

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

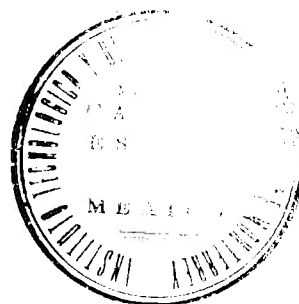
CAMPUS ESTADO DE MÉXICO

DIVISION DE GRADUADOS E INVESTIGACION

DIRECCION DE MAESTRIAS EN INGENIERIA



BIBLIOTECA



**ESTUDIO DE UN CONTROLADOR SUPERVISORIO
DIFUSO EN UN HORNO DE FABRICACION
DE CLINKER**

Tesis que para obtener el grado de

Maestro en Sistemas de Manufactura presenta

JOSE FRANCISCO P. HERNANDEZ HURTADO

Asesor: DR. CUAUHEMOC CARBAJAL FERNANDEZ

Comité de Tesis: DR. ALEJANDRO VEGA SALINAS
DR. EMIL LIEBERMANN G.

Jurado: DR. EMIL LIEBERMANN, Presidente
DR. ALEJANDRO VEGA, Secretario
DR. CUAUHEMOC CARBAJAL, Vocal
DR. JAROMIR ZELENY, Vocal

ATIZAPAN DE ZARAGOZA, MEXICO, MAYO DE 1995

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	
OBJETIVOS	1
ANTECEDENTES	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
TRABAJOS RELACIONADOS	7

PARTE I:

CAPÍTULO 1. EL CEMENTO	
1.1 HISTORIA DEL CEMENTO	9
1.2 MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL CEMENTO	14
1.3 DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DEL CEMENTO	15
1.4 CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO	25

CAPÍTULO 2. QUÍMICA DEL CEMENTO	
2.1 SIMBOLISMO QUÍMICO	26
2.2 FORMULACIÓN QUÍMICA	26
2.3 ESTRUCTURA MOLECULAR	29
2.4 FACTORES DE COMPOSICIÓN DEL CEMENTO PORTLAND	30
2.5 POSICIÓN DE LOS CONSTITUYENTES MENORES	38
2.6 PROCESO DE CLINKERIZACIÓN	41
2.7 FACTORES QUE AFECTAN LA COMBINACIÓN	45
2.8 RÉGIMEN DE CALCINACIÓN	47
2.9 FASE LÍQUIDA	50
2.10 RÉGIMEN DE ENFRIAMIENTO	52
2.11 EFECTO DE LA MEZCLA CRUDA SOBRE LA CALIDAD DEL CEMENTO	54
2.12 EL MEDIO AMBIENTE	56

PARTE II:

CAPÍTULO 3. LÓGICA DIFUSA	
3.1 SISTEMAS DE CONTROL BASADOS EN LÓGICA DIFUSA	63
3.2 INTRODUCCIÓN A LA LÓGICA DIFUSA	67
3.3 PRINCIPIOS DEL CONTROL DIFUSO	68
3.4 CONTROLADOR DIFUSO	70
3.5 CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN CONTROLADOR DIFUSO	73
3.6 PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN CONTROLADOR LÓGICO DIFUSO	76
3.7 ESTRATEGIAS DE DEFUZIFICACIÓN	81

CAPÍTULO 4. LOS SISTEMAS EXPERTOS Y LA LÓGICA DIFUSA	
4.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS EXPERTOS	83
4.2 LA LÓGICA DIFUSA	88
4.3 CONTROL DIFUSO DE UN HORNO DE CEMENTO	90
CAPÍTULO 5. AUTOMATIZACIÓN DEL LABORATORIO MEDIANTE ROBÓTICA	
5.1 EL CONCEPTO DE ROBÓTICA VS. EQUIPOS AUTOMATIZADOS	113
5.2 ROBOLAB	115
5.3 POLAB	119
5.4 CONCLUSIÓN	123
CONCLUSIONES	125
BIBLIOGRAFÍA	128

OBJETIVOS

De acuerdo a mis estudios de Manufactura automatizada el objetivo general de mi tesis será:

El estudio de un controlador supervisorio difuso en un horno de fabricación de clínker.

Con esto pretendo, un estudio exhaustivo sobre la base de conocimientos, para verificar si garantiza un control seguro y eficiente. En su defecto se procedería a ampliar y/o corregir esta base de conocimientos para satisfacer el objetivo antes mencionado. Dada la complejidad de la Planta con que se trabaja, este estudio es la fase más importante del trabajo de tesis por lo que será reportada en forma detallada.

El estudio nos permitirá la interpretación de los resultados obtenidos a través de las pruebas piloto y de ser necesario la modificación del controlador supervisorio difuso.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Comprender el Proceso de Producción de Cemento
- 2.- Comprender el Proceso Físico-Químico en la Etapa de Calcinación.
- 3.- Identificar los principales Parámetros en el control de un horno.
- 4.- Comprender la Lógica Difusa.
- 5.- Evaluación de las posibilidades de aplicación de la Lógica Difusa.
- 6.- Puesta en marcha de un horno bajo un sistema supervisorio difuso. *
- 7.- Paso del sistema Adquisición de Datos al modo Asesoría y Control. *
- 8.- Análisis de Resultados. *
- 9.- Propuesta hacia un nuevo sistema de Producción en la etapa de calcinación.

* Estos objetivos dependen de los intereses internos de la Empresa Cementos Tolteca, S.A. de C.V. por lo tanto son independientes para el seguimiento de la Tesis.

ANTECEDENTES

El proyecto que a continuación se detalla tiene su origen en la Empresa Cementos Tolteca S.A de C.V., Planta Atotonilco situada en Barrio Boxfi s/n en Atotonilco de Tula, Hidalgo.

