$

$$\hat{\theta}(t) = [\hat{a}_1 \dots \hat{a}_{na} \hat{b}_1 \dots \hat{b}_{nb}]$$

Y el error de predicción se define como  $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$

El problema consiste en estimar un parámetro  $\theta$  tal que minimice la suma de cuadrados del error. A esta suma se le conoce como función de pérdidas y se denota como  $V(\theta)$ , el cual es un criterio de desempeño que se desea mejorar cuando se requiere determinar los parámetros de un control adaptable directo.

$$J^r(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon^2 = \frac{1}{N} \varepsilon^T \varepsilon = \frac{1}{N} \|\varepsilon\|^2 \tag{5.4}$$

Para ajustar los parámetros del modelo con base en el perfeccionamiento del criterio de desempeño  $V(\theta)$  que involucra al error, se minimiza derivando  $V(\theta)$ .

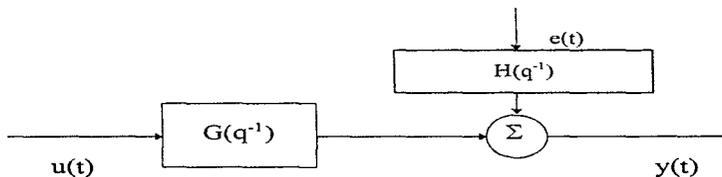
Además, la obtención de modelos paramétricos está basada en un estructura. La forma general de esta estructura es:

$$y(t) = G(q^{-1}; \theta) u(t) + H(q^{-1}; \theta) e(t)$$

$$E e(t) e^T(t) = \Lambda(\theta) \delta_{t,\tau} \tag{5.5}$$

- donde  $y(t)$  es el vector de salidas de dimensión  $ny$
- $u(t)$  es el vector de entradas de dimensión  $nu$
- $E$  es el operador esperanza
- $e(t)$  es ruido blanco
- $G(q^{-1}; \theta)$  es un filtro de dimensiones  $ny \times nu$
- $H(q^{-1}; \theta)$  es un filtro de dimensiones  $ny \times ny$
- $q^{-1} u(t) = u(t-1)$
- $\Lambda(\theta)$  es la matriz de covarianza

Cuya representación en diagramas de bloques es la siguiente :



## Capítulo 5

Considerando que  $y(t)$  y  $u(t)$  son señales escalares, la estructura del modelo está dada por:

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})A(q^{-1})} u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})A(q^{-1})} e(t)$$

$$Ee^2(t) = \lambda^2$$

(5. 6)

donde

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = 1 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc}$$

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd}$$

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf}$$

El vector de parámetros está dado por :

$$\theta = (a_1 \dots a_{na} \ b_1 \dots b_{nb} \ c_1 \dots c_{nc} \ d_1 \dots d_{nd} \ f_1 \dots f_{nf})^T$$

Relacionando la ecuación (5. 6) con la (5. 5) tenemos que :

$$G(q^{-1}; \theta) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})F(q^{-1})}$$

$$H(q^{-1}; \theta) = \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})D(q^{-1})}$$

$$\Lambda(\theta) = \lambda^2$$

(5. 7)

Lo anterior fue descrito para señales escalares, lo cuál se extiende a los sistemas multivariados donde  $A(q^{-1})$ ,  $B(q^{-1})$ ,  $C(q^{-1})$ ,  $D(q^{-1})$  y  $F(q^{-1})$  son matrices polinomiales. Si todos los elementos de las matrices son desconocidos, éstos formarán el vector de parámetros  $\theta$ . A esta estructura se le conoce como forma polinomial completa.

Por otro lado, cuando se utilizan variables de estado se tiene que

$$x(t+1) = A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t) + v(t)$$

$$y(t) = C(\theta)x(t) + D(\theta)u(t) + e(t)$$

(5. 8)

donde  $v(t)$  es el ruido del proceso y  $e(t)$  es el error de medición.

La elección de la estructura del modelo y la manera en que se formará el vector de parámetros es muy importante. para ello se deben tomar en cuenta los siguientes factores :

- **Flexibilidad:** La estructura del modelo deberá describir las diferentes dinámicas del sistema. En este caso, tanto el no. de parámetros libres como la manera en que ellos entran al modelo es muy importante.

- *Parsimonia:* El modelo deberá contener el mínimo número de parámetros libres requerido para representar al sistema real adecuadamente. Dependiendo de esto, el modelo obtenido será único. De otra manera, si el número de parámetros libres es menor al requerido, el modelo describirá de manera imperfecta al sistema ; si es mayor, varios modelos representarán el mismo sistema. Esto último es muy común para los sistemas multivariables. El modelo obtenido en este trabajo es multivariable y no considero este factor, ya que se partió de que no se conocía ningún parámetro libre del modelo. Esto implica que el modelo obtenido no es único.
- *Complejidad algorítmica:* Algunos métodos de identificación como es el método de predicción del error, que se explica posteriormente, se puede aplicar varias estructuras de modelo. Dependiendo de la estructura elegida es el número de cálculos necesarios.

### 5.1.2 Modelo de identificación: método de predicción del error

El método de mínimos cuadrados descrito anteriormente es sólo aplicable para modelos estáticos. Una manera de modificar este método y obtener estimados consistentes para los modelos dinámicos es a través de la minimización del error de predicción. Poder predecir la salida en el tiempo  $t$  con base en una acción de control apropiada es importante ya que la mayor parte de los sistemas son estocásticos, lo cual significa que la salida en el tiempo  $t$  no puede ser determinado exactamente a partir de los datos en  $t-1$ . A este procedimiento se le conoce como método de predicción del error (PEM por sus siglas en inglés) o método de mínimos cuadrados generalizado.

Para determinar el vector de parámetros  $\theta$  del modelo, el error de predicción definido como la diferencia entre la salida medida y la salida estimada en el tiempo  $t-1$ , debe ser pequeño:

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t|t-1; \theta) \quad (5.9)$$

donde  $\hat{y}(t|t-1; \theta)$  denota la predicción de  $y(t)$  a partir de los datos hasta  $t-1$  y basado en el vector de parámetros  $\theta$ .

El método de predicción del error consta de los siguientes pasos :

- *Selección de la estructura del modelo:* consiste en elegir como la construcción de las matrices de transferencia  $G(q^{-1}; \theta)$ ,  $H(q^{-1}; \theta)$ , y la función  $\Lambda(\theta)$  a partir de las ecuaciones (5.6) y (5.7).
- *Selección del predictor:* La fórmula general de un predictor lineal es

$$\hat{y}(t|t-1; \theta) = L_1(q^{-1}; \theta) y(t) + L_2(q^{-1}; \theta) u(t) \quad (5.10)$$

el cuál es función de los datos pasados siempre y cuando los filtros del predictor  $L_1(q^{-1}; \theta)$  y  $L_2(q^{-1}; \theta)$  estén restringidos a que  $L_1(0; \theta) = 0$  y  $L_2(0; \theta) = 0$ .

## Capítulo 5

La elección de estos filtros será óptima si las varianzas de los errores de predicción son mínimos.

- *Selección de la función de criterio* : consiste en elegir una función valuada escalarmente  $h(Q)$  que determine el desempeño del predictor utilizado. Generalmente  $Q$  es la matriz de covarianza de la muestra  $R_N(\theta)$ .

$$R_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon(t, \theta) \varepsilon^T(t, \theta) \quad (5.11)$$

Una función de criterio  $h(Q)$  frecuentemente usada es:

$$h_1(\theta) = \det Q \quad (5.12)$$

y se le conoce como criterio de máxima similitud, donde se asume que el ruido tiene una distribución de Gauss.

- Determinar el parámetro estimado  $\hat{\theta}$  como el punto mínimo (global) de la función de pérdidas  $h(R_N(\theta))$ .

$$\hat{\theta} = \min_{\theta} h(R_N(\theta)) \quad (5.13)$$

### 5.1.3 Obtención del modelo

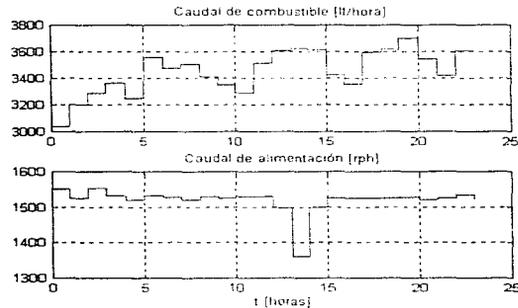
Esta planta cuenta con pocos instrumentos de medición y el control del horno es manual. Los operadores del horno registran diversas variables cada hora en un reporte de operación como son: la alimentación de materia prima (en centímetros de la altura de la cama de clinker y en revoluciones por hora de la bomba de alimentación); el caudal de combustible en litros por hora, la presión y temperatura del combustible; el porcentaje de oxígeno; la intensidad de corriente de los motores utilizados en el horno, en la bomba de alimentación, en el ventilador de tiro inducido y en las parrillas del enfriador; la velocidad del horno; las temperaturas del ducto al filtro, de la entrada al horno y del aire secundario; y la presión de tiro inducido.

El modelo del horno, más que describir las reacciones químicas que se llevan a cabo, pretende analizar su comportamiento en forma general. Dicho modelo se fundamentó en la experiencia de los operadores. De acuerdo a su experiencia es muy importante mantener cierta temperatura en la zona de clinkerización, y vigilar que el porcentaje de oxígeno (%O<sub>2</sub>) se mantenga dentro de cierto rango. En la zona de clinkerización se analizan los requerimientos de calor del horno, y a través de las mediciones de oxígeno se observa que tan fácil o difícil viene el material para calcinar, si el horno se está calentando o enfriando, y si se debe aumentar o disminuir el combustible

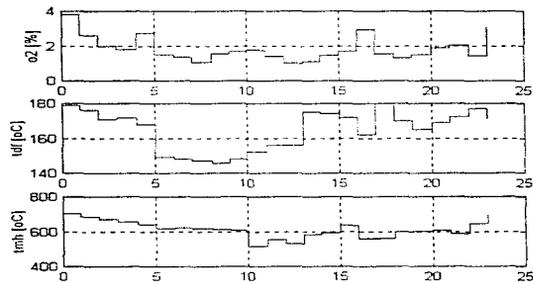
o la alimentación. En la práctica, el calor requerido en esta zona es monitoreado por el operador a simple vista a través del color de la flama y del tamaño del clínker. Sin embargo, al considerar la temperatura de mitad del horno (tmh) se tiene una indicación de cómo viene el material a esta zona. Otra variable importante es la temperatura del ducto al filtro (tdf). Bajo estas consideraciones para el modelo de este horno de cemento se seleccionaron como variables de entrada: el caudal de combustible y el caudal de pasta (materia prima); y como variables de salida: el porcentaje de oxígeno.

Los datos de entrada y de salida que se consideraron para la identificación del horno se obtuvieron del reporte de operación del horno que se incorpora en el anexo 3. Los datos se registran cada hora, y forman los siguientes vectores de entrada y de salida:

**Figura 5. 1 Vectores de entrada al horno**



**Figura 5. 2 Vectores de salida**



## Capítulo 5

Como se mencionó anteriormente el modelo obtenido es lineal e invariable con el tiempo, y en forma general se representa como:

$$x(k+1) = A(\theta)x(k) + B(\theta)u(k)$$

$$y(k) = C(\theta)x(k) + D(\theta)u(k)$$

donde  $y_1(k) = x_1(k)$  = porcentaje de oxígeno [%<sub>o</sub>]

$y_2(k) = x_2(k)$  = temperatura del ducto al filtro [°C]

$y_3(k) = x_3(k)$  = temperatura de mitad del horno [°C]

$u_1(k)$  = caudal de combustible [litros/hora]

$u_2(k)$  = caudal de pasta [rev/hora]

En este caso se desconocen todos los parámetros  $\theta$ , de las matrices  $A, B, C$  y  $D$ , de tal forma que el modelo se obtuvo a partir de la siguiente ecuación en variables de estado:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 \\ \theta_4 & \theta_5 & \theta_6 \\ \theta_7 & \theta_8 & \theta_9 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} \theta_{10} & \theta_{11} \\ \theta_{12} & \theta_{13} \\ \theta_{14} & \theta_{15} \end{bmatrix} u(k)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} \theta_{16} & 0 & 0 \\ 0 & \theta_{17} & 0 \\ 0 & 0 & \theta_{18} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} \theta_{19} & \theta_{20} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u(k)$$

(5. 14)

Para calcular estos valores fue de gran ayuda el 'System Identification Toolbox' del MATLAB ya que cuenta con una función que calcula los parámetros libres a través del método de predicción del error (PEM). Una de las principales ventajas por la que se utiliza este método para identificar sistemas multivariables es porque maneja todas las estructuras de modelo. Esta función busca iterativamente los puntos mínimos de la función de pérdidas para que el error entre las variables medidas y las variables estimadas sea lo más pequeño posible.

Se elaboró el programa *param.m* en MATLAB (ver anexo 4) para calcular los parámetros  $\theta$ , a partir de los datos observados. En este programa una vez establecidos cuáles son los parámetros libres del modelo en variables de estado, se construye una matriz  $\theta$  que contiene información acerca de la estructura del modelo, los parámetros a estimar y la precisión en la estimación. Se establece un vector inicial a partir del cual se van a buscar los valores que minimicen la función de pérdidas  $V(\theta)$  con la función PEM. Por último, se simula el modelo obtenido con la entrada real y se compara con la salida medida.

Las principales limitaciones del modelo obtenido se deben al número de datos y al tiempo de muestreo. Debido a que se emplearon muy pocos datos y se estimaron muchos parámetros, el modelo no es único; esto es análogo a proponer un punto, y pedir que se trace una recta. Por otra parte, el tiempo de muestreo es cada hora, sin embargo, algunas variables tienen un tiempo de respuesta menor. A pesar de estas limitaciones, el modelo obtenido representa, aunque sea de manera burda, el comportamiento de las variables dentro del horno, que es útil para analizar el desempeño de un controlador lógico difuso,

## Modelo del horno

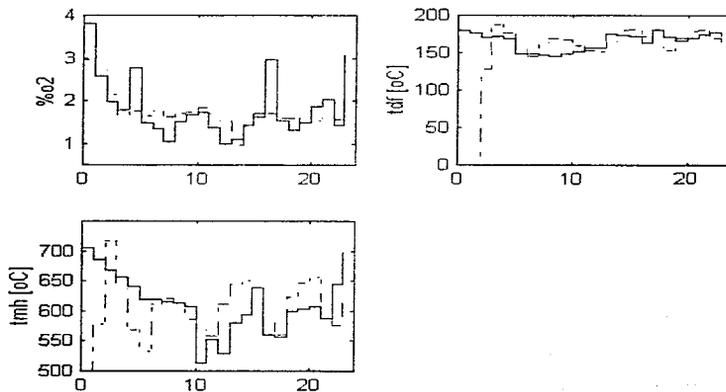
Se probaron varios vectores iniciales hasta obtener el modelo discreto más adecuado:

$$A = \begin{bmatrix} -0.1343 & 2.5313 & -1.7163 \\ -0.0379 & 0.4077 & -0.2837 \\ 0.1590 & -0.1831 & 0.1896 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0.0629 & 0.1074 \\ -0.0105 & 0.0295 \\ 0.2296 & -0.0512 \end{bmatrix}$$
$$C = \begin{bmatrix} 0.0006 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8167 & 0 \\ 0 & 0 & 0.933 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} -0.0008 & 0.0034 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(5. 15)

El modelo obtenido es el siguiente

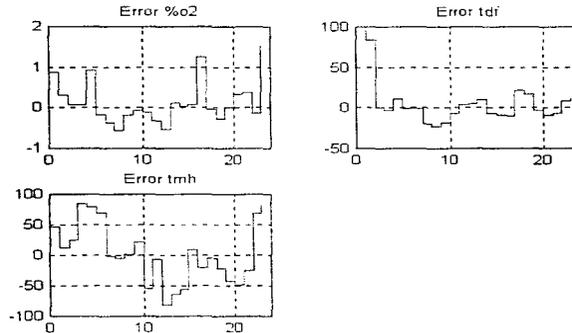
Figura 5. 3 Comparación del modelo obtenido con el programa param.m y las salidas reales del horno rotatorio — modelo — salida real



## Capítulo 5

A continuación se grafica el error que indica que tanto se desvía el modelo estimado del proceso real:

**Figura 5. 4 Gráficas del error de las salidas del modelo respecto al proceso**



La validación del modelo se hizo principalmente de manera visual a través de las gráficas analizando la similitud entre la salida del modelo y la salida real.

Visualmente se observa que la salida del modelo difiere de la salida real. Sin embargo, a través de las pruebas estadísticas se analizó que tan flexible o complejo es el modelo obtenido. Debido a que un controlador que utiliza lógica difusa no necesita un modelo muy preciso se concluyó que para el tipo de control utilizado es suficiente.

### 5.1.5 Conversión del modelo del horno de tiempo discreto a tiempo continuo

El modelo del horno se calculó en tiempo discreto debido al tiempo de muestreo utilizado y a la manera en que se registran los datos; sin embargo, se decidió convertir el modelo del tiempo discreto a tiempo continuo porque el proceso real es un sistema en tiempo continuo.

Existen varios métodos para la transformación de sistemas discretos a sistemas continuos, entre ellos se encuentran el retén de orden cero y la aproximación de Tustin, también conocida como transformación bilineal o trapezoidal. Una de las principales ventajas de este último es que un sistema estable en tiempo discreto es transformado en un sistema estable en tiempo continuo.

Se probaron ambos métodos, sin embargo, se eligió el retén de orden cero debido a que se obtuvieron mejores características cualitativas del modelo obtenido bajo este método.

El retén de orden cero calcula las matrices  $A_c$  y  $B_c$  de acuerdo a la siguiente fórmula:<sup>128</sup>

$$\begin{pmatrix} A_c & B_c \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{h} \ln \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & I \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

donde  $h$  es el periodo de muestreo y  $\ln(\cdot)$  es la matriz logaritmo natural

Es importante mencionar que de acuerdo al Teorema de Cayley-Hamilton es recomendable que la matriz  $A$  no tenga valores propios negativos en el eje real para que se pueda calcular una matriz logarítmica; si la matriz  $A$  tiene valores propios complejos conjugados la matriz logarítmica no será única.

De esta forma se obtuvo que el modelo en tiempo continuo está dado por :

$$\begin{aligned} A_c &= \begin{bmatrix} -2.0533 & 9.9428 & -3.3849 \\ 0.8898 & -6.5462 & -1.3313 \\ 1.8455 & -10.1279 & -1.7346 \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} 0.361 & -0.0661 \\ 0.2202 & 0.0597 \\ 0.5245 & -0.0117 \end{bmatrix} \\ C_c &= \begin{bmatrix} 0.0006 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8167 & 0 \\ 0 & 0 & 0.933 \end{bmatrix}, D_c = \begin{bmatrix} -0.0008 & 0.0034 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.17)$$

## 5.2 Propiedades cualitativas del modelo obtenido

En un análisis cualitativo de los sistemas se estudian principalmente propiedades generales, como son: la controlabilidad, la observabilidad y la estabilidad. Es muy importante conocer estas tres propiedades para determinar si existe una solución concreta para el sistema de control.