Durante el año y medio que presté mis servicios en esta empresa (Enero de 1990 a Junio de 1991) pude darme cuenta que el Horno 2 estaba trabajando con un sistema experto, en el control automático de un horno de fabricación de clínker, el cual estaba a prueba y cumplía con la función de monitoreo. En la actualidad el sistema está sin operar, sin embargo existe el proyecto de que el Sistema Experto funcione como tal, de ahí mi inquietud de participar en el mismo apoyado en mi especialidad de Manufactura Automatizada, lo cual me permitirá a la vez cumplir con las expectativas de mi Tesis.

Originalmente el proyecto estuvo a cargo de Conacyt, de la Empresa Sidetec y de Cementos Tolteca como proyecto de Riesgo Compartido. De acuerdo a la información obtenida las pruebas preliminares que arrojó el proyecto original no permitieron comprobar la efectividad del enfoque, así como tampoco optimizar los resultados esperados de monitoreo (predicción, mejores señales de control, auxilio para el operador, implementación del controlador) siendo estos objetivos del nuevo proyecto. Este estará a cargo, por el momento, de Cementos Tolteca S.A. de C.V.

De acuerdo a mis estudios de Manufactura automatizada personalmente pretendo participar en el proyecto cubriendo el siguiente objetivo:

Estudio de un controlador supervisorio difuso, en un horno de fabricación de clínker.

En el desarrollo de este proyecto cuento con el apoyo de el Ing. Eduardo Silva Bolio Gerente General de la Planta, el Ing. José Hidalgo Gerente del área de producción y el Ing. Marco Antonio Rangel M., Gerente del área de Instrumentación,

cumpliendo a la vez la función de asesor externo sobre el proyecto. Y por parte de ITESM-CEM al Dr. Cuauhtémoc Carbajal asesor de Tesis.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es necesario recalcar que con este trabajo no se pretende justificar el uso de la lógica difusa en el control de procesos; dado el éxito de dicha tecnología (el control difuso), se quiso estudiarlo e implementarlo en el control de un horno de clínker en la producción de cemento.

Está fuera de toda duda la creciente importancia de la automatización y control de las instalaciones industriales. En los países industrializados la automatización y control es un medio de empujar el rendimiento en su sentido más amplio; en los países punteros la automatización de las instalaciones es una condición indispensable para el buen resultado de la explotación de cualquier industria.

Las plantas industriales son cada vez más complejas, por lo que la automatización se ve progresivamente sometida a exigencias más severas. El sistema de gestión en la industria alcanza una enorme importancia porque de él nos puede llegar la adecuada respuesta para cualquier problema de revisión, vigilancia y optimización de los procesos industriales.

Téngase en cuenta que los costos de los equipos de automatización y control pueden amortizarse con rapidez como resultado de:

- una mejor utilización de la fábrica,
- un aumento de la producción,
- una calidad del producto más estable y
- un superior aprovechamiento de las instalaciones [3].

La crisis económica detuvo en seco, como tantas otras cosas, el avance de la automatización.

De vuelta a la normalidad, y con la lección bien aprendida en cuanto a las necesidades de ahorro de energías (estabilidad de marcha, calidades y consignas de funcionamiento energicamente óptimas) y de protección ambiental (minimización de

gases contaminantes, partículas y calor a la atmósfera), se ha ido produciendo durante la última década una notable evolución en los recursos de control y conducción, basada principalmente en tres soportes:

- a) Instrumentación de campo avanzada, con prestaciones que facilitan la identificación dinámica del proceso.
- b) Computadoras potentes, rápidos, fiables y manejables, características éstas extensivas tanto a sus periféricos como a los softwares de base (sistemas operativos, comunicaciones, etc.)
- c) Softwares-herramientas (adquisición de datos, monitorización, simulación, generación de sistemas expertos) y programas de aplicación específicos para el control de procesos, especialmente para hornos.

Obviamente, la Ingeniería de Procesos con sus técnicas de análisis riguroso tienen una participación imprescindible en este campo.

El objetivo amplio de tal evolución reside en pasar del control localizado, punto a punto, de variables del proceso a estrategias de control globalizado de toda la sección productiva, buscando su estabilidad e incluso la optimización de sus resultados (calidad, fiabilidad, consto, medio ambiente).

En términos tal vez futuristas, el fin último sería la casi sustitución del operador humano por un super-operador automático inteligente, cuyas actuaciones fueran coherentes en cualquier situación y con dedicación continua.

La tecnología actual y los dos desarrollos en curso parecen permitir una interesante aproximación al horizonte de ciencia-ficción descrito [4].

Ahora bien, en muchos procesos nos encontramos en situación de tratar con variables con comportamiento no lineal en el tiempo, y en donde las mediciones directas son difícilmente practicables. En consecuencia, las posibilidades de control automático quedan restringidas a unos pocos lazos de variables secundarias, quedando la responsabilidad del control de las variables primarias en el operador.

De aquí nace el reto de implementar el control difuso en el control de un horno rotatorio para fabricación de clínker, etapa en la producción de cemento en donde se lleva a cabo la calcinación.

Así pues, dentro de este proceso se pretende que el Sistema Experto en el control automático de un horno de fabricación de clínker permita verificar la Instrumentación para validar con las nuevas técnicas, que su inversión se justifique.

Además de que permitirá revisar las reglas con la experiencia del operador de cómo controlar el horno al pasar el tiempo (encontramientos) y ver como se refleja en la base de conocimientos (reglas).

Un primer acercamiento para resolver el problema puede ser el desarrollo de un modelo matemático del funcionamiento del proceso. Sin embargo, en la práctica se suele llegar a modelos excesivamente simplistas o demasiado complicados para ser aplicados con efectividad.

Asimismo, puede ser contradictorio el esfuerzo a desarrollar en el establecimiento del modelo matemático y la relativa simplicidad con que el operador puede acumular la experiencia necesaria para un funcionamiento correcto.

En la mayor parte de los casos se trata de asimilar un conjunto de reglas experimentales, que definirán determinadas actuaciones a partir de los distintos estados del proceso.

Mientras que en el modelo matemático los estados y acciones se definirán por valores numéricos absolutos, el operador actuará más por conceptos tales como "mucho", "poco", "ligeramente", "correcto", etc., mas familiares a su entendimiento de la realidad del proceso y sus posibilidades de control.

Estaríamos entonces dentro del campo de aplicación de los sistemas expertos basados en lógica difusa [5].

Ahora bien, antes de continuar con la exposición de trabajo, cabe aclarar que la lógica difusa, base del mismo, no fue propuesta para ser aplicada específicamente en el área de control, citando a Lofti A. Zadeh, padre de la lógica difusa [1]:

"Esencialmente, nuestra afirmación es que las técnicas cuantitativas convencionales del análisis de sistemas son intrínsecamente impropias para tratar sistemas humanísticos o, lo que es igual, cualquier sistema cuya complejidad es comparable a la de los sistemas humanísticos".

Cuando se quiere modelar sistemas humanísticos (aquellos en los que el hombre es el principal protagonista) tales como sistemas económicos, o sociales, se

usan adaptaciones de métodos empleados en el análisis de sistemas mecánicos. Por ejemplo, se modelan sistemas biológicos y económicos con ecuaciones diferenciales y/o en diferencia. El modelar ese tipo de sistemas de esa manera puede no ser el mejor camino, ya que dada su complejidad, su comportamiento no puede ser simplificado como se hace al modelar un sistema mecánico. Una alternativa para el estudio de sistemas humanísticos es el concebirlo utilizando los conceptos propios al modo de pensar de los humanos.

Citando nuevamente a Zadeh [1]:

"Una aproximación alternativa descrita en este documento se basa en la premisa de que los elementos clave del pensamiento humano no son números, sino etiquetas de conjuntos difusos, esto es, clases de objetos en los cuales la transición de la pertenencia a la no pertenencia es gradual en vez de abrupta."

Haciendo uso de éste concepto el pensamiento humano resume a partir de grandes volúmenes de información lo que considera más importante; utilizando el mínimo necesario para realizar adecuadamente las tareas que se propone. Así, la habilidad de manejar conjuntos difusos y la consecuente habilidad de resumir, constituyen una de las características más importantes de la mente humana. De lo anterior es evidente que la lógica difusa permite emular los mecanismos de toma de decisión de los humanos, lo cual muy bien puede ser usado para automatizar el control de procesos. Por lo tanto, el control difuso es una buena alternativa de control cuando se tienen sistemas muy complejos o cuando por alguna razón se carece de las ecuaciones que rigen el comportamiento de la planta. Además, dada su semejanza con el modo de pensar de los humanos, es más fácil de diseñar e implementar que un control

TRABAJOS RELACIONADOS

En los últimos años los avances realizados en el campo del proceso difuso dan cuenta del gran potencial de esta técnica de control. Si bien se han dado avances en el área de la investigación, los principales logros del control difuso se presentaron en la fabricación de productos de consumo y en aplicaciones relacionadas al control de procesos industriales. Para ejemplificar lo anterior se pueden citar múltiples e interesantes relaciones que incluyen todo tipo de controles y aplicaciones en inteligencia artificial.

En el primer grupo de aplicaciones se tiene por ejemplo, la cámara de video fabricada por Sanyo Fisher/Canon [6], la cual determina el mejor punto de enfoque e iluminación con varios objetos en la imagen, la lavadora de ropa de Matsushita [6], que detecta cuantitativamente y cualitativamente la suciedad, cantidad de ropa, tipo de tela, y en función de eso ajusta el ciclo de lavado, la televisión de Sony, que ajusta el brillo, color, y contraste de la pantalla, o el calentador de agua de Matsushita que ajusta el elemento térmico de modo que responda con la cantidad de agua y la temperatura [6].

Entre las aplicaciones industriales se encuentran: el control de elevadores desarrollado por Fujitec/Toshiba, el cual calcula el tráfico de usuarios para reducir su tiempo de espera [6], los sistemas de aire acondicionado de Mitsubishi Electric, controles de temperatura desarrollados por Omron Electronics [7], etc.

En el campo de la investigación y la inteligencia artificial se pueden mencionar el péndulo invertido de Takeshi Yamakawa [8], el cual tiene en su parte superior una copa de vino de algún líquido o incluso un pequeño ratón blanco; el control compensa la turbulencia del líquido y los erráticos movimientos del ratón, Otra cita interesante es el helicóptero de Michio Sugeno [8], del instituto tecnológico de Tokio, el cual es controlado por medio de voz. El control de los ejes de los motores emplea esencialmente las mismas reglas que el péndulo invertido de Yamakawa [6].

Todos estos logros han sido posibles gracias a los avances en el diseño de microprocesadores e innovaciones en las técnicas de programación.

La demanda de tecnología difusa ha sido tal, que en la actualidad se están creando productos especialmente diseñados para su implantación: memorias difusas, microcontroladores difusos, y las herramientas de programación asociadas.

Un ejemplo de lo anterior es un procesador digital difuso FC110 de Togai Infralogic [6] que maneja más de 50000 inferencias difusas por segundo (Kflips), y cuya base de reglas puede almacenarse en RAM, ROM, o EPROM.