De una manera general, la controlabilidad estudia la posibilidad de que bajo la aplicación de cierta entrada  $u$ , el sistema sea capaz de transferir cualquier estado a otro estado en un tiempo finito; la observabilidad examina la posibilidad de estimar un estado a partir de la observación de la salida durante un intervalo de tiempo finito; y la estabilidad indica si la salida del sistema regresa o no a un estado de equilibrio cuando éste es sometido a alguna perturbación.

<sup>128</sup> Aström, K. Y Björn Wittenmark. "Computer-Controlled Systems", Editorial Prentice Hall. Estados Unidos, 1990, p.p. 41-65, 126-129, 209-221.

## Capítulo 5

Esta sección se encuentra organizada de la siguiente manera. En las subsecciones 5.2.1 y 5.2.2 se introdujeron los conceptos de controlabilidad y observabilidad respectivamente, las condiciones necesarias y suficientes para definir si el sistema es controlable y observable, por último se determinó que el modelo propuesto cumple con estas propiedades. En la subsección 5.2.3 se definió el concepto de estabilidad, su determinación a través de la ubicación de los polos del sistema en el plano de la frecuencia  $j\omega$ , y se comprobó que el modelo es estable. Por último, en la subsección 5.2.4 se estudió la respuesta al escalón del sistema en lazo abierto para conocer su comportamiento ante perturbaciones y poder comparar la respuesta del sistema cuando se utiliza un controlador lógico difuso.

### 5.2.1 Controlabilidad

Un sistema es controlable en el tiempo  $k$ , si para cualquier  $x(k)$  y cualquier  $x_1$  en el espacio de estados existe una señal de entrada  $u_{j, k-1}$  que pueda transferir el estado inicial  $x(k)$  al estado  $x_1$  en el tiempo  $k+1$ .<sup>129</sup> Es decir, solamente se requiere que la entrada  $u(k)$  sea capaz de trasladar cualquier estado del espacio de estados a otro estado en un tiempo finito, sin que sea necesario conocer la trayectoria.

La controlabilidad de estado completo es una propiedad de la ecuación de estados únicamente, las ecuaciones de salida no están involucradas.

Un sistema lineal, invariable en el tiempo en variables de estado de dimensión  $n$  es controlable si y solo si la matriz de controlabilidad  $U$  de dimensiones  $n \times (n p)$  definida como:

$$U = [B; AB; A^2 B; \dots; A^{n-1} B] \quad (5.18)$$

es de rango  $n$ .<sup>130</sup>

Para analizar la controlabilidad del modelo del horno obtenido en las secciones anteriores, basándonos en la ecuación de estados del modelo en tiempo discreto :

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} -0.1343 & 2.5313 & -1.7163 \\ -0.0379 & 0.4077 & -0.2837 \\ 0.1590 & -0.1831 & 0.1896 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} -0.0629 & 0.1074 \\ -0.0105 & 0.0295 \\ 0.2296 & -0.0512 \end{bmatrix} u(k)$$

<sup>129</sup> Chen, Chi-Tsong, *Linear System theory and design*, EUA, 1984, p. 168-189

<sup>130</sup> Aström, 1990, *op. cit.* Referencia 128

y en tiempo continuo:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -2.0533 & 9.9428 & -3.3849 \\ 0.8898 & -6.5462 & -1.3313 \\ 1.8455 & -10.1279 & -1.7346 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0.361 & -0.0661 \\ 0.2202 & 0.0597 \\ 0.5245 & -0.0117 \end{bmatrix} u(t)$$

Se calcula la matriz de controlabilidad  $W_c$  con los valores de las matrices  $A$  y  $B$ , para tiempo discreto:

$$W_c = \begin{bmatrix} -0.0629 & 0.1074 & -0.4122 & 0.1481 & -0.1751 & 0.0336 \\ -0.0105 & 0.0295 & -0.0670 & 0.0225 & -0.0218 & 0.0030 \\ 0.2296 & -0.0512 & 0.0354 & 0.002 & -0.0465 & 0.0198 \end{bmatrix}$$

y la matriz de controlabilidad  $W_{c'}^*$ , con los valores de las matrices  $A_c$  y  $B_c$ , para tiempo continuo:

$$W_{c'}^* = \begin{bmatrix} 0.3610 & -0.0661 & -0.3274 & 0.7689 & -9.0355 & -3.5032 \\ 0.2202 & 0.0597 & -1.8184 & -0.4340 & 14.9056 & 4.4651 \\ 0.5245 & -0.0117 & -2.4736 & -0.7062 & 22.1034 & 7.0391 \end{bmatrix}$$

Tanto el rango de la matriz de controlabilidad  $W_c$  del modelo discreto como el rango de la matriz de controlabilidad  $W_{c'}^*$  del modelo continuo es 3.

Como las matrices de controlabilidad tanto para el modelo discreto como para el modelo continuo tienen 3 rengiones linealmente independientes se puede concluir que ambos modelos que representa al horno son controlables.

### 5.2.2 Observabilidad

Se dice que el sistema es observable si existe una  $k$  finita tal que a partir del conocimiento de las entradas  $u(0), \dots, u(k-1)$  y de las salidas  $y(0), \dots, y(k-1)$  se pueda determinar el estado inicial del sistema.<sup>131</sup>

Considerando al sistemas de ecuaciones (5.1), y que el efecto de una señal de entrada conocida siempre puede ser determinada, se puede asumir, sin pérdida de generalidad, que  $u(k)=0$ . Se asume que  $y(0), y(1), \dots, y(n-1)$  están dados por :

$$\begin{aligned} y(0) &= Cx(0) \\ y(1) &= Cx(1) = CAx(0) \\ &\vdots \\ y(n-1) &= CA^{n-1}x(0) \end{aligned}$$

<sup>131</sup> Aström, 1990, *op. cit.* Referencia 128

## Capítulo 5

Utilizando una notación vectorial obtenemos :

$$\begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} x(0) = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(n-1) \end{bmatrix}$$

(5. 19)

El estado  $x(0)$  puede ser obtenido de la ecuación (5. 19) si y sólo si la matriz de observabilidad  $W_o$  definido como :

$$W_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

(5. 20)

tiene rango  $n$ . En otras palabras, el sistema es observable si y solo si  $W_o$  tiene rango  $n$ .

Para determinar si el modelo del horno es o no observable, se calcularon las matrices de observabilidad  $W_o$ , a partir de las matrices  $A$  y  $C$  de la ecuación (5.19) para el modelo discreto, y  $W_{oc}$  para el modelo continuo con las matrices  $A_c$  y  $C_c$  de la ecuación (5.21):

La matriz de observabilidad  $W_o$  para tiempo discreto está dada por :

$$W_o = \begin{bmatrix} 0.0006 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8167 & 0 \\ 0 & 0 & 0.933 \\ \hline -0.0001 & 0.0015 & -0.001 \\ 0.0310 & -0.3330 & 0.2317 \\ 0.1483 & -0.1709 & 0.1769 \\ \hline -0.0002 & 0.0006 & -0.0005 \\ 0.0453 & -0.0998 & 0.0852 \\ 0.0147 & 0.2734 & -0.1726 \end{bmatrix}$$

cuyo rango es 3 .

La matriz de observabilidad  $W_{oc}$  para el modelo continuo está dado por :

$$W_{oc} = \begin{bmatrix} 0.0006 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8167 & 0 \\ 0 & 0 & 0.933 \\ \hline -0.0012 & 0.0059 & -0.002 \\ -0.7266 & 5.3461 & 1.0873 \\ 1.7219 & -9.4496 & -1.6185 \\ \hline 0.004 & -0.0303 & -0.0002 \\ 8.2554 & -53.2336 & -65.438 \\ -14.9305 & 95.3716 & 9.5595 \end{bmatrix}$$

que también tiene un rango 3.

Como las matrices de observabilidad tanto para el modelo discreto como para el modelo continuo tienen 3 renglones linealmente independientes se puede concluir que ambos modelos que representa al horno son observables.

### 5.2.3 Estabilidad

La característica más importante del comportamiento dinámico de un sistema de control es la estabilidad absoluta, es decir, si el sistema es estable o inestable. Se dice que un sistema de control está en equilibrio, si la salida permanece en el mismo estado en ausencia de cualquier perturbación o entrada. De manera burda, se puede decir que cuando un sistema de control lineal, e invariable en el tiempo se somete a una perturbación, se considera que es estable, si la salida regresa eventualmente a su estado de equilibrio; pero si el sistema oscila indefinidamente o se aleja sin límite de su estado de equilibrio se considera inestable.<sup>132</sup>

De acuerdo a las definiciones de MacFarlane y Karkanias<sup>133</sup> los polos describen las características del 'mecanismo dinámico interno' de un sistema, mientras que los ceros describen la manera en la que el mecanismo dinámico es acoplado al ambiente en la que el sistema se encuentra involucrado.

La estabilidad de un sistema lineal en el tiempo continuo se puede determinar por la ubicación de los polos en el plano de frecuencia compleja  $j\omega$ . Si cualquiera de los polos del sistema queda en el semiplano derecho del plano  $j\omega$ , al transcurrir el tiempo la respuesta transitoria aumenta en forma monótona u oscila con amplitud creciente; esto representa a un sistema inestable. Si todos los polos del sistema quedan a la izquierda del plano  $j\omega$ , cualquier respuesta transitoria alcanza el equilibrio; esto representa a un sistema estable.

<sup>132</sup> Ogata, K., *Ingeniería de control moderna*, México, 1993, p. 267-268

<sup>133</sup> MacFarlane, A., N. Karkanias, "Poles and zeros of linear multivariable systems: a survey of the algebraic, geometric and complex-variable theory" en *Int. J. Control*, vol. 25, no. 1 EUA, 1976, p. 34-74.

## Capítulo 5

Para sistemas lineales en tiempo discreto, el semiplano izquierdo  $j\omega$  corresponde al cálculo unitario centrado en el origen, o sea, que el semiplano izquierdo  $j\omega$  tiene su representación conforme a la parte interior del círculo unitario en el plano  $z$ . Por lo tanto, la estabilidad de un sistema lineal en el tiempo discreto se puede determinar por la ubicación de los polos dentro del círculo unitario centrado en el origen en el plano  $z$ .

Los polos de un sistema multivariable en variables de estado es un subconjunto de los valores propios de la matriz  $A$  que aparece en la ecuación (5.1). Para determinar si estos valores propios son los polos del sistema es importante conocer la relación que existe con la matriz de funciones de transferencia. Una función de transferencia se define como la relación entre la transformada de Laplace de la salida (función respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función excitación), bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero.<sup>134</sup> Las raíces de los polinomios del denominador y del numerador definen los polos y los ceros del sistema respectivamente. Cuando un cero coincide con un polo, éste se cancela y se anula su dinámica correspondiente. Esto no es tan fácil de observar si se tiene un modelo en variables de estado, sin embargo, se sabe que la matriz de funciones de transferencia no tiene cancelaciones si y sólo si, el sistema tiene un estado completo controlable y observable. Entonces los valores propios de la matriz  $A$  representan los polos del sistema.

Como se mencionó anteriormente el modelo discreto del horno es controlable y observable, por lo que los polos del sistema están definidos por los valores propios de la matriz  $A$  de la ecuación (5.19) que son:

$$\begin{aligned}p_1(z) &= 0 \\p_2(z) &= 0.2315 + 0.5113i \\p_3(z) &= 0.2315 - 0.5113i\end{aligned}$$

Se observa que todos los polos del sistema se encuentran dentro del círculo unitario del plano  $z$ , por lo que se concluye que el sistema es estable.

De manera análoga, se observó que el modelo continuo también es controlable y observable, por lo que los polos del sistema están dados por los valores propios de la matriz  $A_c$  de la ecuación (5.21) que son:

$$\begin{aligned}p_1(s) &= -9.1758 \\p_2(s) &= -0.5792 + 1.1448i \\p_3(s) &= -0.5792 - 1.1448i\end{aligned}$$

Como se puede observar todos los polos del sistema se encuentran a la izquierda del plano de frecuencia compleja  $j\omega$ , por lo que se concluye que el sistema es estable.

Es importante hacer notar que aunque el sistema es estable, no se obtienen las respuestas deseadas por lo que se utiliza un controlador lógico difuso.

---

<sup>134</sup> Chen, Chi-Tsong, 1984, *op. cit.*, Referencia 129

### 5.2.4 Respuesta escalón

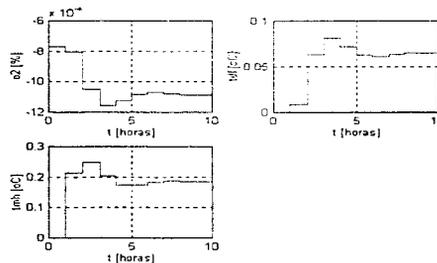
Las características de un sistema pueden ser analizadas cuando se le aplica una señal de entrada a la que habitualmente está sometido en condiciones normales de operación. Las señales de entrada de prueba más comúnmente utilizadas son las funciones escalón, funciones rampa, funciones aceleración, función impulso, funciones senoidales, etc. La señal de prueba utilizada está determinada por la forma de la entrada a que el sistema está sujeto más frecuentemente en condiciones normales de operación. Si las entradas a un sistema de control son funciones gradualmente variables del tiempo una función rampa del tiempo puede ser una buena señal de prueba. Del mismo modo, si un sistema está sometido a perturbaciones bruscas, una buena señal de prueba puede ser una función escalón del tiempo; y para un sistema sometido a entradas bruscas, la mejor puede ser una función impulso.<sup>135</sup>

Se seleccionó la entrada escalón ya que es así como el horno rotatorio recibe la alimentación de combustible y de pasta, por lo que se consideró como una buena prueba

Para determinar el comportamiento del sistema en lazo abierto, y para conocer algunos parámetros como el valor en estado estacionario de sus salidas, el tiempo que tardan en llegar a su estado respectivo, etc. y darle una interpretación física a la respuesta.

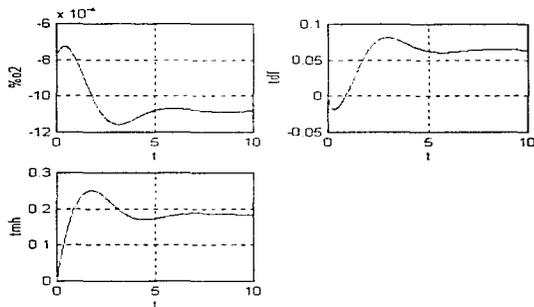
Como se observa en la Figura 5.5 cuando el combustible se incrementa, el porcentaje en los gases de salida del horno disminuye. Por otra parte, al tener una mayor combustión el horno se calienta y tanto la temperatura de ducto al filtro como la de mitad del horno aumentan. Sin embargo, debido a la localización de los instrumentos de medición de temperaturas, el valor final de la temperatura de mitad del horno es mayor a la de ducto al filtro así también el tiempo de levantamiento es menor.

**Figura 5. 5 Gráfica de la respuesta en el tiempo con el modelo discreto cuando se le aplica al sistema un escalón unitario de combustible**



<sup>135</sup> Ogata, 1993, op. cit. Referencia 132

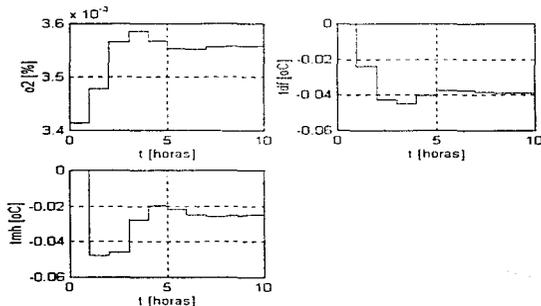
**Figura 5. 6 Gráfica de la respuesta en el tiempo del modelo continuo cuando se le aplica al sistema un escalón unitario de combustible**



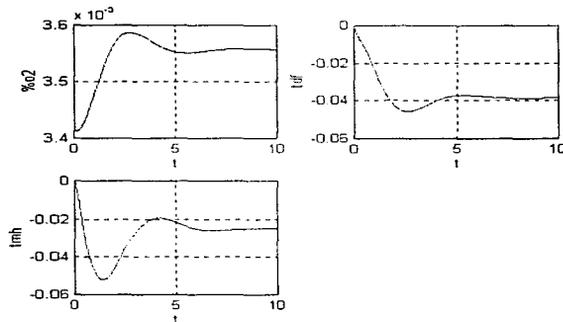
Por otra parte cuando se incrementa repentinamente la alimentación, sin ningún cambio en el combustible, el horno se enfría. Al no adicionar combustible, la combustión es menor y el porcentaje de oxígeno aumenta, mientras que las temperaturas de ducto al filtro y de mitad del horno disminuyen como se puede observar en la Figura 5. 7.

Se observa que tanto las salidas de las Figuras 5.5 y 5.6 como las salidas de la Figuras 5.6 y 5.7 no coinciden respectivamente con las entradas, lo que muestra que existen errores en estado estacionario que se pretenden disminuir con la ayuda del sistema de control.

**Figura 5. 7 Gráfica de la respuesta en el tiempo cuando se le aplica al sistema un escalón unitario de pasta (materia prima)**



**Figura 5. 8 Gráfica de la respuesta en el tiempo del modelo continuo cuando se le aplica al sistema un escalón unitario de pasta (materia prima)**



Como se aprecia en las figuras anteriores, el modelo representa de manera muy burda el comportamiento real de los fenómenos que se llevan a cabo dentro del horno, sin embargo, una de las principales incertidumbres respecto al modelo se deben al tiempo de muestreo utilizado que fue el que los operadores registran en su reporte de operación.

## Capítulo 6.

### Controlador Lógico Difuso

La metodología para diseñar controladores lógicos difusos (CLD) es muy útil en el análisis de procesos muy complicados a través de las técnicas cuantitativas convencionales o cuando las fuentes de información disponibles son interpretadas de manera cualitativa, inexacta o imprecisa. De esta forma, el control basado en lógica difusa es una aproximación entre el control matemático preciso convencional y el mecanismo de razonamiento humano. En esencia el controlador difuso proporciona un algoritmo que permite convertir estrategias de control verbales basadas en el conocimiento de operadores expertos en estrategias de control automático, que en algunos casos tiene un desempeño superior a los algoritmos de control convencionales.

Se ha comprobado en algunos procesos químicos lentos como el del cemento que los controladores difusos tienen un desempeño tan bueno o mejor que los controladores proporcionales, integrales y derivativos (PID), y no requieren de un modelo matemático detallado.<sup>137</sup>

Otra ventaja importante de los controladores difusos es que su tiempo de desarrollo es menor, ya que el conocimiento acerca de un proceso o de las estrategias de control disponible son más fáciles de expresar en términos lingüísticos accesibles para el control difuso, que trasladarlo a un lenguaje matemático con ecuaciones diferenciales o algoritmos de control convencionales. Es muy importante la manera en que este conocimiento es adquirido, codificado y probado para obtener las mejores soluciones.

En este capítulo se explican los conceptos básicos de la lógica difusa en la sección 6.1 y del diseño de los controladores difusos en la sección 6.2. En la sección 6.3 se describe cómo se diseñó el controlador difuso para el horno, y por último en la sección 6.4 se presentan las simulaciones del controlador difuso utilizando el modelo propuesto en capítulos anteriores.