Este recuento confirma la importancia que está adquiriendo el control de lógica difusa y por esta razón que se hace necesario comenzar a utilizarla a nivel nacional como una opción más en la solución de problemas de control. Con el presente trabajo se pretende hacer una aportación en este sentido, mostrando las características más sobresalientes de un controlador lógico difuso.

CAPÍTULO 1

EL CEMENTO

1.1 HISTORIA DEL CEMENTO

En la albañilería de Grecia las estructuras estaban compuestas de tierra, algunas veces erguidas en forma de paredes o domos por medio de capas sucesivas apisonadas, o por medio de bloques de piedra sobrepuestos sin la ayuda de ningún material de cimentación, tal y como en las estructuras prehistóricas.

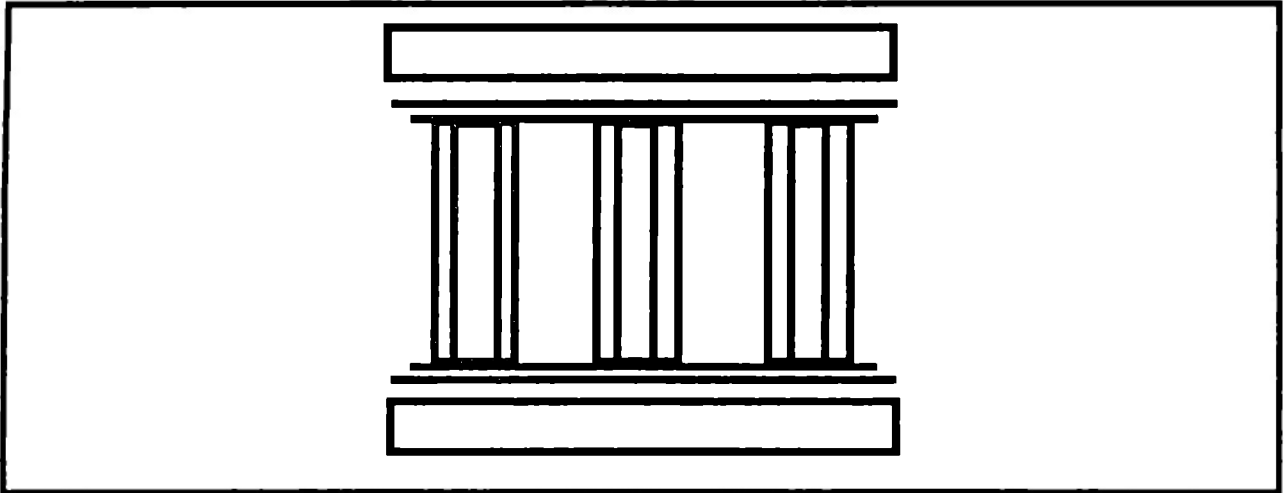


Figura 1.1 Construcción Griega

La estabilidad de las paredes de las construcciones griegas se derivaba enteramente de la regular colocación de las pesadas masas de piedra sin ayuda de algún material que las uniera.

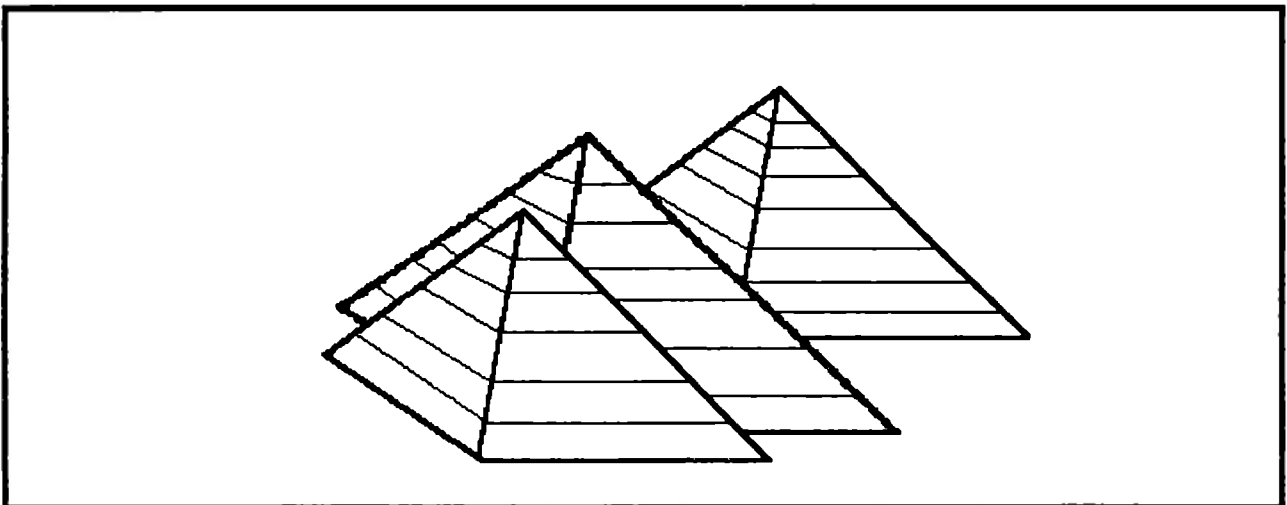


Figura 1.2 Construcción Egipcia

En las edificaciones egipcias los ladrillos eran secados al sol sin ser horneados y éstos eran cubiertos con una húmeda capa de lama (o cieno del Nilo). El secado de esta capa creaba en la pared una masa sólida de arcilla seca. Tal sistema de construcción era solamente posible en un clima lluvioso, dado que el material no horneado posee muy poca resistencia al agua.