Es importante mencionar que este control de horno es adecuado únicamente cerca del punto de operación, si se sale de ese rango, ya no es aplicable, y el operador tiene que actuar para restaurar la estabilidad en el horno.

---

<sup>137</sup> King, P.J. y E. H. Mamdani, "The application of Fuzzy Control Systems to Industrial processes" en *Automatica*, vol. 13, Gran Bretaña, 1977, p. 235-242

### 6.1 Lógica Difusa

La lógica es la ciencia que estudia las condiciones de validez de una inferencia y, en general, de una argumentación cualquiera. En otras palabras, la Lógica es la formalización del pensamiento humano.

Para definir una lógica hay que determinar las variables o enunciados elementales, los conectivos que permiten unir las variables para formar enunciados compuestos o sentencias. Además se tienen los axiomas que son enunciados básicos pertenecientes a la lógica que estamos definiendo, y las reglas operativas que permiten derivar un enunciado de otro. Con todos estos elementos se tienen los teoremas que son sentencias a las cuáles se les aplica consecutivamente las reglas operativas para demostrarlos. Y por último, para interpretar las sentencias se tiene la semántica, la cuál necesita definir un conjunto de valores, mínimo de dos elementos (verdadero, falso), y un conjunto de operaciones cerradas con los elementos del conjunto, de tal manera que a cada variable le corresponda un valor semántico y a cada conectivo una operación.<sup>138</sup>

La lógica difusa surge como un intento de formalización del razonamiento con incertidumbre; al contrario que otras formas de razonamiento, intenta abordar problemas definidos en términos lingüísticos, y por tanto imprecisos, donde los datos están expresados en términos cualitativos.

Cuando se tiene que analizar sistemas humanísticos o sistemas cuya complejidad es comparable a los sistemas humanísticos, no es adecuado utilizar las técnicas tradicionales debido a la imprecisión del pensamiento y comportamiento humano. En estos casos es mejor utilizar una metodología que sea tolerante a la imprecisión y a verdades parciales, como la que emplean los seres humanos.

De manera análoga a la lógica tradicional, la lógica difusa utiliza variables, conectivos, sentencias, reglas, etc., pero su semántica, es decir, la manera en que interpreta las sentencias, se basa en el concepto difuso donde los conjuntos no tienen fronteras muy delimitadas.

#### 6.1.1 Definiciones y propiedades

En la lógica clásica, un conjunto está formado por todos los posibles valores de un parámetro dentro de un intervalo bien definido, es decir, un elemento pertenece o no a este conjunto. Mientras que para la lógica difusa este intervalo es más ambiguo, un elemento puede pertenecer a dos o más conjuntos con cierto grado de pertenencia ( $\mu$ ) y su transición es gradual.

Un **conjunto difuso**  $F$  que existe en un universo  $U$  está caracterizado por una función de pertenencia  $\mu_F$  el cuál puede tomar valores en el intervalo entre  $[0,1]$ . Un conjunto difuso es una generalización de los conjuntos tradicionales cuya función de pertenencia sólo toma dos valores  $\{0,1\}$ , 0 cuando el elemento no pertenece al

---

<sup>138</sup> Jiménez A. y Fernando Matia. *Aplicaciones de Fuzzy Logic en tiempo real*

conjunto y 1 cuando sí pertenece.<sup>139</sup> Matemáticamente un conjunto difuso  $F$  es representado como un conjunto de pares ordenados de un elemento genérico  $u$  y el grado al que pertenece al conjunto  $\mu_F(u)$  :

$$F = \{(u, \mu_F(u)) | u \in U\}$$

Cuando  $U$  es continuo, un conjunto difuso  $F$  se representa como :

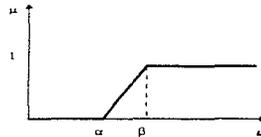
$$F = \int_U \mu_F(u) / u \quad (6.1)$$

Cuando  $U$  es discreto, el conjunto difuso  $F$  se representa como :

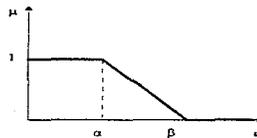
$$F = \sum_{i=1}^n \mu_F(u_i) / u_i \quad (6.2)$$

Como se mencionó anteriormente una función de pertenencia  $\mu_F(u)$  indica el grado de compatibilidad del elemento  $u$  en el conjunto  $F$ . Estas funciones pueden adoptar diversas formas, pero se describirán las que se utilizan más usualmente en el control difuso :

Función  $\Gamma$  : que está definida con 2 parámetros  $(\alpha, \beta)$ .



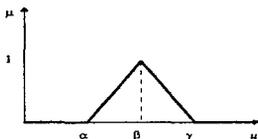
Función  $L$  : definida con 2 parámetros  $(\alpha, \beta)$ .



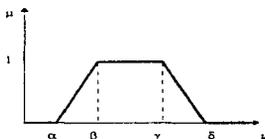
<sup>139</sup> Lee, Chuen Chien, "Fuzzy Logic in control systems : Fuzzy Logic Controller- part I" en *IEEE Transactions of systems, man y cybernetics*, vol. 20, no. 2, marzo, 1990, p. 404-415.

## Capítulo 6

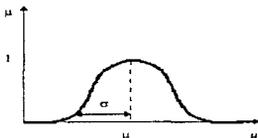
**Función triangular  $\Lambda$  :** definida con 3 parámetros  $(\alpha, \beta, \gamma)$



**Función trapezoidal  $\Pi$  :** definida con 4 parámetros  $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$  :



**Función gaussiana :** definida por 2 parámetros  $(\sigma, \mu)$



Algunas propiedades importantes sobre los conjuntos difusos son las siguientes :

**Soporte :** el soporte de  $F$  se define como el conjunto de puntos en donde  $\mu_F(u)$  es positivo.<sup>140</sup>

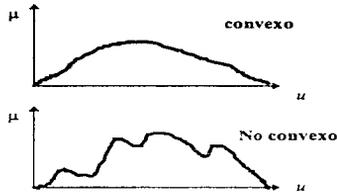
$$S(F) = \{u \in U \mid \mu_F(u) > 0\}$$

**Convexidad :** se dice que un conjunto difuso es convexo si :

$$\forall u_1, u_2 \in U \forall \lambda \in [0, 1] : \mu_F(\lambda \cdot u_1 + (1 - \lambda) \cdot u_2) \geq \min(\mu_F(u_1), \mu_F(u_2))$$

de tal manera que sólo una vez se alcance el valor máximo, lo cuál se puede apreciar mejor a través de la siguiente figura :

<sup>140</sup> Zadeh, 1973, *op. cit.*, Referencia 1



**Punto de cruce :** es elemento  $u$  de  $U$  en el que el grado de pertenencia de dos conjuntos difusos es el mismo y mayor a cero.

$$\mu_{F_1}(u_{cruce}) = \mu_{F_2}(u_{cruce}) > 0$$

**Valor pico :** es el valor que le corresponde en el dominio de la variable lingüística cuando su grado de pertenencia es igual a 1.

**Ancho :** constituye la longitud total del intervalo en el que la función de pertenencia es mayor a cero.

### 6.1.2 Operaciones con conjuntos difusos

De manera similar a la teoría clásica de los conjuntos, se definen varias operaciones sobre los conjuntos difusos.<sup>141</sup>

**Igualdad :** Dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  son iguales si y sólo si cada elemento tiene el mismo grado de pertenencia en cada uno de ellos.

$$\forall u \in U : \mu_A(u) = \mu_B(u)$$

**Subconjuntos :** un conjunto difuso  $A$  es un subconjunto de  $B$  si cada elemento  $u$  tiene un grado de pertenencia en  $A$  menor que en  $B$ .

$$\forall u \in U : \mu_A(u) \leq \mu_B(u)$$

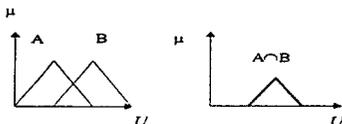
**Intersección :** la intersección de  $A$  y  $B$  se define a través de la operación mínimo o de la operación producto algebraico, al cuál le corresponde el conectivo  $\wedge$ .

$$A \cap B = \begin{cases} \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \frac{\int_C (\mu_A(u) \wedge \mu_B(u))}{u} \\ \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) = \frac{\int_C \mu_A(u) \mu_B(u)}{u} \end{cases}$$

(6. 3)

<sup>141</sup> Driankov, D., et. al., *An Introduction to Fuzzy control*, EUA, 1993, p. 85-93.

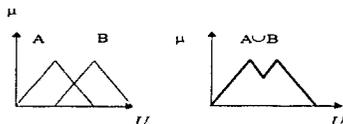
## Capítulo 6



**Unión** : la unión de A y B se define a través de la operación máximo o de la operación suma algebraica, y le corresponde el conectivo o.

$$A \cup B = \begin{cases} \max(\mu_A(u), \mu_B(u)) \\ \mu_A(u) + \mu_B(u) - \mu_A(u)\mu_B(u) \end{cases}$$

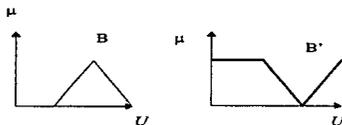
(6.4)



**Complemento** : el complemento de un conjunto difuso se calcula generalmente con la operación complemento a 1, y corresponde a la negación.

$$\mu_{A'} = \int_U \frac{(1 - \mu_A(u))}{u}$$

(6.5)



### 6.1.3. Relaciones difusas

En la teoría clásica, se considera como **relación** a un conjunto de tuplas, donde una **tupla** es un par ordenado. Un ejemplo de tupla binaria es  $(x,y)$ , una tupla  $n$ -aria se denota como  $(x_1, \dots, x_n)$ . De la misma forma, una **relación difusa** se define como un conjunto difuso de tuplas, donde cada tupla tiene un grado de pertenencia entre 0 y 1.

Una relación difusa  $R$  de un subconjunto  $U$  a un subconjunto  $V$  está determinada por una función de pertenencia bivariada  $\mu_R(u,v)$  que indica el grado de relación  $R$  del elemento  $u$  con el elemento  $v$ .<sup>142</sup> Matemáticamente esto se puede expresar para universos  $U$  y  $V$  continuos como :

$$R = \int_{u,v} \frac{\mu_R(u,v)}{(u,v)} \quad (6.6)$$

y para universos  $U$  y  $V$  discretos como :

$$R = \sum_{u,v} \frac{\mu_R(u,v)}{(u,v)} \quad (6.7)$$

Por ejemplo, sean  $X$  y  $Y$  un conjunto de personas definidas como :

$$X = \{ \text{Sofía, Nayelli} \} \quad Y = \{ \text{Nora, Eugenia} \}$$

y  $R$  es una relación de *amistad* entre los miembros  $X$  y  $Y$ , lo cuál puede expresarse como:

$$\text{amistad} = 0.9/(\text{Sofía, Nora}) + 0.5/(\text{Sofía, Eugenia}) + 0.4/(\text{Nayelli, Nora}) + 0.9/(\text{Nayelli, Eugenia})$$

Lo anterior se puede expresar en una matriz de relación de la siguiente manera:

$$\begin{array}{c} \text{Nora} \quad \text{Eugenia} \\ \text{Sofía} \begin{bmatrix} 0.9 & 0.5 \end{bmatrix} \\ \text{Nayelli} \begin{bmatrix} 0.4 & 0.9 \end{bmatrix} \end{array}$$

Las relaciones difusas son muy importantes en el control difuso ya que a través de ellas se describen las interacciones entre las variables, particularmente en las reglas 'si - entonces'.

A la combinación de conjuntos difusos y relaciones difusas se les conoce como **composición**, y se denota como:

Si  $R$  es una relación de  $U$  a  $V$  y  $S$  es una relación de  $V$  a  $W$ , entonces la composición de  $R$  y  $S$  es una relación difusa denotada como  $R \circ S$  que se define matemáticamente de la siguiente manera.<sup>143</sup>

<sup>142</sup> Zavala, R., *Control difuso de sistemas de segundo orden vectorial*, Tesis de maestría, UNAM, abril, 1996, p. 10-12.

<sup>143</sup> Zadeh, 1973, *op. cit.* Referencia 1

## Capítulo 6

$$R \circ S = \int_{u,v,w} \vee (\mu_R(u,v) \wedge \mu_S(v,w)) / (u,w) \quad (6.8)$$

donde  $\vee$  y  $\wedge$  denotan máximo y mínimo, respectivamente. Si el dominio de las variables  $u, v$  y  $w$  son conjuntos finitos, entonces la matriz de relación para  $R \circ S$  es la **composición máximo** de las matrices de relación para  $R$  y  $S$ . Por ejemplo:

$$\begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 \\ 0.4 & 0.9 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 \\ 0.3 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.8 \\ 0.4 & 0.9 \end{bmatrix}$$

### 6.1.4. Variables lingüísticas

De acuerdo a la definición de Zadeh, una variable lingüística es aquella cuyos valores son palabras o enunciados en un lenguaje común.<sup>144</sup> Por ejemplo, la edad es una variable lingüística, y sus valores son más lingüísticos (joven, muy joven, viejo, muy viejo, etc.) que numéricos (23, 25, 75...).

Una variable lingüística está caracterizada por 4 elementos :

$$(X, LX, \chi, Mx)$$

donde  $X$  denota el nombre simbólico de una variable lingüística,

$LX$  es el conjunto de valores que  $X$  puede tomar,

$\chi$  es el intervalo físico actual en el que  $X$  puede tomar valores, y

$Mx$  es una función semántica a través del cuál se asocia cada valor con su significado.

Por ejemplo, sea la velocidad de un automóvil la variable lingüística  $V$ , el conjunto  $LV$  puede tomar los siguientes valores lingüísticos: {muy lento, lento, normal, rápido, muy rápido}; el intervalo físico  $v$  es [0 km/h , 200 km/h], y si el significado del sustantivo *velocidad* es un subconjunto difuso  $M(\text{velocidad})$ , y el significado del adjetivo *rápida* es un subconjunto de  $M(\text{rápida})$ , entonces el significado de la frase *velocidad rápida* está dado por la intersección de  $M(\text{velocidad})$  y  $M(\text{rápida})$ .

### 6.1.5 Reglas y representaciones difusas

En una aproximación cuantitativa al análisis de sistemas, una dependencia entre dos variables  $x$  y  $y$  evaluadas numéricamente es expresada a través de un conjunto de enunciados condicionales de la siguiente manera:

$$\text{si } \langle x \text{ es } A \rangle \text{ entonces } \langle y \text{ es } B \rangle.$$

A la primera proposición " $x$  es  $A$ " se le conoce como **antecedente**, y se representa por un conjunto difuso  $\tilde{A} = \int_x \mu_A(x) / x$ , a la segunda proposición " $y$  es  $B$ " se le conoce

<sup>144</sup> Zadeh, 1973, *op. cit.* Referencia 1

como **consecuente**, que se representa por el conjunto difuso  $\tilde{B} = \int_Y \mu_B(y) / y$ ; y a la relación que existe entre ambas variables, la cuál está dada por una relación difusa  $\mu_R$ , se define de la siguiente manera:<sup>145</sup>

$$\forall x \in X \forall y \in Y: \mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (6.9)$$

donde '\*' puede ser un producto cartesiano o un operador de implicación difusa.

De acuerdo a Zadeh, el valor del consecuente se puede obtener matemáticamente a partir de la composición del antecedente y de la relación R que existe entre el antecedente y el consecuente, es decir, se puede inferir el conjunto difuso y a partir de la composición del conjunto difuso x y de la relación difusa R dada por:<sup>146</sup>

$$y = x \circ R$$

que se conoce como regla composicional de inferencia.

Existen varios tipos de relaciones que se utilizan para representar el significado de la implicaciones difusas *si x es A entonces y es B*. La más utilizada en el control difuso es la implicación de Mamdani, cuya definición está basada en la operación intersección. La relación R de este tipo de inferencia está definida como:

$$\tilde{R} = \tilde{A} \cap \tilde{B} \quad \mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (6.10)$$

Aplicando los conceptos vistos anteriormente se describen los mecanismos de inferencia o de disparo de reglas utilizados más comúnmente que son: la inferencia basada en la composición de un conjunto de reglas o la inferencia basada en el disparo de reglas individualmente.

La manera en que se activa una regla es la siguiente : el valor nitido de la entrada e\* de la forma:

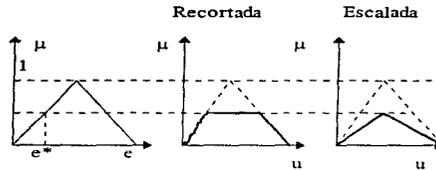
$$\forall e: \mu^*(e) = \begin{cases} 1 & \text{si } e = e^* \\ 0 & \text{cualquier otro} \end{cases} \quad (6.11)$$

se combina en un grado  $\alpha$  con el antecedente de la regla  $\mu_{LF}$ , y de la misma manera se combina con el consecuente de la regla y se obtiene una función de pertenencia  $\mu_{CLU}$  (recortada o escalada) modificada proporcionalmente a  $\alpha$  como se observa en la siguiente figura:

<sup>145</sup> Driankov, 1993, *op. cit.* Referencia 141

<sup>146</sup> Zavala, 1996, *op. cit.* Referencia 142

## Capítulo 6



En un sistema con  $n$  reglas, cada regla está representada como :

si  $e$  es  $LE^{(k)}$  entonces  $u$  es  $LU^{(k)}$ , para  $k=1, \dots, n$

donde  $LE^{(k)}$  y  $LU^{(k)}$  son las variables lingüísticas de  $E$  y  $U$  de la  $k$ -ésima regla respectivamente.

La interpretación de Mamdani de cada regla está definida como:

$$\forall k: \tilde{R}_m^{(k)} = \int_{E \times U} \min(\mu_{LE^{(k)}}(e), \mu_{LU^{(k)}}(u)) / (e, u) \quad (6.12)$$

El significado de todo el conjunto de reglas está dado por:

$$\tilde{R}_m = \bigcup_{k=1}^n \tilde{R}_m^{(k)} \quad (6.13)$$

lo que significa que

$$\forall e, u: \mu_{R_m}(e, u) = \max_k \mu_{R_m^{(k)}}(e, u) = \max_k \min(\mu_{LE^{(k)}}(e), \mu_{LU^{(k)}}(u)) \quad (6.14)$$

Al activar un conjunto de reglas a través de la operación composición se le conoce como inferencia basada en la composición y se obtiene que:

$$\tilde{U} = \mu * \circ \tilde{R}_m, \quad \forall u: \mu_U(u) = \max_k \min(\mu_{LE^{(k)}}(e^*), \mu_{LU^{(k)}}(u)) \quad (6.15)$$

O bien, resulta igual si se dispara cada regla individualmente de la forma:

$$\forall u \forall k: \mu_{U^{(k)}}(u) = \min(\mu_{LE^{(k)}}(e^*), \mu_{LU^{(k)}}(u)) \quad (6.16)$$

y se forma una unión, vía máximos, de todas las entradas:

$$\forall u: \max_k \mu_{U^{(k)}}(u) = \max_k \min(\mu_{LE^{(k)}}(e^*), \mu_{LU^{(k)}}(u)) \quad (6.17)$$

A esto se le conoce como inferencia basada en reglas individuales.

Es importante que el conjunto de reglas cumpla con las siguientes propiedades:

- *Completitud*: un conjunto de reglas de la forma *si-entonces* es completo si a cualquier combinación de valores de entrada le corresponde un valor de salida apropiado.
- *Consistencia*: un conjunto de reglas de la forma *si-entonces* es consistente si para cada antecedente, le corresponde un sólo consecuente.
- *Continuidad*: un conjunto de reglas de la forma *si-entonces* es continuo si los conjuntos difusos de salida que corresponden al consecuente de cualquier par de reglas vecinas componen un conjunto vacío.

## 6.2 El controlador difuso

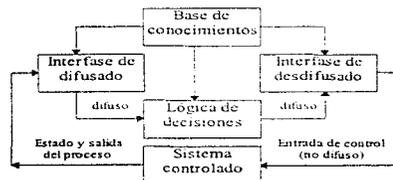
Tradicionalmente el diseño de los algoritmos de control se basa en un modelo analítico; al introducir el controlador difuso en el lazo de control permite incorporar al sistema conocimientos y experiencias que no son fácilmente descritos en un modelo matemático. Ya que en muchas ocasiones el operador puede controlar un proceso complejo de una manera más efectiva que un sistema automatizado, resulta atractivo poder incorporar las estrategias utilizadas por el operador en el control de estos procesos. Estas estrategias se basan en la intuición y la experiencia del operador, y que pueden ser recopiladas en un conjunto de reglas de decisión. Para evaluar los enunciados lingüísticos imprecisos se utilizan los conceptos de conjuntos y operaciones difusas desarrollados por Zadeh. De esta forma se obtiene una política de control cualitativo expresado lingüísticamente.

Los resultados de varios experimentos han demostrado que los controladores difusos tienen un desempeño tan bueno o mejor que los controladores PID convencionales.

Para el cálculo de la acción de control; primero, se calcula la diferencia entre las salidas reales del proceso y la salida deseada, comúnmente conocida como error; posteriormente se convierten estos valores nítidos del error en variables difusas, se evalúan las reglas de decisión utilizando mecanismos de inferencia, y por último se calcula una salida determinística de control para regular el proceso.

En esta sección se presentan los principales parámetros de diseño para un controlador difuso de acuerdo a los módulos presentados en la Figura 7. 1.

Figura 7. 1 Estructura básica de un controlador difuso



## Capítulo 6

### 6.2.1 Interfaz de difusado

En este módulo se miden las variables de entrada; se realiza una transformación escalar a través del cuál se escalan los valores físicos de las variables del proceso a un universo de discurso normalizado; y se realiza el difusado, es decir, se transforman los valores nítidos de las variables del proceso en variables lingüísticas, las cuáles son valuadas en conjuntos difusos de tal forma que la representación de las variables del proceso en conjuntos difusos sean compatibles con el antecedente de las reglas.

El principal parámetro de diseño de este módulo es el tipo de inferencia que se utiliza en la estrategia de difusado, se tienen dos opciones:

*La inferencia basada en la operación composición:* En este método las relaciones difusas que representan cada regla individual son incorporadas en una regla difusa que describe todo el significado de las reglas. Entonces la inferencia se realiza a través de la operación composición entre el valor nítido de entrada y la relación difusa.

*La inferencia basada en el disparo de las reglas individualmente:* En este método, cada regla es disparada individualmente. Primero se calcula el grado en el que se combinan el valor nítido de entrada y los conjuntos difusos que describen el significado del antecedente de la regla; y posteriormente se recorta la función de pertenencia que describe al consecuente en el grado en el que el antecedente se combinó con la entrada nítida. Finalmente, los valores recortados para la salida de control de cada regla son incorporados en un sólo valor, constituyendo el valor de toda la salida de control.

### 6.2.3 La base de conocimientos

La base de conocimientos está formada principalmente por la base de datos y la base de reglas.

#### Base de datos.

Los parámetros de diseño de este módulo son la selección de las funciones de pertenencia y de los factores de escalamiento.

*Funciones de pertenencia:* Las formas de las funciones de pertenencia más utilizadas son las triangulares, las trapezoidales y las gaussianas debido a que son fáciles de describir en base a sus parámetros, son almacenadas con poca memoria, y son manejadas eficientemente en tiempo real. Después de seleccionar su forma es necesario definir cada uno de los valores lingüísticos (propiedades) de cada variable. La definición de estos valores pueden afectar el desempeño del controlador difuso, por lo que es importante que las funciones de pertenencia cumplan con las siguientes características:

- Que sean convexas.
- Que el punto de cruce de dos funciones de pertenencia contiguas sea mayor a cero, se recomienda que sea de 0.5 ya que se tiene un mejor desempeño.

- Que sean simétricas, ya que si sus centros de área coinciden con sus valores pico al producir cambios suaves en el antecedente, el consecuente también variará ligeramente.

**Factores de escalamiento:** De manera similar a los coeficientes de ganancia de un controlador convencional, estos factores de escalamiento influyen en los posibles problemas de inestabilidad, oscilaciones y amortiguamiento.

**Cuantización:** Si la aplicación física tiene un dominio continuo, éste debe ser transformado en un dominio discreto, por lo que se tiene que fragmentar en un número finito de segmentos llamados 'niveles de cuantización'. El número de niveles de cuantización influye significativamente en el sobrepaso y el amortiguamiento.

### Base de Reglas

Los parámetros de diseño más importantes dentro de esta base son: la selección de las variables de proceso y las variables de control, el contenido del antecedente y del consecuente de las reglas, los conjuntos difusos de las variables y la derivación de las reglas.

**Selección de variables y la representación simbólica de las reglas:** El diseñar un control proporcional (P), proporcional integral (PI), proporcional derivativo (PD) o proporcional integral derivativo (PID) implica escoger tanto las variables del proceso y las variables de control como el contenido del antecedente y del consecuente de las reglas. Generalmente, las variables del proceso están representadas en el antecedente y para los controladores antes mencionados se utilizan el error ( $e$ ), el cambio del error ( $\Delta e$ ) o la suma del error ( $\delta e$ )<sup>147</sup>; y las variables de control están representadas en el consecuente, y se emplean la salida de control ( $u$ ) o el cambio en la salida de control ( $\Delta u$ ).

Una vez que se seleccionaron las variables, la forma en que se definen los controladores es el siguiente:

- Control P. La representación simbólica de una regla tipo P está dada por:  
*si e es <propiedad> entonces u es <propiedad>*
- Control PD. La ecuación simbólica de un controlador PD es:

$$u = K_p e + K_D \dot{e}$$

donde  $K_p$  y  $K_D$  son los coeficientes de ganancia proporcional y derivativa respectivamente.

La representación simbólica de una regla tipo PD es:

*si e es <propiedad> y  $\Delta e$  es <propiedad> entonces u es <propiedad>*

<sup>147</sup>  $e(k) = y_{sp} - y(k)$

donde  $y_{sp}$  es la salida deseada del proceso o punto de referencia (set point)

$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$

- Control PI: La ecuación simbólica de un controlador PI es:

$$u = K_p e + K_i \int e dt$$

donde  $K_p$  y  $K_i$  son los coeficientes de ganancia proporcional e integral respectivamente.

Si se deriva la expresión anterior respecto al tiempo se obtiene :

$$\dot{u} = K_p \dot{e} + K_i e$$

cuya representación simbólica es:

*si e es <propiedad> y Δe es <propiedad> entonces Δu es <propiedad>*

- Control PID. La ecuación que describe un controlador PID convencional es:

$$u = K_p e + K_D \dot{e} + K_i \int e dt$$

y su representación simbólica en una regla PID es:

*si e es <propiedad> y Δe es <propiedad> y δe es <propiedad> entonces u es <propiedad>*

**Selección de los conjuntos difusos:** Una variable lingüística  $X$  puede tomar un número finito de valores lingüísticos expresados verbalmente y están contenidos en un conjunto  $LX$ . Cada valor lingüístico es expresado en una tupla de la forma <signo, magnitud>, por ejemplo, <positivo grande>, <negativo pequeño>, etc. Es recomendable que se utilice un número impar de conjuntos difusos (3,5 ó 7) para que el universo de discurso sea simétrico. El número de conjuntos difusos de una variable lingüística define la resolución de la entrada, a mayor número de conjuntos difusos, mayor resolución, pero también un mayor número de reglas.

**Derivación de las reglas:** Las reglas generalmente se obtienen de la experiencia de los operadores de los procesos o de los ingenieros de control a través de una entrevista cuidadosamente organizada.

Lo anterior permite tener una primera versión de la base de reglas específicas para una aplicación particular; posteriormente se tiene que realizar una sintonización de las funciones de pertenencia y de las reglas hasta obtener una respuesta aceptable.

### 6.2.3 La lógica de decisiones

En este módulo se especifica el tipo de implicación difusa utilizada, la definición del operador composición, las interpretaciones de los conectivos 'y' y 'o', y el mecanismo de inferencia.

**Tipo de implicación difusa:** En la sección 6.1.5 se mencionó que la implicación de Mamdani es la más utilizada en los controladores difusos, sin embargo, existen otras implicaciones que definen de manera diferente la relación entre el antecedente y el

consecuente como son la implicación de Larsen, de Zadeh, de Goguen, de Gödel, de Lukasiewicz, etc.<sup>148</sup>

*Interpretación de los conectivos 'y' y 'o':* Como se mencionó en la sección 6.1.1., al conectivo 'y' le corresponde la operación intersección, la cuál se define a través de la operación mínimo o del producto algebraico. De la misma forma, el conectivo 'o' corresponde a la operación unión que se define a través de la operación máximo o de la suma algebraica. Durante el diseño del controlador es importante precisar que tipo de operación se utilizará para dichos conectivos.

*Definición de la operación composición:* Como se mencionó en la sección 6.1.3, la composición puede realizarse a través de la composición max-min.

*Mecanismo de inferencia:* En la sección 6.1.5 y en la 6.2.1. se describen la inferencia basada en la operación composición y la inferencia basada en el disparo de cada regla en forma individual. Generalmente se prefiere ésta última debido a que desde el punto de vista de cálculos computacionales es más eficiente y requiere de menos memoria.

### 6.2.4 Interfase de desdifusado

En este módulo se convierte el conjunto de valores de salida de control modificados en un valor nítido, y si este valor está normalizado es necesario transformarlo a sus valores dentro del dominio físico de aplicación.

El método utilizado para el desdifusado es el:

*Método de centro de Area (COA) o método de centro de gravedad:* Este método determina el centro de área debajo de la función de pertenencia modificada  $\mu_{CLU^*}$ . Y su valor se determina en el dominio discreto como :

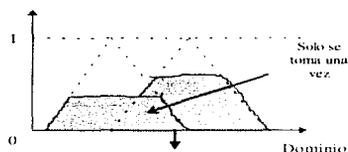
$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^l u_i \cdot \mu_{U^*}(u_i)}{\sum_{i=1}^l \mu_{U^*}(u_i)} = \frac{\sum_{i=1}^l u_i \cdot \max_k \mu_{CLU^{(k)}}(u_i)}{\sum_{i=1}^l \max_k \mu_{CLU^{(k)}}(u_i)}$$

En el dominio continuo se puede calcular como:

$$u^* = \frac{\int u \cdot \mu_{U^*}(u) du}{\int \mu_{U^*}(u) du} = \frac{\int u \cdot \max_k \mu_{CLU^{(k)}}(u) du}{\int \max_k \mu_{CLU^{(k)}}(u) du}$$

<sup>148</sup> Driankov, 1993, op. cit. Referencia 141

## Capítulo 6



Otros métodos de desdifusado son el método del centro de sumas, el cuál toma individualmente cada contribución de las áreas  $CLU^{(b)}$  y posteriormente se suman; y el método de alturas, que utiliza las funciones de pertenencia recortadas o escaladas completamente, y sólo toma el valor pico de cada una de ellas, y calcula una suma ponderada de los valores pico.

Se eligió el método de centro de áreas ya que se ha visto que permite tener resultados más confiables que los otros métodos.<sup>149</sup> Sin embargo, dentro de sus principales desventajas es que sus cálculos son complicados, por lo que requiere una mayor capacidad para realizar dichos cálculos; y que no toma en cuenta el factor de peso que se le da a las reglas cuando éstas tienen el mismo consecuente, ya que este método sólo calcula el centro de gravedad del área total formada por todas las contribuciones de los consecuentes.

### 6.3 Diseño del controlador del horno

El diseño del controlador del horno se basó principalmente en la experiencia y los conocimientos de los operadores del horno y del Ingeniero de Producción de la planta de Cementos Portland Moctezuma. De acuerdo al Ingeniero de Producción, la función del operador es mantener siempre el material calcinado, controlando la cantidad de combustible y de alimentación de materia prima. Operativamente, el horno es equilibrado de acuerdo a las necesidades térmicas, y se llega a un punto donde sólo se varía el combustible. Otra variable utilizada para controlar el horno es la velocidad de rotación del horno, sin embargo, la relación de esta variable con la alimentación de pasta se considera fija por lo que se eligió a la alimentación como variable independiente. Es importante mencionar que los enfriadores del horno analizado son de satélites, no requiere de variables adicionales para controlarlo; no obstante, con este tipo de enfriadores es necesario un buen control del horno para que su operación sea estable.

Las variables que indican las condiciones en el horno son principalmente el porcentaje de oxígeno y la temperatura en la zona de clinkerización. En la zona de clinkerización se ven los requerimientos de calor en el horno, y a través de las mediciones de oxígeno se observa que tan fácil o difícil llega el material a calcinar y si el horno se está

<sup>149</sup> Li, Y.F. y C.C. Lau. "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems" en *IEEE Control Systems Magazine*, abril, 1989, p.p. 65-72

calentando o enfriando, y de esta forma analizar si se debe aumentar o disminuir el combustible o la alimentación.

En la práctica, en el horno de cemento estudiado, el calor requerido en la zona de clinkerización es monitoreado por el operador a simple vista a través del color de la flama y el tamaño del clinker. Para un sistema automatizado, sería óptimo contar con un indicador de las temperaturas en la zona de clinkerización; ya sea con un medidor de óxidos de nitrógeno, o un pirómetro óptico. Sin embargo, los instrumentos de medición con los que cuenta la planta son: del porcentaje de oxígeno y de las temperaturas en el ducto al filtro, en la cámara de humos, y en la mitad del horno. Los medidores de estas temperaturas no se localizan en la zona de clinkerización, pero son importantes para conocer las temperaturas en áreas críticas y las condiciones de cómo llegará el material a esta zona. De acuerdo a la experiencia de los operadores de la planta, las temperaturas en las que más se fijan son en la temperatura de ducto al filtro y en la de mitad del horno.

Debido a la información con la que se cuenta, se eligió diseñar un controlador proporcional, cuya regla simbólica se definió como

*si e es <propiedad> entonces u es <propiedad>*

donde *e* es la diferencia entre la salida deseada del proceso y la salida medida, y *u* es la variable de control.

Recapitulando lo anterior, se consideraron como las variables de entrada al controlador difuso:

- El error en el porcentaje de oxígeno a la salida del horno [%] *epo2*
- El error en la temperatura de ducto al filtro [°C] *etdf*
- El error en la temperatura a la mitad del horno [°C] *etmh*

y como variables de salida del controlador :

- El caudal de combustible [litros/hora]
- Las revoluciones por hora del alimentador de pasta [rph]

El universo de discurso de las variables lingüísticas de entrada está normalizado [-1,1] y cada variable lingüística se define a través de 5 elementos:

- ng negativo grande
- n negativo
- z cero
- p positivo
- pg positivo grande

Mientras que los universos de discursos de las variables de salida del controlador no están normalizadas, el caudal de combustible está definido en un intervalo de [1500, 5000] litros por hora y las revoluciones por hora del alimentador de pasta están definidas en un

## Capítulo 6

rango de [1400, 1600] revoluciones por hora. Y cada una de ellas se compone de 5 elementos:

- malto            muy alto
- alto              alto
- normal          normal
- bajo             bajo
- mbajo          mbajo

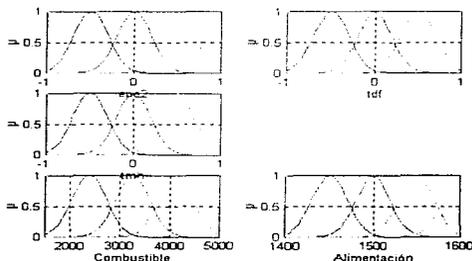
La matriz de escalamiento que se utilizó para normalizar las variables lingüísticas de entrada es:

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.009 & 0 \\ 0 & 0 & 0.014 \end{bmatrix}$$

la cuál fue sintonizada hasta obtener los mejores resultados para el valor de estado estacionario y el sobrepaso.

Para los conjuntos difusos se probaron diferentes formas de las funciones de pertenencia: triangulares, gaussianas, trapezoidales, etc. Se observó que mientras mas anchas fueron las funciones de pertenencia la respuesta mejoraba, siempre y cuando, el punto de cruce fuera igual a menor a 0.5. Al emplear funciones triangulares, el cálculo fue más rápido, sin embargo, los mejores resultados en cuanto a tiempo de levantamiento, sobrepaso y valor en estado estacionario se obtuvieron con las funciones de pertenencia de forma gaussiana tanto para las variables de entrada como para las de salida, como se puede observar en la Figura 6.1.

**Figura 6. 1 Funciones de pertenencia de las entradas y de las salidas del CLD**



A partir de la experiencia y los conocimientos de los operadores del horno y del Ingeniero de Producción, y con ayuda de un manual de operación del horno<sup>150</sup> se establecieron 125 reglas que se describen en el anexo 5.

Los conectivos 'y' y 'o' están definidos por las operaciones mínimo y máximo respectivamente. Y para la obtención de valores determinísticos a partir de las variables lingüísticas de salida se empleó el método del centro de área, que como se mencionó anteriormente permite obtener los mejores resultados respecto a otros métodos.<sup>151</sup>

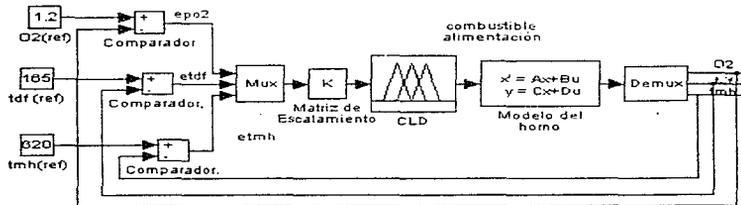
Para implantar el controlador difuso en el simulador se utilizó el *Fuzzy Toolbox* de MATLAB.

## 6.4 Simulaciones y resultados

Para analizar el desempeño del controlador difuso propuesto se realizaron simulaciones en computadora, en el paquete de simulaciones SIMULINK de MATLAB. Se integró el modelo del horno obtenido en el capítulo 5, y el controlador difuso propuesto como se observa en la Figura 6. 2.

De acuerdo a los operadores del horno es recomendable que el porcentaje de oxígeno se encuentre entre 1.2 y 1.5 %; que la temperatura de ducto al filtro se encuentre en un rango entre 160 y 170 grados centígrados, no debe ser mayor a 200 °C, ni menor a 110 °C ; y la temperatura ideal de la mitad del horno es entre 620 y 700 °C, si esta temperatura es menor a 500 °C. no se preparará bien el material, y si es mayor a 800 °C, existe un sobrecalentamiento peligroso del horno.