Sin embargo pueblos tales como Kuwait en el Golfo Pérsico que han sido enteramente contruidos de lodo, ha persistido hasta la actualidad. Los ladrillos horneados y las losas de mármol fueron empleados desde los asirios y los babilónicos y fueron cementados con "bitumen". El método es muy eficaz pero está confinado necesariamente a aquellas regiones en las cuales existen depósitos naturales de este material. Este sistema no fue copiado en ningún otro lugar.

En las construcciones de albañilería de los egipcios nos encontramos con nuestro sistema actual de unir bloques y losa de piedra con mortero egipcio ha sido generalmente descrito como caliza quemada y se encontró aún en edificaciones tan viejas como la gran pirámide.

Aunque los primeros egipcios no estaban familiarizados con el uso de la caliza, ésta fue usada inicialmente por los griegos, extendiéndose después a Creta, donde los romanos la conocieron y manejaron.

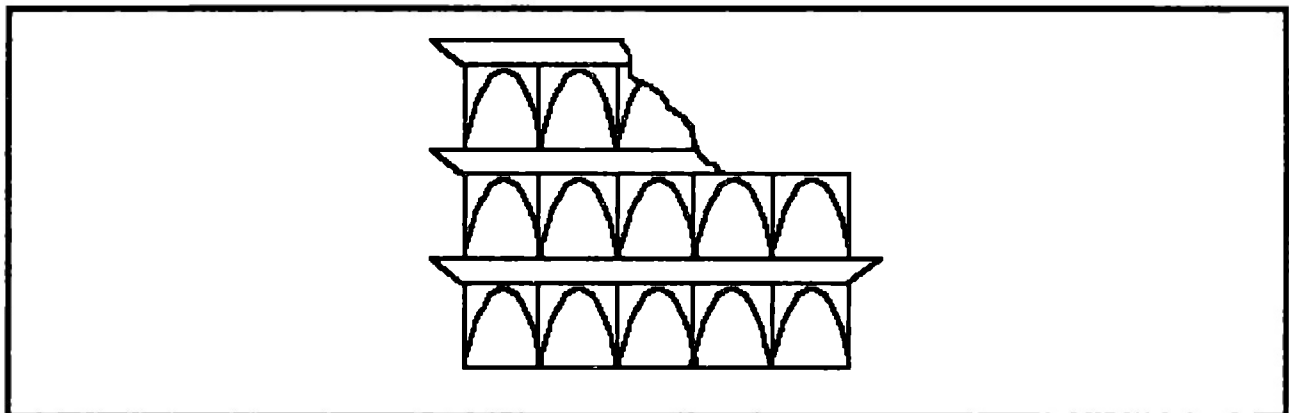


Figura 1.3 Construcción Romana

La notable dureza del mortero en las paredes de los romanos intrigó a muchos ingenieros y los ha conducido aún a la suposición de que éstos poseían algún secreto, el cual está perdido ahora.

Tanto los griegos como los romanos estaban conscientes de que ciertos depósitos volcánicos, al molerse finamente y mezclarlos con caliza y arena, producían un mortero que no solamente poseía una fuerza superior, sino que también era capaz de resistir la acción del agua dulce o salada. Los griegos emplearon este material volcánico de la isla de Thera (ahora llamada Santorin) por eso es conocido como tierra de Santorin todavía goza de una alta reputación en el Mediterráneo. El mortero usado por los campesinos de Santorin (una isla desprovista de madera para construcción) permanece idénticamente en su composición y preparación a la de los tiempos antiguos.

El material que utilizaron los constructores romanos era volcánico de color rojo o púrpura, encontrado en diferentes puntos cerca de Roma y en la Bahía de Nápoles, dado que la mejor variedad de esta tierra fue obtenida en las vecindades de Pozzoli o Pozzuoli (en latín Puteroli), el material adquirió el nombre de Pozzolana (Puzolana).

Los romanos llevaron su conocimiento de la preparación del mortero a las partes más remotas de su imperio y el trabajo de ladrillería romana encontrado en Inglaterra, es igual a los mejores en Italia. Una baja gradual en la calidad del mortero usado en las construcciones realizadas en los tiempos posteriores a Roma que continuaron a través de la Edad Media en los edificios Sajones y Normandos, mostraron evidencia de morteros muy mal mezclados, frecuentemente preparados a partir de caliza quemada imperfectamente. En los edificios Franceses de los Siglos IX, X, y XII el arte de quemar la caliza se perdió casi completamente.

Del siglo XII en adelante la calidad mejoró, la caliza usada era bien quemada y bien cernida. Después del Siglo XIV se encontró un excelente mortero y la precaución de lavar la arena para liberarla de partículas adhesivas de barro o suciedad. El término "cemento" fue comúnmente aplicado en la Edad Media al mortero. Sin embargo la palabra "mortero" se empleó desde 1290. La mezcla Romana de caliza y puzolana natural conservó por largo tiempo su posición como el único material adecuado para trabajar expuestamente debajo del agua.

Si nos vamos a tiempos más recientes, el avance más importante en el conocimiento de cemento, el precursor de todos los descubrimientos e invenciones modernas, es indudablemente la investigación llevada a cabo por John Smeaton. Al ser éste llamado en 1756 a levantar un nuevo faro en Eddystone Rock después de su destrucción por el fuego,

procedió a investigar lo referente a los mejores materiales para trabajar bajo severas condiciones. Cuando encontró que la caliza de Aberthaw en Glamorgam, Inglaterra daba condiciones más ventajosas que la caliza ordinaria, comparó las diferentes calizas y descubrió que aquellas que daban mejores resultados como morteros eran las que contenían una porción considerable de arcilla. Esta fue la primera ocasión en la cual las propiedades de la arcilla fueron reconocidas. A pesar del éxito del experimento de Smeaton, el uso de la arcilla causó poco progreso y la antigua mezcla de caliza y puzolana retuvo su supremacía por un largo período.

En 1826 se descubrió que el cemento hidráulico podría ser hecho de la calcinación de la caliza argilacea, encontrada en ciertos estratos geológicos terciarios y cerca de 1880, al producto entonces obtenido se le dio el inapropiado y confuso nombre de cemento romano.

Más o menos al mismo tiempo que el cemento romano fue introducido, un cemento natural similar fue preparado en Francia cerca de Boulogne y también se encontraron en Rosendale, y en Lousville en los Estados Unidos, depósitos de "cemento roca" capaz producir un cemento hidráulico posterior a su calcinación.

Las investigaciones de L. J. Vicat sobre la caliza lo condujeron a prepararla al calcinar una mezcla de caliza tipo gis y de arcilla, pulverizadas en un molino húmedo. Este proceso puede ser considerado como el principal precursor del cemento Portland.

James Frost también patentó un cemento de este tipo en 1811, y estableció su taller en Shanscombe, el primero en el distrito de Londres, Inglaterra. Este sólo calcinó su mezcla ligeramente y el producto fue evidentemente inferior al cemento romano por lo que fue vendido a precio mas bajo.

En la historia del cemento Portland moderno se atribuye su invención a Joseph Aspdin, un albañil o constructor de Leeds, Inglaterra.

Su primera patente data de Octubre 21 de 1824. Este usó una caliza dura como la que se usa para preparar caminos, la molió y la calcinó, después mezcló esta caliza con la arcilla. Moliéndola muy finamente y agregándole agua, resultaba una pasta con la que formaba manualmente unas bolas de tamaño mediano y las calcinaba en un horno similar al usado para la caliza hasta que el ácido carbónico se secaba. La mezcla ya calcinada volvía a molerla y batirla hasta que quedaba un polvo fino.

Sus primeras instalaciones fueron en Wakefield. Su hijo William Aspdin continuó la fabricación, tanto en el Támesis como en Gateshead-Tyne.

Aspdin conservó por mucho tiempo el secreto de su proceso pasando sus últimos años en Alemania, donde colocó sus instalaciones en 1856.

El nombre de Cemento Portland le fue dado al producto a partir de una similitud de color que el cemento tenía con la piedra de la Isla de Portland en el canal inglés [2].

1.2 MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL CEMENTO

CALIZA: Piedra natural abundante y muy dura, formada principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3). Se extrae de canteras, usando explosivos para fragmentar las rocas y posteriormente se tritura para tener un tamaño similar al de la grava ordinaria. Este material contiene principalmente carbonato de calcio (CaCO_3), cuando se calienta a más de 900°C se descompone en cal (CaO) y gas carbónico (CO_2). Usualmente la caliza contiene otros materiales pertenecientes a sustancias arcillosas o a mineral de hierro que influye en su color.

En la harina cruda para cemento el componente alcanza una dosificación del 76-80%. Por consiguiente, las propiedades físicas de este material tiene una influencia decisiva en la elección del proceso de fabricación del cemento y de los dispositivos de su realización.

ARCILLA: La segunda materia prima importante para la fabricación de cemento es la arcilla. La arcilla en esencia está constituida principalmente de sílice y óxido de silicio (SiO_2) en un 60 a 65% y óxido de aluminio (Al_2O_3) en un 15 a 18%; de cal (CaO) en un 4 a 5% y óxido de hierro (Fe_2O_3) en un 4 a 6% y otros componentes.

La principal fuente de álcalis en el cemento es el componente arcilloso.

Las arcillas son materiales relativamente suaves, esto facilita su explotación y trituración.

La arcilla varía en la cantidad de sus elementos que la componen por lo que existen diferentes tipos de arcilla.

MINERAL DE HIERRO: Se trata de un mineral suave, aunque abrasivo ayuda a controlar el nivel de óxido de hierro (Fe_2O_3) en nuestra mezcla. Tiene el inconveniente de ser pesado y tener un punto de fusión muy bajo, por lo que provoca problemas de segregación y ataque químico.

YESO: Es otra de las materias primas empleadas para la fabricación del cemento. Se trae de fuera de la planta. Almacenándose en depósitos y si es necesario se tritura para tener el tamaño adecuado para su dosificación a los molinos de cemento. Este material actúa como retardador del fraguado, se usa en proporciones de 4 a 6% [2].

1.3 DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DEL PROCESO

1.3.1 EXPLOTACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

La caliza y la arcilla se extraen de canteras que se encuentran cerca de las plantas, las cuales se explotan en forma de escalones o bancos descendentes previendo el control de la contaminación, polvo, ruidos y vibraciones. Una fase de dicha explotación es la barrenación (Fig. 1.4.A) que consiste en realizar orificios de 12 centímetros de diámetro y 8 a 10 metros de largo, utilizando para ello equipo neumático de alta potencia, con la capacidad de hacer un orificio cada 20 minutos. La siguiente fase es la detonación (Fig. 1.4.B). Se efectúa al colocar dentro de cada orificio (barreno) explosivos de alto poder que derriban las paredes de roca en 7 metros alrededor. Para evitar ruidos extremos y vibraciones nocivas se colocan retardadores de tiempo entre barreno y barreno de tal forma que vayan estallando secuencialmente. Los explosivos son de avanzada tecnología y confiabilidad que al explotar generan gases de fuerte energía que presionan, fraccionan y derriban los grandes bloques convirtiéndolos en piedras de tamaño no mayores a 80 centímetros cúbicos.