Figura 6. 2 Esquema del simulador del control del horno de cemento propuesto



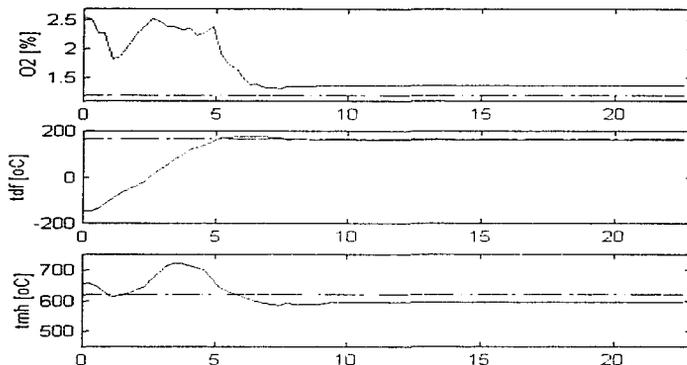
<sup>150</sup> Peray, 1972, *op. cit.* Referencia 115

<sup>151</sup> Li, Y.F. y C.C. Lau, 1989, *op. cit.* Referencia 149

## Capítulo 6

Bajo estas condiciones, se realizaron las simulaciones y se obtuvieron los siguientes resultados:

**Figura 7. 2 Variables de salida del horno --- Referencia**



Se puede observar que las variables de salida del horno se encuentran dentro de un rango permitido:

**Tabla 6.1 Resultados de las simulaciones**

Variable de salida	Valor de referencia	Valor en estado estacionario	Error en estado estacionario	Sobrepaso
Porcentaje de oxígeno	1.2 %	1.37 %	12.4 %	81.3 %
Temperatura de ducto al filtro	165 °C	162.6 °C	1.9 %	8.5 %
Temperatura de mitad del horno	620 °C	593.6 °C	4.2 %	21.7 %

Aunque parezca excesivo el error en estado estacionario y el sobrepaso del porcentaje de oxígeno, estos valores se encuentran dentro del rango normal de operación sin causar ningún problema. De acuerdo al manual de operación del horno de cemento,<sup>152</sup> un

<sup>152</sup> Peray, 172, *op. cit.* Referencia 115

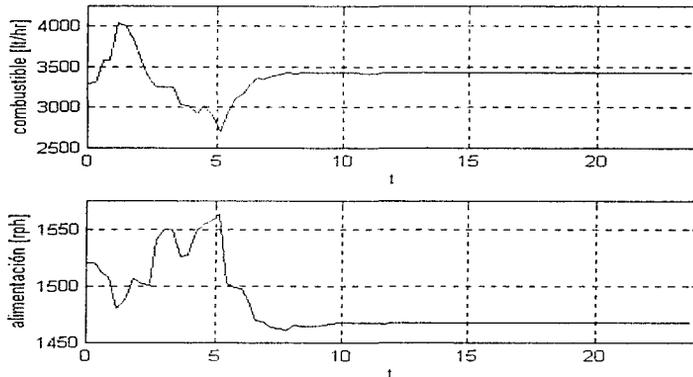
horno opera adecuadamente si el contenido de oxígeno en los gases de salida se encuentra en 0.7 y 3.5% bajo condiciones estables de operación, el rango ideal es entre 1 y 1.5 %. Si el porcentaje de oxígeno es menor a 0.7% advierte que las condiciones de combustión son ineficientes, lo que puede dar lugar a la formación de monóxido de carbono, el cuál es muy peligroso. Si es mayor a 3.5% puede indicar que existe un exceso de aire que provoca grandes pérdidas de calor y enfría la temperatura de la flama.

Por otra parte, el error en estado estacionario y el sobrepaso para la temperatura de ducto al filtro y de mitad del horno son pequeños y tampoco causan problemas operativos. Es importante mencionar que este controlador sólo es adecuado cuando trabaja alrededor de sus puntos de operación, si se sale fuera de cierto límite es necesario que el operador lo estabilice.

Como se mencionó anteriormente una de las ventajas de la automatización del horno de cemento a través de un controlador difuso es que el horno es operado con una mayor estabilidad lo que conduce a una mayor vida útil del refractario y a un ahorro del combustible.

Utilizando el controlador difuso, las variables de entrada al horno se comportan de la siguiente manera:

**Figura 6. 3 Variables de entrada al horno rotatorio (señales de control)**



De acuerdo a los datos de la planta, el caudal promedio de combustible es de 3500 litros por hora. Para poder comparar el ahorro de combustible al utilizar el controlador lógico difuso propuesto se calculó el promedio de la señal obtenida en la Figura 6. 3, obteniendo el área bajo la curva de la señal y dividiéndola entre el periodo de mediciones.

## Capítulo 6

De esta forma se obtuvo que el promedio de caudal de combustible utilizado es de 3404 litros por hora, con lo que se logra un ahorro del 2.2%.

## Capítulo 7.

### Comparación del controlador lógico difuso con un controlador de realimentación de estados

Este capítulo surgió con la idea de comparar el desempeño del controlador difuso respecto a otro esquema de control, y frente a éste resaltar sus ventajas. El esquema de control elegido es el de realimentación de estados, también conocido como método de asignación de polos.

En la sección 7.1 se describe el método de realimentación de estados que permite asignar los polos en lazo cerrado de acuerdo al comportamiento deseado del sistema. Principalmente se explica el algoritmo de Roppenecker, el cual permite calcular la matriz de ganancia de realimentación de estados a partir del conjunto de polos deseados en lazo cerrado y de un conjunto de parámetros libres.

En la sección 7.2 se describe la obtención de la matriz de ganancia de realimentación de estados basada en el algoritmo de Roppenecker para el horno rotatorio analizado y se definen los parámetros de diseño utilizados en este algoritmo.

En la sección 7.3 se realiza una comparación entre los diferentes esquemas de control del horno: el control manual a través del operador, el controlador lógico difuso y el control de realimentación de estados.

#### 7.1 Fundamentos teóricos

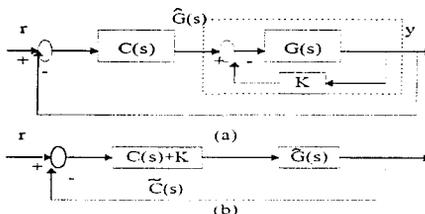
El método de retroalimentación de estados es conocido también bajo el nombre de método de ubicación de polos. Suponiendo que el sistema es lineal, invariante en el tiempo y totalmente controlable, los polos del sistema de lazo cerrado se pueden ubicar en cualquier lugar por medio de la retroalimentación de estados, a través de una matriz de ganancia de retroalimentación del estado adecuada.

Un método de asignación de polos para sistemas multivariables es propuesto por Chen<sup>153</sup> y consiste en hallar el compensador  $C(s)$  de la Figura 7. 1 de tal manera en que los polos de realimentación puedan ser asignados arbitrariamente.

---

<sup>153</sup> Chen, Chi Tsong, 1984, op. cit. Referencia 129

Figura 7. 1 Diseño de un compensador con asignación de polos



donde  $G(s)$  es una matriz de transferencia cíclica<sup>154</sup> ( $N(s)/D(s)$ ) de dimensión  $q \times p$ , cuyo denominador y numerador están formados por:

$$D(s) = D_0 + D_1s + D_2s^2 + \dots + D_n s^n \text{ y es común a todos los elementos de } G(s)$$

$$N(s) = N_0 + N_1s + N_2s^2 + \dots + N_n s^n, \text{ donde cada } N_i \text{ es un vector constante de } q \times 1$$

$C(s)$  es la matriz de transferencia del compensador ( $N_c(s)/D_c(s)$ ), y

$K$  es una matriz de ganancia de realimentación constante.

Este método es complicado y laborioso, ya que consiste en encontrar una matriz de ganancia constante  $K$  tal que la matriz de transferencia  $G(s) = (I + G(s)K)^{-1}G(s)$  sea cíclica, un vector  $t_i$  de dimensión  $p \times 1$  tal que el polinomio característico de  $G(s)$  sea igual al polinomio característico de  $G(s)t_i$ , y calcular una matriz columna de rango completo  $S_{v-1}$  a partir de una matriz  $S_m$  formada con los coeficientes de los numeradores y denominadores de la matriz  $G(s)$ , para proponer  $n+v-1$  polos donde  $v$  es el índice renglón o índice de observabilidad. Posteriormente se escribe el polinomio característico  $\Delta_c(s)$  con los polos propuestos, y se obtienen los coeficientes del numerador y del denominador del compensador resolviendo la siguiente ecuación :

$$\begin{bmatrix} D_{c0} & N_{c0} & \vdots & \dots & D_{c(v-1)} & N_{c(v-1)} \end{bmatrix} S_{v-1} = \begin{bmatrix} F_0 & F_1 & \dots & F_{n+v-1} \end{bmatrix}$$

y el compensador está dado por :

$$\tilde{C}(s) = t_i(s)C(s) + K$$

bien, se encuentra un vector  $t_i$  de dimensión  $1 \times q$  tal que el polinomio característico de  $G(s)$  sea igual al polinomio característico de  $t_i G(s)$ , y se calcula una matriz renglón de rango completo  $T_{\mu-1}$  a partir de una matriz  $T_m$  formada con los coeficientes de los numeradores y denominadores de la matriz  $G(s)$ , es decir, es la matriz traspuesta de  $S_m$ . Se proponer  $n+\mu-1$  polos donde  $\mu$  es el índice columna o índice de controlabilidad. Se escribe el polinomio característico de los polos deseados y se obtienen los coeficientes del numerador y del denominador resolviendo la siguiente ecuación :

<sup>154</sup> Una matriz de transferencia es cíclica si todos las raíces de su polinomio característico  $\Delta(s)$  son distintas.

$$\begin{bmatrix} D_0 & N_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ D_1 & N_1 & D_0 & N_0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 0 & 0 \\ D_n & N_n & D_{n-1} & N_{n-1} & \dots & D_0 & N_0 \\ 0 & 0 & D_n & N_n & \dots & D_1 & N_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & D_n & N_n \end{bmatrix} T_m = \begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix}$$

y el compensador está dado por  $\tilde{C}(s) = C(s)t_s + K$ .

Una manera más sencilla de solucionar el problema de asignación de polos no únicos para sistemas multivariables fue propuesto por Roppenecker al introducir un vector de parámetros libres. El resultado es una expresión paramétrica para la matriz de ganancia que incluye dos conjuntos de parámetros: el conjunto de polos deseados en lazo cerrado, y el conjunto de vectores de parámetros libres que no son modificados durante el algoritmo que lleva su nombre.<sup>155</sup>

Si se considera un sistema completamente controlable, invariante en el tiempo, y lineal de orden  $n$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0 \tag{7.1}$$

donde  $x(t)$  es el vector de estados de dimensión  $n$ ,

$u(t)$  es un vector de control de dimensión  $p$ , y

$A$  y  $B$  son matrices reales constantes de dimensiones apropiadas.

El algoritmo de Roppenecker realimenta el estado por medio de una matriz  $R$ , produciendo una señal de control:

$$u(t) = -Rx(t) \tag{7.2}$$

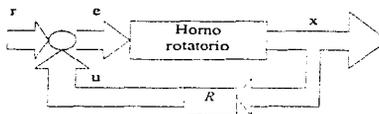
formando un sistema de lazo cerrado cuya ecuación es:

$$\dot{x}(t) = (A - BR)x(t), \quad x(t_0) = x_0 \tag{7.3}$$

<sup>155</sup> Roppenecker, G., "On parametric state feedback design" en *Int. J. Control*, vol. 43, no. 3, EUA, p. 793-796.

## Capítulo 7

**Figura 7. 2 Esquema de control de realimentación de estados con el algoritmo de Roppenecker**



Bajo la condición de que los polos en lazo cerrado deseados son todos distintos  $\lambda_{R1}, \lambda_{R2}, \dots, \lambda_{Rn}$ , el vector de estados  $x(t)$  del sistema controlado de la ecuación (7. 3) está dado como:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n x_{i0} e^{\lambda_{Ri} t} v_{Ri} \quad (7. 4)$$

donde  $\lambda_{Ri}$  consiste en cada polo de lazo cerrado y  $v_{Ri}$  es su correspondiente vector propio.

Cuando tanto los polos de lazo abierto como los de lazo cerrado no se repiten, y la matriz  $A - \lambda_{Ri} I$  no es singular, el vector propio  $v_{Ri}$  se calcula como:

$$v_{Ri} = (A - \lambda_{Ri} I)^{-1} B p_i \quad i = 1, \dots, n \quad (7. 5)$$

Con base en los valores propios de lazo cerrado y sus correspondientes vectores propios, se define una matriz  $V_R$ , que junto con la matriz  $P$  de elementos  $p_i$ , elegidos al azar, es posible hallar una matriz  $R$  de ganancia de realimentación dada por:

$$R = P V_R^{-1} \quad (7. 6)$$

Introduciendo los vectores de parámetros libres (7. 5) en la ecuación (7. 6) se tiene que:

$$R = [p_1 \mid p_2 \mid \dots \mid p_n] \left[ (A - \lambda_{R1} I)^{-1} B p_1 \quad \dots \quad (A - \lambda_{Rn} I)^{-1} B p_n \right]^{-1} \quad (7. 7)$$

## 7.2 Diseño del controlador de realimentación de estados

Se seleccionó el algoritmo de Roppenecker para calcular la matriz de ganancia de retroalimentación debido a su sencillez. Este algoritmo se implantó en el programa *roppe.m* descrito en el anexo 4, en el cuál se proponen los parámetros libres y los polos deseados de lazo cerrado, y se obtiene la matriz de ganancia  $R$  de acuerdo a la ecuación (7. 7). Posteriormente se calcula la matriz  $A$  del sistema con realimentación de estados, modificada por la matriz de ganancia  $R$ .

Los valores de los parámetros libres  $p_i$  se eligieron arbitrariamente, mientras que los polos de lazo cerrado se eligieron de tal forma que las variables de salida del horno se encontraran dentro del rango apropiado de operación.

Como se vio en el capítulo 5, los polos del sistema en lazo abierto son:

$$p_{1a}(s) = -9.1758$$

$$p_{1a2}(s) = -0.5792 + 1.1448i$$

$$p_{1a3}(s) = -0.5792 - 1.1448i$$

La respuesta deseada fue un sistema sobreamortiguado, es decir, aquél que tuviera polos reales negativos y diferentes en el plano  $j\omega$ . En un principio, los polos en lazo cerrado se eligieron de tal manera que dos polos negativos reales fueran dominantes y uno estuviera lo suficientemente alejado para que no influyera en la respuesta del sistema. Sin embargo, los resultados no fueron adecuados, por lo que se siguió experimentando con varios valores hasta encontrar los polos con los cuáles se obtuvo el mejor desempeño de este controlador, el cuál no fue muy bueno ya que la temperatura de ducto al filtro aumentaba rápidamente al acercar los polos al eje imaginario  $j\omega$  mientras que la temperatura de mitad del horno era muy baja respecto al valor adecuado y difícilmente se incrementaba.

La respuesta más adecuada del sistema se obtuvo con los siguientes polos:

$$p_{1c1}(s) = -10$$

$$p_{1c2}(s) = -6$$

$$p_{1c3}(s) = -3$$

Al cuál le corresponde una matriz de ganancia  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} 5.2684 & -24.0845 & 19.149 \\ -1.0688 & -11.1848 & 6.7635 \end{bmatrix}$$

y el vector de parámetros  $p$  elegido arbitrariamente fue:

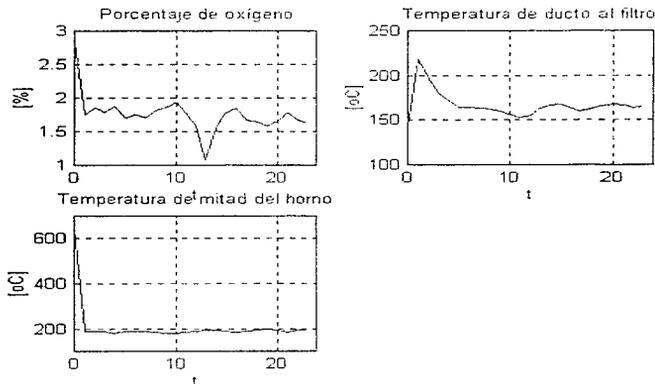
$$p = [-1 + i \quad -1 - i \quad -0.5]$$

### 7.3 Simulaciones y resultados

En esta sección se comparan los diferentes esquemas de control del horno: el control manual realizado por el operador, el controlador difuso, y el control basado en la realimentación de estados.

A continuación se presenta la respuesta del sistema realimentado que se obtuvo a partir de los polos de lazo cerrado y la matriz de ganancia mencionados en la sección anterior. Como se observa en la Figura 7. 3, el porcentaje de oxígeno y la temperatura de ducto al filtro se encuentran dentro del rango deseado; sin embargo, la temperatura de mitad del horno es mucho menor de lo que se esperaba, a pesar de que se probaron diferentes polos de lazo cerrado su respuesta no mejoró. Esta diferencia se debe principalmente a que un controlador de realimentación de estados necesita un modelo que describa con mayor precisión al sistema analizado.

**Figura 7. 3 Variables de salida del horno utilizando realimentación de estados con el algoritmo de Roppenecker**

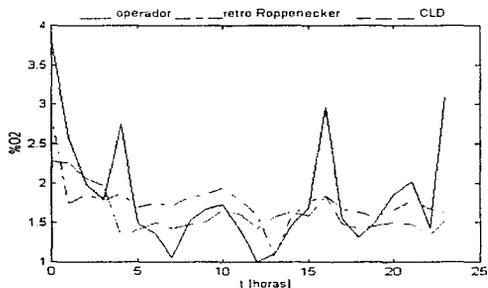


En el capítulo anterior, el objetivo del controlador difuso era mantener las variables de salida del horno (el porcentaje de oxígeno, la temperatura de ducto al filtro y la temperatura de mitad del horno) lo más cercano posible a una referencia dada, conocida como set point, a esto se le conoce como regulación. Sin embargo, para poder comparar con el esquema de control propuesto en este capítulo se utilizaron el porcentaje de oxígeno, la temperatura de ducto al filtro y la temperatura de mitad del horno del reporte de operación, para simular como se comporta el control difuso del horno siguiendo estas señales.

En la Figura 7. 4, se compara el seguimiento del porcentaje de oxígeno de los esquemas propuestos. Se observa que tanto el controlador difuso como el de realimentación

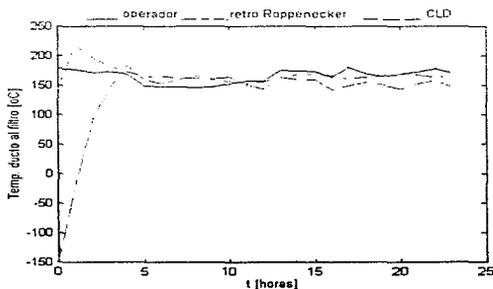
de estados se mantienen dentro del rango de operación adecuado, es decir, entre 0.7 y 3.5%, pero las variaciones del primero son menores, y se encuentran más cerca del intervalo de referencia ideal.