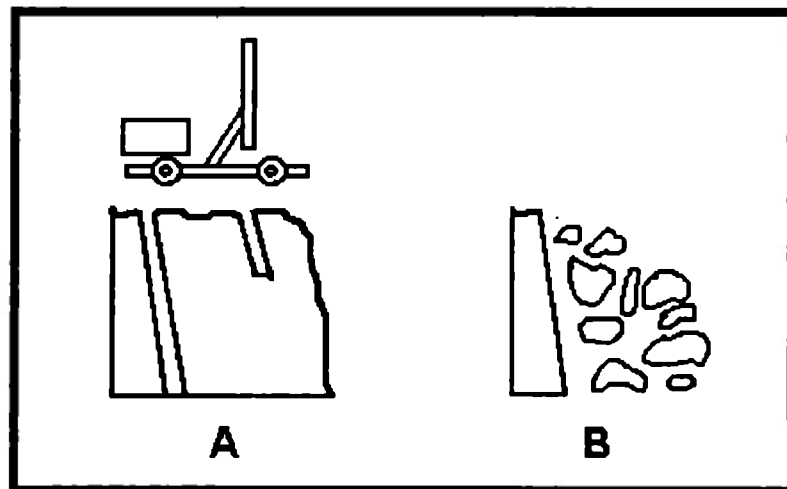


Figura 1.4 Explotación de Materias Primas

1.3.2 TRANSPORTE DE MATERIAS PRIMAS

Una vez que las grandes masas de piedra han sido fragmentadas, se procede a llenar los camiones transportadores por medio de maquinaria pesada (cargadores

frontales) los cuales son de gran potencia y versatilidad debido a su sistema neumático de movimiento y a las grandes llantas forradas algunas de ellas con cadenas de acero para protegerlas de los picos cortantes de las rocas. El cargador más potente es capaz de llenar un camión grande con sólo tres cargas (cucharones) de material de 16 toneladas cada una. Para transportar las materias primas se utilizan dos tipos de camiones: Unos llamados trailers (Fig. 1.5.A) de 2 y 3 ejes con capacidad de carga de 30 y 40 toneladas respectivamente los denominados "Fuera de Camino" (Fig. 1.5.B) que desplazan más de 50 toneladas por viaje.

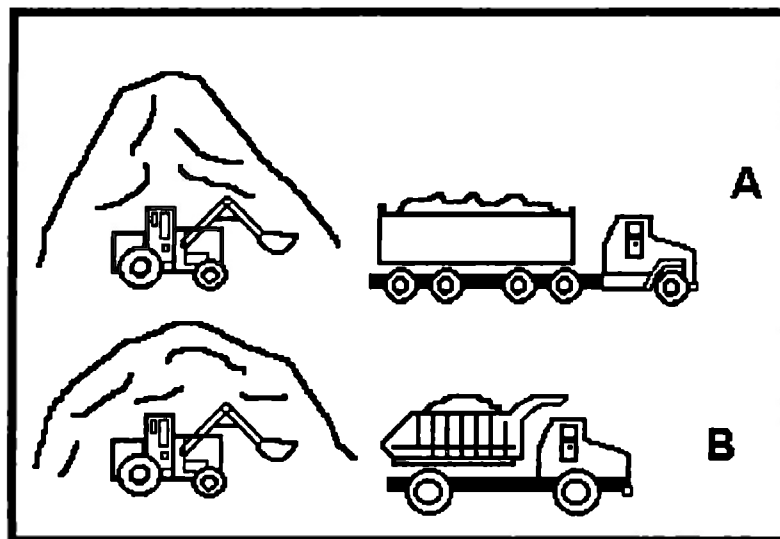


Figura 1.5 Transporte de Materias Primas.

1. 3. 3 TRITURACIÓN

Ya en planta, el material es fragmentado en los trituradores de martillo (Fig. 1.6.A) o de "quijada" (Fig. 1.6.B). Los primeros son equipos de grandes dimensiones elaborados con acero de la más alta calidad y que consisten en una tolva que recibe el material, que por gravedad cae a un rotor que tiene líneas de martillos, placas de impacto y barras limpiadoras, el efecto de trituración se lleva a cabo por el golpe de la roca entre los martillos y las placas de impacto (quebradoras). Reduciéndose el material a 1 ó 1 1/2 pulgadas. Los segundos son llamados de "quijada" porque están compuestos de dos placas que la asemejan, la piedra que se alimenta cae entre las placas, una móvil y otra fija, la trituración se realiza por la compresión de la roca entre las placas, saliendo el material triturado por la parte inferior en donde existe una abertura de tres pulgadas.

Ambos tipos de trituradores funcionan como primarios y secundarios, es decir, el primario reduce de 24 a 1 ó 1 1/2 pulgadas y el secundario de 6 a 3/4 de pulgada.