Figura 7. 4 Comparación del porcentaje de oxígeno bajo diferentes esquemas de control



En la Figura 7. 5 , se aprecia nuevamente que ambos esquemas de control logran que la temperatura de ducto al filtro se encuentren en el intervalo requerido. En este caso, el controlador difuso muestra un mejor seguimiento y un menor sobrepaso que la realimentación de estados, sin embargo, el valor en estado estacionario de esta última es más adecuado.

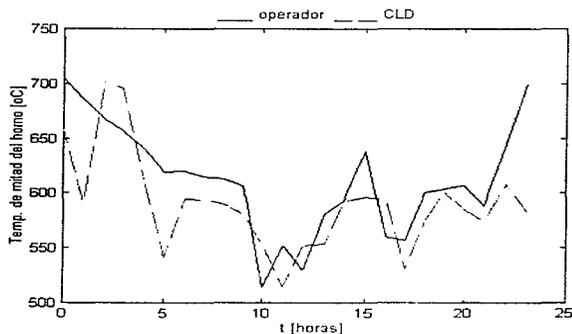
Figura 7. 5 Comparación de la temperatura de ducto al filtro bajo diferentes esquemas de control



## Capítulo 7

Por último, en la siguiente figura sólo se compara la temperatura de mitad del horno obtenida a través del controlador difuso, debido a que con la realimentación de estados esta temperatura difiere bastante del valor deseado. Se observa que el controlador difuso sigue adecuadamente la señal propuesta.

**Figura 7. 6 Comparación de la temperatura de mitad del horno bajo diferentes esquemas de control**



Como se mencionó en capítulos anteriores y como se aprecia en este capítulo una de las principales ventajas del controlador difuso es que no necesita un modelo preciso para obtener un buen desempeño, mientras que el de realimentación de estados sí lo requiere.

## Conclusiones

A lo largo de 90 años de experiencia, la industria del cemento en México ha contribuido de manera fundamental y eficiente en el desarrollo económico del país. Por otra parte, desde el punto de vista energético, es una rama industrial importante ya que por la gran demanda de combustibles y electricidad de su proceso de fabricación emplea cerca del 8% del consumo de energía del sector industrial. Es por ello, que se analizaron los cambios que se dieron en esta industria de 1982 a 1994, sus respectivas causas, y las emisiones debidas al uso de la energía.

Los cambios ocurridos en la industria del cemento se analizaron desagregando el consumo de energía en tres tipos de cambios que influyen en la demanda energética de una industria que son : *actividad, estructura e intensidad energética.*

La *actividad* que indica la evolución del PIB de esta rama industrial muestra que de 1982 a 1993, el incremento de la producción de esta industria fue superior al de la construcción, inclusive a de la industria manufacturera y al conjunto de la economía nacional. Durante el debilitamiento de la economía nacional entre 1982 y 1988, la producción de la industria cementera logró recuperarse mediante las exportaciones; actualmente aunque éstas hayan disminuido siguen en una etapa de expansión.

La *estructura* muestra la participación del PIB de la industria del cemento en el PIB manufacturero. De 1982 a 1987, durante la etapa de expansión de las exportaciones de cemento, la participación del PIB de esta rama industrial aumenta notablemente. Posteriormente el gobierno estadounidense impuso una cuota compensatoria al cemento mexicano, lo que ocasionó una disminución en las exportaciones. Sin embargo, durante estos años el consumo nacional de cemento ha aumentado, lo que ha permitido mantener una participación importante en el PIB manufacturero.

La *intensidad energética* que indica el consumo de energía por unidad de PIB ha mostrado una disminución del 28%. Esto se debió principalmente a la desaparición casi por completo del proceso de producción por vía húmeda, al incremento de la producción de cementos puzolánicos, a la modernización de las plantas existentes, y a la apertura de nuevas industrias con alta tecnología.

El cambio del proceso de producción de vía húmeda a vía seca es muy importante, ya que comparando con el consumo específico del sistema más eficiente vía seca, que cuenta con precalentadores y precalcinador, puede reducirse hasta un 50%. Actualmente sólo un 3% de la capacidad instalada del país, produce bajo este proceso de producción.

La fabricación de cementos puzolánicos permite tener un incremento en la producción de cemento con la misma cantidad de clinker, y con ello se reduce tanto el consumo de energía como las emisiones contaminantes debidas al proceso de combustión en el horno. Entre 1987 y 1990, el porcentaje de la participación de los cementos puzolánicos en la producción nacional aumentó hasta alcanzar un 42%, lo que se vio

reflejado en una disminución significativa de la intensidad energética. Es importante mencionar que una medida que ha permitido el incremento de la fabricación de cementos mezclados es la existencia de la norma mexicana NOM-C2 para la producción de cementos puzolánicos.

Por otra parte, la modernización de las plantas existentes y la apertura de nuevas plantas con los sistemas más eficientes en las etapas de calcinación (quemadores de baja emisión de óxidos de nitrógeno, precalentadores, precalcinadores), de molienda (optimización de los molinos de bolas, la introducción de molinos de rodillos y la integración de ambos tipos de molinos), en sistemas automatizados para el control de la producción y en el equipo para el control de emisiones contaminantes permitieron aumentar notablemente la producción utilizando la energía de manera más eficiente, y sin un incremento significativo en la emisión de contaminantes.

Una estrategia muy importante que se está desarrollando en esta industria para disminuir el consumo de combustibles fósiles es la sustitución parcial de estos combustibles por materiales de desecho. Esto es posible debido a las características operativas del horno que permiten recuperar energía a partir de los desechos de forma segura y controlada sin generar residuos adicionales. En México, los principales residuos utilizados son las llantas de desecho y el llamado combustible alterno que es un mezcla balanceada de nats de pinturas, solventes, tintas para impresión, resinas desengrasantes y aceites usados. Actualmente existen sólo algunas plantas que queman estos desechos en sus hornos de cemento bajo protocolos de prueba teniendo que obtener diferentes permisos ante las autoridades ecológicas y demostrar la eficiencia y seguridad del proceso.

Bajo la consideración de que el poder calorífico de las llantas es de 30 MJ/kg, si todas las llantas de desecho generadas en el país, alrededor de 225 000 toneladas, se pudieran utilizar como combustible en los hornos de cemento se podría recuperar cerca de 6750 TJ (1.61 Pcal) de energía lo que significa una reducción de 6.8% en el consumo de combustibles fósiles. Por otra parte, considerando el poder calorífico del combustible alterno de 21 MJ/kg, si las 475 mil toneladas de residuos pudieran aprovecharse para la fabricación de combustible alterno y éste se utilizara en los hornos de cemento, se recuperarían cerca de 9943 TJ (2.37 Pcal) de energía, equivalentes a un ahorro del 10.1% del consumo de combustibles fósiles. Es importante mencionar que sólo se calculó el potencial técnico de ahorro debido al alcance de la tesis; pero sería muy útil calcular el potencial real que tome en cuenta aspectos económicos de los costos de inversión para la infraestructura necesaria en la recepción, transporte, introducción de los desechos en el horno, los costos de transporte de los centros de acopio a las plantas de cemento, etc.

En cuanto a la legislación del uso de desechos como combustible en los hornos de cemento se han estado desarrollando anteproyectos de Norma Oficial Mexicana con el objetivo de reglamentar el almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y reuso de los desechos antes mencionados dándole mayor prioridad al reciclaje y al aprovechamiento de su poder calorífico. La existencia de estas normas permitiría construir una estructura que dirija el flujo de llantas de desecho y aceites usados a las plantas de cemento, dándoles una disposición final adecuada.

Una consecuencia del uso de la energía es la emisión de diversos contaminantes que afectan negativamente al medio ambiente, como son : el bióxido y el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos, el metano, los óxidos de azufre y las partículas.

Las emisiones de  $\text{CO}_2$  de esta industria se deben tanto a la etapa de decarbonatación en el proceso de fabricación como al uso de combustibles. De 1982 a 1994 estas emisiones aumentaron un 42.2% y se debieron principalmente a la producción del cemento. Por otra parte, se encontró que el comportamiento de la intensidad de las emisiones, es decir, las emisiones por unidad producida, es muy sensible a la sustitución de energéticos. De 1982 a 1985, la intensidad de las emisiones de  $\text{CO}_2$  se incrementó debido a la sustitución de gas natural por combustóleo. En ese mismo período, debido a esta sustitución también se incrementó la intensidad de las emisiones de los óxidos de azufre, y se disminuyó la intensidad de las emisiones de óxidos de nitrógeno. De 1985 a 1994, la intensidad de las emisiones de  $\text{CO}$ , se comportaron de manera similar a la intensidad energética. Como se mencionó anteriormente, estas variaciones se deben a la construcción y modernización de plantas con equipo de alta eficiencia, principalmente el uso de sistemas con precalentadores y precalcineradores : al incremento en la producción de cementos puzolánicos ; y a la disminución de la producción vía húmeda. Estos cambios en la Industria del Cemento, también favorecieron la disminución de las intensidades en las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre. Con esto, se puede concluir que la expansión y modernización de la industria cementera nacional ha sido muy eficiente.

En cuanto a la emisión de partículas, la industria del cemento está equipada en su mayoría por filtros electrostáticos que son los más adecuados para cumplir con las normas de emisión (NOM-040-ECOL-1993), además en la construcción de nuevas plantas se invierte cerca del 15% en equipos anticontaminantes.

Para analizar el cumplimiento del segundo objetivo planteado por la tesis fue necesario obtener un modelo matemático del horno, diseñar el controlador difuso y realizar las simulaciones en la computadora utilizando los paquetes MATLAB y *Simulink*. A continuación se presentan las consideraciones y conclusiones de cada etapa de la segunda parte de esta tesis.

En el horno de cemento se llevan a cabo muchas reacciones químicas, su comportamiento es no lineal y variante en el tiempo, sin embargo, debido a la complejidad de modelar un proceso con estas características y para el alcance de la tesis se simplificó a un modelo lineal e invariante en el tiempo con las variables que se consideraron más importantes de acuerdo a la experiencia de los operadores del horno y del Ingeniero de Producción de la planta.

El modelo se obtuvo a través del método de identificación de sistemas que consiste en asignar valores numéricos a un modelo matemático de tal forma que se minimice la suma de los cuadrados de la diferencia entre los valores medidos y los valores que el modelo predice. A este método se le conoce como método de predicción del error o método de mínimos cuadrados generalizados. En realidad, el número de muestras a partir del cuál

se obtuvo la identificación del horno fue reducido, y sería más conveniente manejar una muestra mayor.

Otro factor importante que influyó en la obtención del modelo fueron las variables con las que se contaron, de acuerdo a los instrumentos de medición con los que trabaja el horno. Como se mencionó anteriormente, en el horno analizado el calor requerido en la zona de calcinación es monitoreado por el hornero a simple vista a través del color de la flama y del tamaño del clinker. Sin embargo, una mejor opción sería un medidor de los óxidos de nitrógeno, los cuáles se forman instantáneamente a las temperaturas de esta zona y registran cualquier cambio de temperatura. La planta analizada no cuenta con estos medidores, cuando los requieren los solicitan a las empresas dedicadas al monitoreo de gases en la industria con fines ambientales, pero resulta muy costoso.

Es importante mencionar el controlador difuso no requiere rigurosamente tener un modelo preciso del horno, basta que este describa el comportamiento del sistema de manera burda. Por ello, aunque visualmente la salida del modelo difiere de la salida real, se consideró que era adecuado para realizar las simulaciones.

Se analizó que el modelo obtenido por identificación es estable, pero su comportamiento no es el deseado, por lo que se diseñó un sistema de control basado en lógica difusa.

El diseño del controlador difuso se basó en la experiencia de los operadores del horno, del Ingeniero de Producción y en un manual de operación del horno. Todo este conocimiento se utilizó para crear el conjunto de las reglas de decisión y los conjuntos difusos. Posteriormente se realizó una sintonización de las funciones de pertenencia y de las reglas hasta obtener una respuesta aceptable de acuerdo a la experiencia de los operadores del horno rotatorio analizado.

Se demostró que para el objetivo planteado de esta tesis el sistema de control propuesto es adecuado, ya que sin el controlador difuso el consumo promedio era de 3500 litros por hora y de acuerdo a las simulaciones realizadas, al utilizar el controlador difuso el consumo se reduciría a 3404 litros por hora, lo que equivale a una disminución del 2.2%. De acuerdo a Bentrup,<sup>156</sup> al utilizar sistemas de control en los hornos de cemento el consumo térmico puede reducirse de un 1.8% hasta un 5%.

Es importante mencionar que el esquema de control utilizado sólo tiene un buen desempeño cerca de un punto de operación particular y durante cierto tiempo. Los factores de escalamiento, los conjuntos difusos o las reglas del controlador deben ser reajustados periódicamente si existen cambios en el proceso.

Para analizar el desempeño del controlador difuso respecto a otro esquema de control, se comparó éste con un control de realimentación de estados basado en el algoritmo de Roppenecker. Se observó que el controlador difuso es adecuado tanto para regular las variables de salida del horno como para seguir las señales. Por otra parte, la realimentación de estados no controla adecuadamente un sistema definido con un modelo aproximado.

---

<sup>156</sup> Bentrup, K., 1994, op. cit. Referencia 111

mientras que el controlador difuso sí lo permite. Esta es una de las principales razones por las que se utilizó este esquema de control.

El instalar un control automático del horno, permite mantener constantes las condiciones de combustión del horno. Si se tuvieran instrumentos de medición de los óxidos de nitrógeno en tiempo real, se pueden tomar acciones que mantengan esta variable dentro de un intervalo adecuado.

Como trabajos futuros respecto al controlador difuso en el horno de cemento estudiado puede ser su implantación en el horno real a través de microprocesadores como el HC12 de *Motorola*, con microcontroladores como el PIC17XX de *Microchip Technology Inc.* o con chips difusos como el FC110 de *Togai*; y el diseño de un control difuso adaptable que permita sintonizarse automáticamente para amoldarse a los cambios que se presenten en el proceso.

## Anexo 1. Cálculo de las emisiones de carbono del CO<sub>2</sub>

Estas emisiones se calculan de acuerdo a la fuente energética utilizada; por una parte, los hidrocarburos y por otra, la electricidad.

### a. Emisiones debido a la combustión de hidrocarburos.

Los índices de emisión de carbono utilizados para los diferentes hidrocarburos son:

Fuente energética	Índice de emisión [kg C/GJ]
Combustóleo	21.3
Gas natural	15.3
Diesel	20.2
Carbón	23.8

Las emisiones, en kilogramos de carbono, se obtienen al multiplicar el consumo de energía por fuente energética, en GJ, por el índice de emisión de esa misma fuente.

### b. Emisiones producidas durante la generación de electricidad.

Primero se obtiene el índice de emisión debidas a la generación de electricidad de cada año. Se busca en el Balance Nacional de Energía, el consumo de combustibles por tipo de generación de electricidad. Inicialmente se divide el consumo energético de cada fuente entre el consumo total de energéticos para obtener los porcentajes del consumo de gas natural, de combustóleo, de diesel y de carbón en la generación de energía eléctrica. Después cada porcentaje se multiplica por el índice de emisión correspondiente y se suman. Esto lo podemos resumir en la siguiente fórmula:

Índice de emisión de la electricidad = (consumo por fuente/consumo total) \* índice de emisión por fuente

[kg C/ GJ] [kg C/GJ]

Para calcular las emisiones producidas por la electricidad debemos de tomar en cuenta las pérdidas en la generación, transformación y distribución de la energía eléctrica. Estas pérdidas se consideran constantes, y se estiman en un 70% de la energía eléctrica consumida.

Emisiones de carbono= (consumo de electricidad / 0.3) \* índice de emisión de la electricidad

[kg C] [GJ] [kg C/GJ]

### Índices de emisiones por contaminantes

Fuente energética	NOx	CH <sub>4</sub> [kg. de contaminante/TJ]	SO <sub>2</sub>
Gas natural	1111	1.1	0.2135
Combustóleo	527	1.0	1358.6

**Anexo 2.**

**Datos de la industria cementera  
mexicana de 1982 - 1994**

## INDUSTRIA DEL CEMENTO

[Pcal]

	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
diesel	0	0	0	0	0	0	0 214	0 232	0 239	0	0	0	0	0
combustible	10 908	11 342	15 340	17 530	17 756	19 651	19 927	16 550	18 781	19 895	20 519	20 422	20 623	19 476
total petroliferos	10 908	11 342	15 340	17 530	17 756	19 651	20 141	16 782	19 020	19 985	20 519	20 422	20 623	19 476
gas natural	11 101	7 901	5 353	6 243	3 038	1 833	2 658	1 603	2 764	2 372	3 541	3 123	2 792	2 637
electricidad	2 112	1 999	2 291	2 500	2 379	2 302	2 587	2 359	2 238	2 792	2 856	2 944	3 312	3 128
total	24 122	21 242	22 984	26 274	23 173	23 786	25 386	22 744	24 022	25 059	26 619	26 489	26 727	25 241
C.E. total	1 000	0 861	0 653	1 089	0 961	0 986	1 052	0 943	0 996	1 039	1 104	1 098	1 108	1 046

Fuente: 1982 - 1985 Anuario de la Industria del Cemento. Canacem: 1987

1986 - 1993 Balance de energía, SEMIP

[PJ]

diesel	0 000	0 000	0 000	0 000	0 000	0 000	0 890	0 971	1 001	0 000	0 000	0 000	0 000	0 000
combustible	45 670	47 487	64 227	73 395	74 341	82 275	83 430	77 665	78 632	83 296	85 909	85 503	86 344	81 542
gas natural	46 478	33 080	22 411	26 139	12 719	7 674	11 129	6 711	11 572	9 931	14 825	13 075	11 690	11 041
electricidad	8 844	8 369	9 592	10 468	9 960	9 638	10 631	9 877	9 370	11 690	11 958	12 326	13 667	13 096
total	100 992	88 936	96 230	110 002	97 021	99 587	106 286	95 225	100 575	104 917	111 446	110 904	111 901	105 679

Porcentaje del consumo de energéticos en la industria del cemento

dies%							0 843	1 029	0 995					
comb%	45 221	53 395	66 743	66 722	76 624	82 616	78 485	81 500	78 182	79 393	77 084	77 096	77 162	77 160
gas%	46 021	37 195	23 289	23 762	13 110	7 766	10 470	7 048	11 506	9 466	13 303	11 790	10 448	10 447
elec%	8 757	9 410	9 668	9 516	10 266	9 678	10 191	10 372	9 316	11 142	10 729	11 114	12 392	12 393

## ENERGIA CONSUMIDA EN LA INDUSTRIA MANUFACTURERA

[Pcal]

bagazo de caña		18 388	17 606	19 262	20 802	18 789	18 409	17 391	19 047	16 693	19 299	17 401	20 284
coque		19 731	20 486	16 317	16 95	13 075	16 231	14 452	13 012	14 921	15 011	16 717	16 727
total comb. sol		38 119	38 092	35 579	37 752	31 864	34 64	31 843	32 659	31 614	34 27	33 485	39 011
gas licuado		3 639	3 772	3 722	3 351	3 445	3 617	3 658	3 831	4 132	4 217	4 359	3 972
kerosinas		1 03	0 908	1 195	0 876	0 676	0 783	0 615	0 468	0 521	0 261	0 27	0 258
diesel				9 816	7 039	6 97	8 607	8 395	9 697	15 41	14 352	12 272	15 458
combustible				80 27	68 142	62 017	70 47	73 05	66 69	63 116	62 099	59 575	53 524
total petroliferos				74 944	79 408	73 108	82 877	85 708	80 606	83 179	80 939	76 486	73 212
gas natural				116 304	119 865	114 571	104 712	116 316	128 808	123 82	125 06	141 045	151 487
electricidad				36 323	35 732	35 969	37 764	39 892	41 023	41 487	42 431	46 467	49 251
total				263 17	272 757	255 512	259 993	275 759	282 796	280 2	282 7	297 483	312 961

INDUSTRIA DEL CEMENTO

	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
%E. cemento/E. Manul					8 805	8 721	9 935	8 748	8 711	8 861	9 500	9 370	8 984	9 071

Fuente: Balanza de energía, SEMP

PIR DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

	millones de nuevos pesos													
precios constant base 1980=100	13 62	12 04	13 04	14 80	14 77	17 02	17 01	17 48	17 77	18 61	19 98	20 50		
precios constant base 1986=100	291 27	257 51	278 67	320 46	315 90	363 89	363 63	373 73	380 04	397 88	427 28	438 37		
	millones de dolares													
precios constant 1 dolar=N\$ 0 61 18 base 1986=100	476 08	420 90	455 61	523 80	516 35	594 78	594 36	610 87	621 19	650 51	698 39	716 53		
Actividad	1 000	0 884	0 957	1 100	1 085	1 249	1 248	1 283	1 305	1 366	1 467	1 505		

Fuente: Sistema de Cuentas Nacionales, INEGI.

Calculos en el archivo gib2.wk1

PRODUCCION DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

	miles de toneladas													
	19293	17086	18436	20680	19751	22347	22513	23333	23824	25002	26700	27142 26	29674 236	23971 05

Fuente: Sexto Informe de Gobierno (1982-1993), Cámara Nacional del Cemento(1994)

INTENSIDAD ENERGETICA

	kcal/Dolar producido													
indexado base 1	50666 782	50468 457	50424 259	50159 891	44878 890	39991 165	42711 483	37232 089	36671 029	38521 892	38114 717	36968 393		
	1 000	0 956	0 995	0 990	0 886	0 789	0 843	0 735	0 763	0 760	0 752	0 730		
	kcal/kg													
int. energética in	1249 950	1243 245	1246 695	1270 482	1173 257	1064 393	1127 615	974 757	1008 311	998 685	996 966	975 932	900 680	1052 978
	1 000	0 995	0 997	1 016	0 939	0 852	0 902	0 780	0 807	0 799	0 798	0 781	0 721	0 842
	GJ/ton													
	5 233	5 205	5 220	5 319	4 912	4 456	4 721	4 081	4 222	4 181	4 174	4 086	3 771	4 409
	kcal/kg													
consumo mínimo	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000	430 000

Fuente: Energy Conservation in cement industry, 1982

## INDUSTRIA DEL CEMENTO

	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
--	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

## PIB TOTAL

millones de dolares

precios constant base 1986	132525.81	127021.63	131580.64	135007.56	130003.27	132154.19	131559.91	137810.56	143918.72	149845.54	154048.57	157825.90	160674.30	
----------------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	--

## PIB MANUFACTURERO

millones de dolares

precios constant base 1986	33025.683	30430.841	31962.738	33913.584	32110.167	33058.750	34097.438	36859.530	38841.200	40400.065	41316.725	40583.180	42492.510	
								33153.670						

## ESTRUCTURA

PIBcem/PIBmanufac

base 1986	0.014	0.014	0.014	0.015	0.016	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.017	0.018		
Estructura	1.000	0.959	0.989	1.071	1.115	1.248	1.209	1.150	1.109	1.117	1.173	1.225		

PIBcem/PIBnac

					0.004	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005		
PIBdol index	1.000	1.152	1.151	1.163	1.203	1.260	1.353	1.388						
PIBton index	1.000	1.131	1.140	1.161	1.206	1.270	1.352	1.374						

## CAPACIDAD INSTALADA

miles de toneladas

	25655	30666	30942	32539	32922	32861	32881	32591	27800	31308	32070	35500	39500	
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--

\* Se puso el mismo que 1988

Fuente: Anuario Canacem 1987, 1994 North American Cement Directory, Cámara Nacional del Cemento

## INTENSIDAD ENERGÉTICA POR COMBUSTIBLE

[kcal/kg]

combustible	565.246	663.829	832.086	847.689	898.992	879.357	885.133	795.011	788.323	792.882	768.502	752.406	694.980	812.480
gas natural	575.241	462.425	290.343	301.890	153.815	82.024	118.085	69.701	116.017	94.532	132.622	115.060	94.088	110.008
electricidad	109.453	116.690	124.265	120.904	120.450	103.912	114.911	101.101	93.939	111.271	106.966	108.468	111.612	130.491
gas nat index	1.000	0.804	0.505	0.525	0.267	0.143	0.205	0.119	0.202	0.164	0.231	0.200	0.164	0.191
comb. index	1.000	1.174	1.472	1.500	1.590	1.556	1.565	1.406	1.395	1.403	1.360	1.331	1.230	1.437
elect. index	1.000	1.069	1.135	1.105	1.100	0.941	1.050	0.924	0.858	1.017	0.977	0.991	1.020	1.192

**Anexo 3.**

**Reporte de operaciones de**

**la planta de cemento**

**Portland Moctezuma, S.A. de C.V.**



20,62  
12,245  
= 842 (520)  
1.63

Fecha: MICHOACÁN 10 DE SEPTIEMBRE DE 1962.

REPORTE DE OPERACION DEL HORNO 3

N.º	C.º	M.º	COMBUSTIBLE				NORIA				MOLINO				ANABRABES				HORNOS				TEMPERATURAS				CIMENTOS				CLASER		TOTAL
			kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	
7			175	3316	1350	22	117	347	64	51221	1550	130	25	152	33	386	177	97	70	154	61	162	79	205	255	124	90	90	90			21	
8			174	3287	1328	22	117	345	67	51210	1550	130	25	152	33	386	177	97	70	154	61	162	79	205	255	124	90	90	90			21	
9	350	71	147	3018	1370	22	117	347	64	51200	1550	130	25	152	33	387	177	97	70	154	61	162	79	205	255	124	90	90	90			21	
10			145	3347	1324	23	113	377	64	51322	1550	130	25	152	33	385	161	85	95	150		151	77	194	242	202	90	90	90			21	
11	337	71	128	3319	1327	22	120	374	64	51315	1550	130	25	152	33	392	167	83	90	151	70	152	70	193	249	202	90	90	90			21	
12			126	3317	1311	22	120	373	64	51311	1550	130	25	152	33	386	167	85	90	151	70	152	70	193	249	202	90	90	90			21	
13	331	71	125	3324	1309	23	120	373	64	51314	1550	130	25	152	33	387	167	85	90	151	70	152	70	193	249	202	90	90	90			21	
14			125	3324	1309	23	120	373	64	51315	1550	130	25	152	33	386	167	85	90	151	70	152	70	193	249	202	90	90	90			21	
15			143	11905	3505	23	120	1405	64	524115	1550	130	25	152	33	394	172	87	91	154	69	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
16			144	11920	3495	23	120	1402	64	523709	1550	130	25	152	33	382	172	87	91	154	69	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
17			144	11610	3385	23	120	1407	64	523330	1550	130	25	152	33	381	171	86	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
18			144	11405	3335	23	121	1413	64	523160	1550	130	25	152	33	383	171	86	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
19			144	12045	3510	23	120	1421	64	523070	1550	130	25	152	33	381	171	86	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
20			142	12070	3505	22	120	1400	64	523170	1550	130	25	152	33	383	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
21			142	12175	3525	23	120	1410	64	523150	1550	130	25	152	33	383	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
22			142	12300	3545	23	120	1420	64	523150	1550	130	25	152	33	383	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
23			142	11975	3525	22	115	1407	64	523140	1550	130	25	152	33	382	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
24			144	11720	3475	23	120	1402	64	523209	1550	130	25	152	33	382	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
1	331	71	124	11450	3375	23	120	1405	64	523240	1550	130	25	152	33	383	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
2			124	11400	3365	23	120	1400	64	523230	1550	130	25	152	33	382	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
3	310	71	124	11200	3310	23	120	1400	64	523230	1550	130	25	152	33	382	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
4			124	11200	3310	23	120	1400	64	523230	1550	130	25	152	33	382	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
5	331	71	124	11200	3310	23	120	1400	64	523230	1550	130	25	152	33	382	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
6			124	11200	3310	23	120	1400	64	523230	1550	130	25	152	33	382	172	87	91	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	
7			118	11300	3210	22	118	1394	64	523260	1550	130	25	152	33	387	174	91	94	154	70	150	71	194	245	202	90	90	90			21	

## Anexo 4. Programas en Matlab

### param.m

#### Programa para la obtención del modelo param.m

Programa que calcula los parámetros  $\theta_i$  a partir de los datos observados.

```
echo on
```

```
% Salidas: y1 porcentaje de oxígeno, y2 temp. ducto al filtro, y3 temp. mitad del horno
```

```
% Entradas: u1 combustible u2 alimentación
```

```
load c:\o2h3aa.wav  
load c:\tdfh3aa.wav  
load c:\tmhh3aa.wav  
load c:\combh3aa.wav  
load c:\alimh3aa.wav
```

```
y = [o2h3aa tdfh3aa tmhh3aa];
```

```
u = [combh3aa alimh3aa];
```

```
z=[y u];
```

```
pause, idplot(z,[],2,3),pause
```

```
clc
```

% En nuestro caso consideramos  $x_1$  como el porcentaje de oxígeno y  $x_2$  como la temperatura % ducto al filtro,  $x_3$  como la temperatura de mitad del horno y consideramos el siguiente % modelo en variables de estado (pag. 1-35, manual de Matlab Ident. Toolbox).

```
%           | th1 th2 th3 |           | th10 th11 |  
%           |           |           |           |  
% x(k+1) = | th4 th5 th6 | x(k) + | th12 th13 | u(k)  
%           |           |           |           |  
%           | th7 th8 th9 |           | th14 th15 |  
  
%           | th16 0 0 |           | th19 th20 |  
%           |           |           |           |  
% y(k) = | 0 th17 0 | x(k) + | 0 0 | u(k)  
%           |           |           |           |  
%           | 0 0 th18 |           | 0 0 |
```

#### Anexo 4

```
%  
% Se estimarán los parámetros theta a partir de los datos observados  
pause  
  
%   PARAMETROS LIBRES  
%   Definiendo la estructura de acuerdo a la descripción general  
  
%    $x(k+1) = A x(k) + B u(k)$   
%  
%    $y(k) = C x(k) + D u(k)$   
pause  
  
%   Los parámetros que se van a estimar se escriben como NaN  
%   De esta forma tenemos que  
  
A=[NaN NaN NaN  
NaN NaN NaN  
NaN NaN NaN];  
B=[NaN NaN  
NaN NaN  
NaN NaN];  
C=[NaN 0 0  
0 NaN 0  
0 0 NaN];  
D=[NaN NaN  
0 0  
0 0];  
K=[0 0 0  
0 0 0  
0 0 0];  
X0=[3.82  
179  
705];  
%X0 es el valor inicial del vector de estados  
  
%   La estructura del modelo está definida por:  
  
ms = modstruc(A,B,C,D,K,X0);pause  
  
%   Se debe establecer un vector inicial a partir del cuál va comenzar a buscar los  
%parámetros.  
  
% El numero de parametros que necesita th_guess, es el número de NaN que se puso en el  
%modelo a estimar. Es importante tener una idea de los valores que se le van a poner.
```

```
th_p=[-8.202,49.15,0.9721,9.8539,-65.1672,-7.8511,15.5433,-99.6527,-11.6907,-0.633,-  
0.30846,1.7077,0.4639,2.7177,0.6526,0.0025,-0.774,0.9016,0.001,0.001];
```

```
pause
```

```
% Ahora a través de la función ms2th se va poner esta información en un formato theta
```

```
model = ms2th(ms.'d',th_p,[]);
```

```
pause
```

```
% En nuestro caso el intervalo de muestreo es 1.
```

```
% El error de predicción (máxima similitud) que sirve para estimar los parámetros es  
%calculado a través de :
```

```
pause. model = pem(z,model);
```

```
% Los resultados se despliegan con el comando 'present'.
```

```
% Apriete una tecla para continuar.
```

```
pause, present(model), pause
```

```
% Para evaluar la calidad del modelo, se puede simular el modelo con la entrada actual  
%y compararlo con al salida actual.
```

```
% Apriete una tecla para continuar.
```

```
pause, yh=compare(z,model); pause
```

```
[par,p,lam]=th2par(model);
```

```
[A,B,C,D,K,X0]=th2ss(model);
```

## Roppe.m

**Programa que calcula la matriz de ganancia de retroalimentación utilizando el algoritmo de Roppenecker**

```
a=[-2.0533  9.9428 -3.3849  
    0.8898 -6.5462 -1.3313  
    1.8455 -10.1279 -1.7346];
```

```
b=[0.361 -0.0661  
    0.2202  0.0597  
    0.5245 -0.0117];
```

```
c=[.0006  0  0  
    0  -.8167  0  
    0  0  0.933];
```

```
d=[-0.0008  0.0034  
    0  0  
    0  0];
```

```
load c:combh3aa.wav  
load c:alimh3aa.wav
```

```
t=0:1:23;  
u=[combh3aa alimh3aa];  
j=sqrt(-1);
```

```
%Calcular algoritmo de Roppenecker  
%para polos deseados
```

```
%Polos deseados:  
lr1=-10; %era -450  
lr2=-6; %era -460  
lr3=-0.3; %era 100
```

```
%Parametros libres:  
p1=[-1+j;0];  
p2=[-1-j;0];  
p3=[0;-.5];
```

```
p=[p1(:) p2(:) p3(:)];  
i3=eye(3);
```

```
vr1=inv(a-lr1*i3)*b*p1;
vr2=inv(a-lr2*i3)*b*p2;
vr3=inv(a-lr3*i3)*b*p3;

vr=[vr1(:) vr2(:) vr3(:)];
wr=inv(vr);
r=p*wr;
r=real(r);
ar=a-(b*r);
eig(ar);
axis([0..2,0..13])
[y,x]=lsim(ar,b,c,d,u,t);
title('Respuesta con retro ROPPENECKER')
grid
```

## **Anexo 5. Reglas de decisión para el controlador difuso del horno rotatorio de cemento**

Estas reglas se obtuvieron a partir de la experiencia y los conocimientos de los operadores del horno y del Ingeniero de Producción, y con la ayuda de un manual de operación del horno.

1. If (epo2 is pg) and (etdf is pg) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
2. If (epo2 is pg) and (etdf is pg) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
3. If (epo2 is pg) and (etdf is pg) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
4. If (epo2 is pg) and (etdf is pg) and (etmh is n) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
5. If (epo2 is pg) and (etdf is pg) and (etmh is ng) then (comb is normal)(alim is alto) (1)
6. If (epo2 is pg) and (etdf is p) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
7. If (epo2 is pg) and (etdf is p) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
8. If (epo2 is pg) and (etdf is p) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
9. If (epo2 is pg) and (etdf is p) and (etmh is n) then (comb is normal)(alim is alto) (1)
10. If (epo2 is pg) and (etdf is p) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
11. If (epo2 is pg) and (etdf is z) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
12. If (epo2 is pg) and (etdf is z) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
13. If (epo2 is pg) and (etdf is z) and (etmh is z) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
14. If (epo2 is pg) and (etdf is z) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
15. If (epo2 is pg) and (etdf is z) and (etmh is ng) then (comb is mbajo)(alim is alto) (1)
16. If (epo2 is pg) and (etdf is n) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
17. If (epo2 is pg) and (etdf is n) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
18. If (epo2 is pg) and (etdf is n) and (etmh is z) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
19. If (epo2 is pg) and (etdf is n) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
20. If (epo2 is pg) and (etdf is n) and (etmh is ng) then (comb is mbajo)(alim is bajo) (1)
21. If (epo2 is pg) and (etdf is ng) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
22. If (epo2 is pg) and (etdf is ng) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
23. If (epo2 is pg) and (etdf is ng) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
24. If (epo2 is pg) and (etdf is ng) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
25. If (epo2 is pg) and (etdf is ng) and (etmh is ng) then (comb is mbajo)(alim is malto) (1)
26. If (epo2 is p) and (etdf is pg) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
27. If (epo2 is p) and (etdf is pg) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
28. If (epo2 is p) and (etdf is pg) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
29. If (epo2 is p) and (etdf is pg) and (etmh is n) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
30. If (epo2 is p) and (etdf is pg) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
31. If (epo2 is p) and (etdf is p) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
32. If (epo2 is p) and (etdf is p) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
33. If (epo2 is p) and (etdf is p) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
34. If (epo2 is p) and (etdf is p) and (etmh is n) then (comb is normal)(alim is alto) (1)
35. If (epo2 is p) and (etdf is p) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
36. If (epo2 is p) and (etdf is z) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)

## Anexo 5

37. If (epo2 is p) and (etdf is z) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
38. If (epo2 is p) and (etdf is z) and (etmh is z) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
39. If (epo2 is p) and (etdf is z) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
40. If (epo2 is p) and (etdf is z) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
41. If (epo2 is p) and (etdf is n) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
42. If (epo2 is p) and (etdf is n) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
43. If (epo2 is p) and (etdf is n) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
44. If (epo2 is p) and (etdf is n) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
45. If (epo2 is p) and (etdf is n) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
46. If (epo2 is p) and (etdf is ng) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
47. If (epo2 is p) and (etdf is ng) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
48. If (epo2 is p) and (etdf is ng) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
49. If (epo2 is p) and (etdf is ng) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
50. If (epo2 is p) and (etdf is ng) and (etmh is ng) then (comb is mbajo)(alim is alto) (1)
51. If (epo2 is z) and (etdf is pg) and (etmh is pg) then (comb is alto)(alim is mbajo) (1)
52. If (epo2 is z) and (etdf is pg) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is bajo) (1)
53. If (epo2 is z) and (etdf is pg) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
54. If (epo2 is z) and (etdf is pg) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
55. If (epo2 is z) and (etdf is pg) and (etmh is ng) then (comb is mbajo)(alim is alto) (1)
56. If (epo2 is z) and (etdf is p) and (etmh is pg) then (comb is alto)(alim is bajo) (1)
57. If (epo2 is z) and (etdf is p) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
58. If (epo2 is z) and (etdf is p) and (etmh is z) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
59. If (epo2 is z) and (etdf is p) and (etmh is n) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
60. If (epo2 is z) and (etdf is p) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
61. If (epo2 is z) and (etdf is z) and (etmh is pg) then (comb is alto)(alim is mbajo) (1)
62. If (epo2 is z) and (etdf is z) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
63. If (epo2 is z) and (etdf is z) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
64. If (epo2 is z) and (etdf is z) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
65. If (epo2 is z) and (etdf is z) and (etmh is ng) then (comb is mbajo)(alim is alto) (1)
66. If (epo2 is z) and (etdf is n) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
67. If (epo2 is z) and (etdf is n) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
68. If (epo2 is z) and (etdf is n) and (etmh is z) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
69. If (epo2 is z) and (etdf is n) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is mbajo) (1)
70. If (epo2 is z) and (etdf is n) and (etmh is ng) then (comb is mbajo)(alim is alto) (1)
71. If (epo2 is z) and (etdf is ng) and (etmh is pg) then (comb is normal)(alim is mbajo) (1)
72. If (epo2 is z) and (etdf is ng) and (etmh is p) then (comb is normal)(alim is bajo) (1)
73. If (epo2 is z) and (etdf is ng) and (etmh is z) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
74. If (epo2 is z) and (etdf is ng) and (etmh is n) then (comb is mbajo)(alim is normal) (1)
75. If (epo2 is z) and (etdf is ng) and (etmh is ng) then (comb is mbajo)(alim is malto) (1)
76. If (epo2 is n) and (etdf is pg) and (etmh is pg) then (comb is alto)(alim is mbajo) (1)
77. If (epo2 is n) and (etdf is pg) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is bajo) (1)
78. If (epo2 is n) and (etdf is pg) and (etmh is z) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
79. If (epo2 is n) and (etdf is pg) and (etmh is n) then (comb is normal)(alim is alto) (1)
80. If (epo2 is n) and (etdf is pg) and (etmh is ng) then (comb is normal)(alim is alto) (1)
81. If (epo2 is n) and (etdf is p) and (etmh is pg) then (comb is aito)(alim is mbajo) (1)

82. If (epo2 is n) and (etdf is p) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
83. If (epo2 is n) and (etdf is p) and (etmh is z) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
84. If (epo2 is n) and (etdf is p) and (etmh is n) then (comb is normal)(alim is alto) (1)
85. If (epo2 is n) and (etdf is p) and (etmh is ng) then (comb is normal)(alim is malto) (1)
86. If (epo2 is n) and (etdf is z) and (etmh is pg) then (comb is alto)(alim is mbajo) (1)
87. If (epo2 is n) and (etdf is z) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
88. If (epo2 is n) and (etdf is z) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
89. If (epo2 is n) and (etdf is z) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
90. If (epo2 is n) and (etdf is z) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
91. If (epo2 is n) and (etdf is n) and (etmh is pg) then (comb is alto)(alim is bajo) (1)
92. If (epo2 is n) and (etdf is n) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
93. If (epo2 is n) and (etdf is n) and (etmh is z) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
94. If (epo2 is n) and (etdf is n) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
95. If (epo2 is n) and (etdf is n) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
96. If (epo2 is n) and (etdf is ng) and (etmh is pg) then (comb is malto)(alim is bajo) (1)
97. If (epo2 is n) and (etdf is ng) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
98. If (epo2 is n) and (etdf is ng) and (etmh is z) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
99. If (epo2 is n) and (etdf is ng) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
100. If (epo2 is n) and (etdf is ng) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is malto) (1)
101. If (epo2 is ng) and (etdf is pg) and (etmh is pg) then (comb is malto)(alim is mbajo) (1)
102. If (epo2 is ng) and (etdf is pg) and (etmh is p) then (comb is malto)(alim is bajo) (1)
103. If (epo2 is ng) and (etdf is pg) and (etmh is z) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
104. If (epo2 is ng) and (etdf is pg) and (etmh is n) then (comb is normal)(alim is normal)(1)
105. If (epo2 is ng) and (etdf is pg) and (etmh is ng) then (comb is normal)(alim is alto) (1)
106. If (epo2 is ng) and (etdf is p) and (etmh is pg) then (comb is malto)(alim is bajo) (1)
107. If (epo2 is ng) and (etdf is p) and (etmh is p) then (comb is malto)(alim is normal) (1)
108. If (epo2 is ng) and (etdf is p) and (etmh is z) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
109. If (epo2 is ng) and (etdf is p) and (etmh is n) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
110. If (epo2 is ng) and (etdf is p) and (etmh is ng) then (comb is normal)(alim is alto) (1)
111. If (epo2 is ng) and (etdf is z) and (etmh is pg) then (comb is alto)(alim is mbajo) (1)
112. If (epo2 is ng) and (etdf is z) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
113. If (epo2 is ng) and (etdf is z) and (etmh is z) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
114. If (epo2 is ng) and (etdf is z) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
115. If (epo2 is ng) and (etdf is z) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is malto) (1)
116. If (epo2 is ng) and (etdf is n) and (etmh is pg) then (comb is alto)(alim is bajo) (1)
117. If (epo2 is ng) and (etdf is n) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is normal) (1)
118. If (epo2 is ng) and (etdf is n) and (etmh is z) then (comb is normal)(alim is normal) (1)
119. If (epo2 is ng) and (etdf is n) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
120. If (epo2 is ng) and (etdf is n) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
121. If (epo2 is ng) and (etdf is ng) and (etmh is pg) then (comb is alto)(alim is mbajo) (1)
122. If (epo2 is ng) and (etdf is ng) and (etmh is p) then (comb is alto)(alim is bajo) (1)
123. If (epo2 is ng) and (etdf is ng) and (etmh is z) then (comb is bajo)(alim is normal) (1)
124. If (epo2 is ng) and (etdf is ng) and (etmh is n) then (comb is bajo)(alim is alto) (1)
125. If (epo2 is ng) and (etdf is ng) and (etmh is ng) then (comb is bajo)(alim is malto) (1)

## Bibliografía

- Aguilar, Ausencia. *Cemento Portland : fabricación, propiedades y empleo*, México, p. 18-22
- Aizawa, Takemi, "Control strategy for automation in Onoda's cement plants" en *IEEE Cement Industry Technical Conference*, 1994, p. 254-267.
- Andersen, K., "Kiln selection", en *Energy conservation Potential in Cement Industry Conservation Paper no. 26*, 1975, p.189-211
- Apasco. *Informes Anuales*, Cementos APASCO, Anuario, México, D.F., 1989 -1994.
- Arredondo, R. "La industria del cemento y el medio ambiente" , en *Revista IMCYC*, vol. 25, no. 200, enero, 1988, p. 13-18.
- Aström, K., y Björn Wittenmark. "*Computer-Controlled Systems* ", Editorial Prentice Hall. Estados Unidos, 1990, p.p. 41-65, 126-129, 209-221.
- Beke, Béla, "Importance of roller milling in cement production ", en *World cement Technology*, marzo, 1982, p. 76-80.
- Bentrup, K. "Sistemas expertos en la Industria del Cemento" en *World Cement*, agosto, 1994, p. 16-21.
- Birch, E., "Energy savings in Cement Kiln Systems", en *Energy efficiency in the Cement Industry*, 1990, p. 118-128
- CANACEM, *Desarrollo de la Industria del Cemento en México*, Cámara Nacional de la Industria del cemento, México, 1969. p. 9-29.
- CANACEM. *Anuario 1987*, Cámara Nacional de la Industria del cemento, Anuario, México, D.F., 1987.
- Carrión, C. y Alberto Navarro, "RIGAS. Sistema Inteligente para el control de procesos en la Industria del Cemento" en *Cemento y Hormigón*, no. 733. España, junio, 1994, p. 645-650.
- Castillo, P. *Ahorro de energía en la operación de calderos industriales*. Perú , p. 176
- CEMBUREAU, *World Cement Directory 1987*, CEMBUREAU, Anuario, EUA, 1987.
- CEMBUREAU, *World Cement Directory 1991*, CEMBUREAU, Anuario, EUA, 1991. p.102-108.
- Cemex, *El Cemento Portland y su proceso de fabricación en México y en el mundo*, México, D.F., p. 4-11.
- Cemex. *Informe Anual*, CEMEX, Anuario, México, D.F., 1994, p.p. 1-12, 34-38.
- Chen, Chi-Tsong, *Linear System theory and design*. Editorial Holt, Rinehart and Winston., Estados Unidos de Norteamérica, 1984. p.p. 168-189.

- Cortés, Fidel, *Sesión de llantas usadas. Taller sobre minimización de residuos y producción más limpia en América Latina y el Caribe*. INE, México, 1995
- Da Silva, J. et. al., "Consideration about the use of secondary fuels in Cement Plants", en *Third Internacional Conference on waste management in the chemical and petrochemical industries*, Brasil, octubre, 1993. p. 4-8
- Da Silva, J. et. al., "Emission and control of pollutants in the cement industry", en *Third Internacional Conference on waste management in the chemical and petrochemical industries*, Brasil, octubre, 1993. p. 365
- Drews, H. "The basic concept of process control in cement plants" en *World Cement*, agosto, 1993, p. 11-14.
- Driankov, Dimiter, Hans Hellendoorn, y Micheal Reinfrank. *An Introduction to Fuzzy courol*, Springer-Verlag, Nueva York, Estados Unidos, 1993, p.85-93.
- Eberhardt, Claudio, "Reglamentación anticontaminante en la Industria del Cemento", en *4a. Asamblea Gral. FICEM*, Chile, 1992. p. 3-12.
- Egélov, A.H. "Experience with NO measurements in connection with Fuzzy Logic Control of rotary kilns" en *Zement-Kalk-Gips International*, no. 3, enero, 1982, p. 6-8
- Endres, G., "Reducción de emisiones y consumo de energía en hornos rotativos, por medio de una tecnología punta de combustión ", en *Cemento y Hormigón*, no. 718, p. 413-421.
- Erens, F. y Olivier Saint Paul, "High-Level Process control of a cement plant" en *International Cement Review*, Estados Unidos, abril, 1995. p. 94-100.
- Flores, J. "Lubricantes usados", en *Curso de Tecnologías Limpias de manejo de residuos peligrosos*, México, noviembre.1994. p. 1-12
- Fog, M. y Nadkarni, K. *Energy Efficiency and Fuel substitution in the Cement Industry with Emphasis on Developing Countries*, Banco Mundial, p. 6.S.10-11,25,49-54
- García-Luna, Carlos, "A new generation of Expert Kiln Control can provide extraordinary R.O.I. and process benefits" en *IEEE Cement Industry Technical Conference*, 1994, p. 243-252.
- Garfías, M., "Conferencia del Curso de Tecnologías Limpias de manejo de residuos peligrosos-México", Programa Universitario de Medio Ambiente (PUMA), noviembre,1994, p. 12-22
- Garmendia, Jaime. "El uso de combustibles en la Industria Cementera Mexicana" en *Revista IMCYC*, México, enero,1988.vol. 25, no. 200, p.28-31
- Guardiota, Carlos, "Summit control system for Cementos de Chihuahua" en *World Cement*, abril, 1994, p. 32.37.
- Hedeager, Tora, "Modificaciones económicas para futuras exigencias en la depuración de gases de humo", en *4a. Asamblea Gral. FICEM*, Chile, 1992, p. 25-34

## Bibliografía

- Holderbank, *Curso de Cemento. Tecnología del proceso. Uso de combustibles alternativos*, México, p. 1-35
- INEGI, *Sistema Nacional de Cuentas Nacionales*, México, 1980-1994.
- Jensen, Sigfred. "Total plant control: utilize DCS or PLC" en *IEEE Cement Industry Conference*, mayo, 1992, Estados Unidos, p. 198-200.
- Jiménez, A. y Fernando Matía. *Aplicaciones de Fuzzy Logic en tiempo real*
- King, P.J. y E.H. Mamdani. "The application of Fuzzy Control Systems to Industrial Processes" en *Automatica*, vol. 13, Gran Bretaña, 1977, p. 235-242.
- Krefit, W. ." Comparison of various bypass systems in clinker burning plants." en *Zement-Kalk-Gips*, no. 3, 1990, p. 59-62.
- Krefit, W. "Ecological aspects of cement-Environmentally-oriented application of technology as a contribution to climatic protection", en *Zement Kalk-Gips* , mayo, 1990, no. 5, p. 123-127.
- Kresiberg, A. y Kapoor, G.. "Advancements in precalciners and preheaters", en *World Cement*, marzo, 1990. p. 89-93.
- Küper, D. y M. Seebach. "Designing a cement plant for the most stringent Environmental Standards", en *IEEE 1994 Cement Industry Technical Conference*, mayo, 1994, p. 332-333
- Lee, Chuen Chien. "Fuzzy Logic in Control Systems :Fuzzy Logic Controller-Part I" en *IEEE Transactions of Systems, Man and Cybernetics*, vol.20, no. 2, marzo, 1990, p. 404-415.
- Li, Y.F. y C.C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems" en *IEEE Control Systems Magazine*, abril, 1989, p. 65-72.
- MacFarlane, A.G.J. y N. Karkanias. "Poles and zeros of linear multivariable systems : a survey of the algebraic, geometric and complex-variable theory", en *Int. J. Control*. Vol. 25, no. 1, Estados Unidos, 1976, p. 34-74.
- Martínez, V. "Nuevos equipos de combustión para hornos rotativos de clinker y similares. Toberas Centricoal". en *Cemento y Hormigón*, no. 718. Abril. 1993. p. 427-439.
- Meza, Lourdes, et. al. "Manejo de los aceites usados. Residuos Peligrosos", en *CENAPRED*, México, octubre, 1995, no. 9, p. 17-23.
- Meza, Lourdes, et. al. "Estudio de la problemática del manejo de los aceites usados generados por diferentes medios de transporte", en *CENAPRED*, México, julio, 1995, p. 51
- Millán, Judith E.. *Análisis de la industria del cemento y su problemática ambiental*, Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM, México, 1994
- Neville, Adam y P.I. Warnwright "*High Alumina Cement Concrete*" p.p. 9-10

- Nielsen, P. y Ove Jepsen. "The formation of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> in various pyroprocessing systems", en *World Cement*, EUA, diciembre, 1990, p.p.528-536
- Ogata, Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna*. Segunda Edición. Editorial Prentice Hall. México, 1993. p.p. 267-268.
- Organización de las Naciones Unidas, *Energy conservation in the Cement Industry-some experiences*, Organización de las Naciones Unidas, 1982. p. 4,6-8,34-38, 92,181,184
- Ostergaard. J. "Control of a cement kiln by Fuzzy Logic" en *FLS-Review*, no. 67, Estados Unidos, 1982, p. 3-11.
- Parkes,P.F., " Energy saving by utilization of high efficiency classifier for grinding and cooling of cement on two mills at Castle Cement limited, Clitheroe, Lancanshire. U.K. ", en *Energy efficienfy in the Cement Industry*, 1990. p.92
- Patzert, N.. "High-Pressure Grinding Rolls. A Survey of Experience", en *IEEE 1992 Cement Industry Technical Conference*, mayo, 1992.
- Petróleos Mexicanos, "*Perfiles energéticos industriales no. 1. Consumo de energía en la Industria del Cemento*", publicado por la Subdirección de Planeación y Coordinación, Gerencia de Economía Energética, octubre, 1984, p. 63-89.
- Peray, K.E. *The Rotary Cement Kiln*. Chemical, Nueva York, 1972, p. 334-341.
- Ramírez, Celada "Evolución del control en la Industria del Cemento" en *Revista IMCYC*, México, D.F. ,vol. 25 no. 200, enero, 1988, p.45-52.
- Rock products. *1994 North America Cement Directory*. Rock products, EUA.1994.
- Roppenecker, G., "On parametric state feedback design" en *Int. J. Control*, vol. 43, no.3, EUA, p. 793-796.
- Rosemann, H. y P. Künne. "Operating experience with a new type of burner for rotary kilns", en *Zement-Kalk-Gips*, no. 11, 1990, p.247-250.
- Rosenhoj, J., "The cement kiln. The optimal solution for waste tyre burning" en *International Cement Review* , EUA, mayo, 1993, p. 30-36
- Ruiz Navarro, A., et. al., "Minimizing energy consumption in kilns by the SCAP system" en *World Cement*, marzo, 1993, p. 23.28.
- Saito,I., et. al. "Effective use of waste tyres by gassification in cement plant" . *World Cement*, EUA
- Salinas, Carlos. *Sexto Informe de Gobierno 1994*. Secretaría. de Gobernación, México, 1994.
- Salomón, Alfredo, "Industria del cemento: pruebas del tiempo" en *Comercio Exterior*, México, D.F., noviembre,1995, p. 832-836.
- Schroth, G., "Grate preheater kiln systems", *Energy Conservation Potential in the Cement Industry Conservation Paper no. 26*, Federal Energy Administration, 1975.

## Bibliografía

- Schroth, G.A., " Roller Mills, why and when", en *Energy Conservation Potential in Cement Industry*, 1975, p. 231.
- Schwarz, S. y Seebach, M., "Grinding optimisation using high pressure grinding roll and downstream ball mills", en *World cement*, septiembre, 1990. p. 385-388.
- SEDESOL/INE-EPA-PUMA-CEMEX. "*Workshop of technology for energy recovery in cement kilns using alternative fuels. Compendio de conferencias*", México, agosto, 1994, p. 31-32
- SEMIP, *Balance Nacional de Energía 1987-1994*. Secretaría de Energía. México, 1987-1994.
- SEMIP. *Características del consumo de energía en la Industria del Cemento en México: evolución y perspectivas*. Secretaría de Minas e Industria Paraestatal. México, D.F., enero, 1992.
- Sheinbaum, Claudia. *Tendencias y perspectivas de la energía residencial en México*. Tesis Doctoral. División de Estudios Superiores de la Facultad de Ingeniería. UNAM. México, 1994.
- Sheridan, E. "Automatic kiln control at Oregon Portland Cement Company's Durkee Plant, utilizing Fuzzy Logic" en *FLS-review*, no. 65, mayo, 1983, p. 3-8.
- Söderström, T. y Stoica, P. "*System Identification*", Prentice Hall, Gran Bretaña, 1989, Cap.3
- Sterner, Thomas. *El uso de la Energía en la Industria Cementera Mexicana*. Colegio de México. México, 1987. p. 104-105.
- Ullman, Fred. "The Mexican Situation", en *Rock Products*, EUA., abril, 1990. p. 36-40,90
- Vargas, Alejandro. "Control Difuso de Anestesia con halotano y óxido nitroso", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 1995.
- Villaseñor, Jorge M. "Cementos producidos en México" en *Revista IMCYC*, México, vol. 25, enero, 1988, p. 4-12.
- "Recuperación de energía en los hornos cementeros" en *Workshop of Technology for Recovery in Cement Kilns using Alternative fuels*, México, agosto, 1994.
- Wolter, A., "Pyrorapid-short rotary kiln-advantages for all raw materials", en *Zement-Kalk-Gips*, no. 11, 1990, p. 253-256.
- Worrell, Ernest. et.al., *International comparison of energy efficiency improvement in the cement industry*, EUA, agosto, 1995.
- Zadeh, Lofti. "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes" en *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-3, no.1, enero, 1973, p. 28-44.

- Zambrano, Lorenzo. "Panorama de la Industria Cementera Mexicana" en *Revista IMCYC*, México. Enero, 1988. vol. 25, no. 200. p.p.19-26
- Zavala, Ricardo. *Control difuso de sistemas de segundo orden vectorial*, Tesis de maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F., abril, 1996, p.10-12
- "Criterios de selección de combustibles para el horno cementero", en *.Combustión&clinkerización* no. 1, p. 4-7