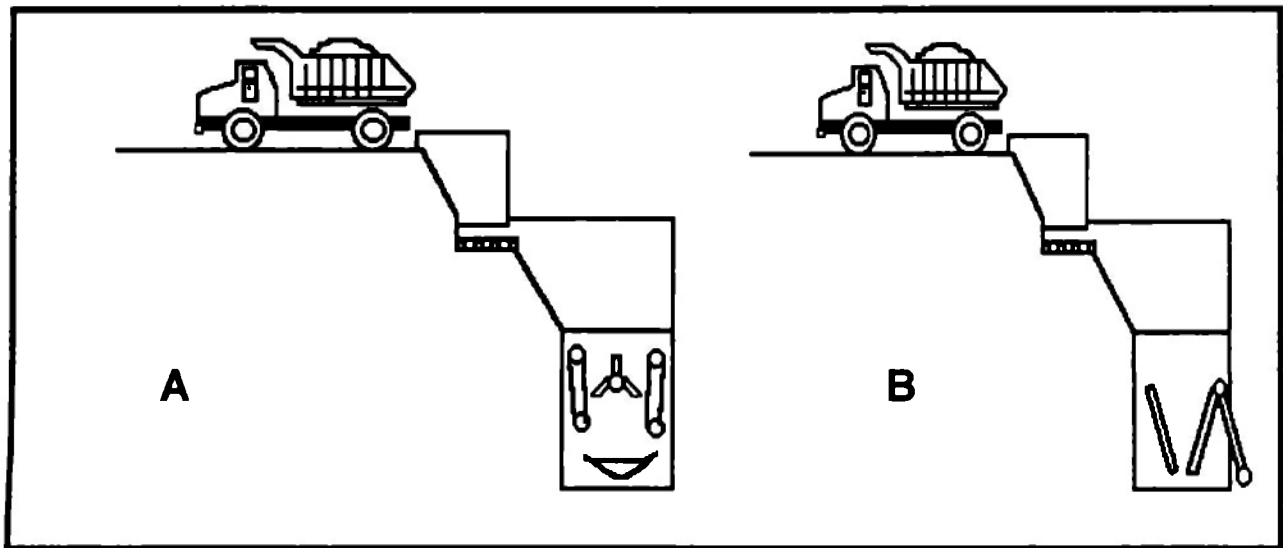


Figura 1.6 Trituración

1.3.4 PREHOMOGENEIZACIÓN Y SECADO DE ARCILLA

La prehomogeneización es la mezcla proporcional de los diferentes tipos de arcilla en un almacén especial (Fig. 1.7.A). Se depositan horizontalmente las capas de material que proviene de diferentes estratos geológicos y a través de una excavadora se van recogiendo verticalmente, obteniendo una combinación adecuada para el proceso. El secador de Arcilla (Fig. 1.7.B) a través de la aplicación de calor, elimina la humedad que guarda el material desde la cantera. Esta fase no se encuentra en todas las plantas, sólo en aquellas donde la arcilla por sus características requiere de preparación antes de la molienda.

1.3.5 ALMACENAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS

Cada una de las materias primas es almacenada por separado en depósitos de diferentes tipos (Fig. 1.8), debajo de los cuales las bandas transportadoras reciben los materiales y a través de básculas dosificadas se proporcionan las cantidades exactas de cada componente que formará un determinado tipo de cemento. Para el uso común, es utilizado un 69% de caliza, 30% de arcilla y el 1% de mineral de hierro. En el caso del cemento blanco se maneja un 70% de caliza blanca y 30% de caolín.

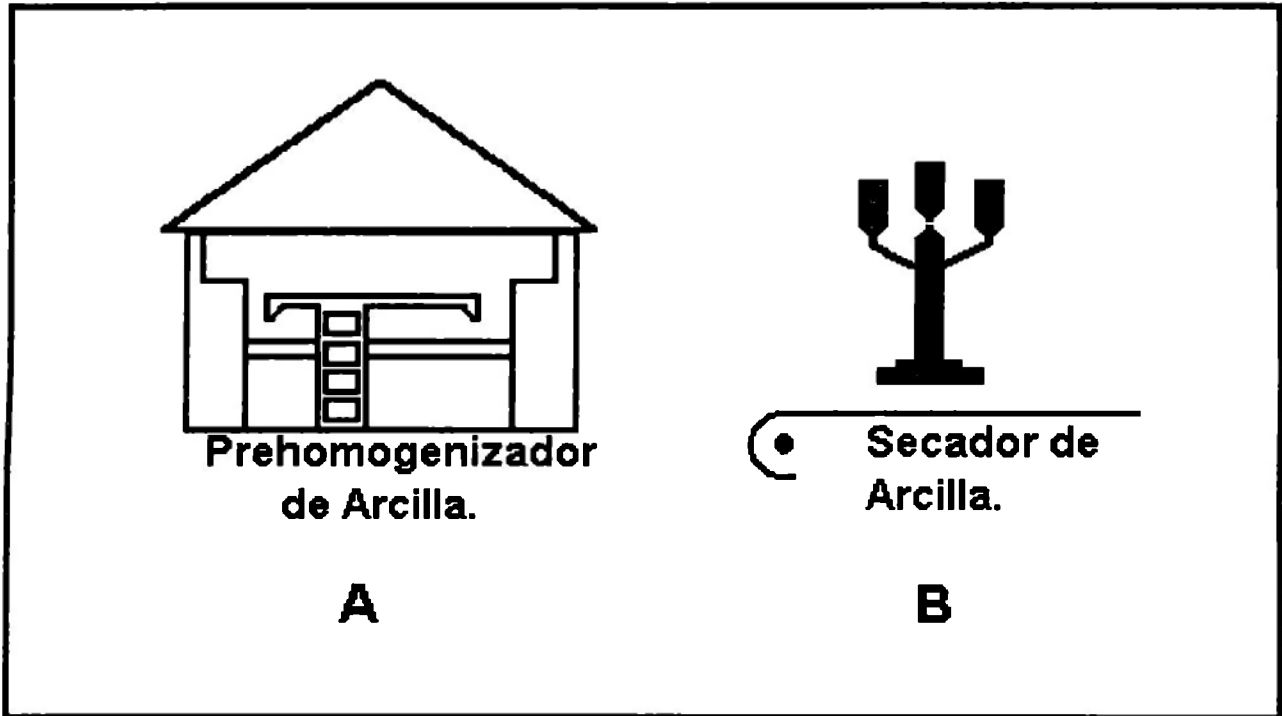


Figura 1.7 Prehomogeneización y Secado de Arcilla.

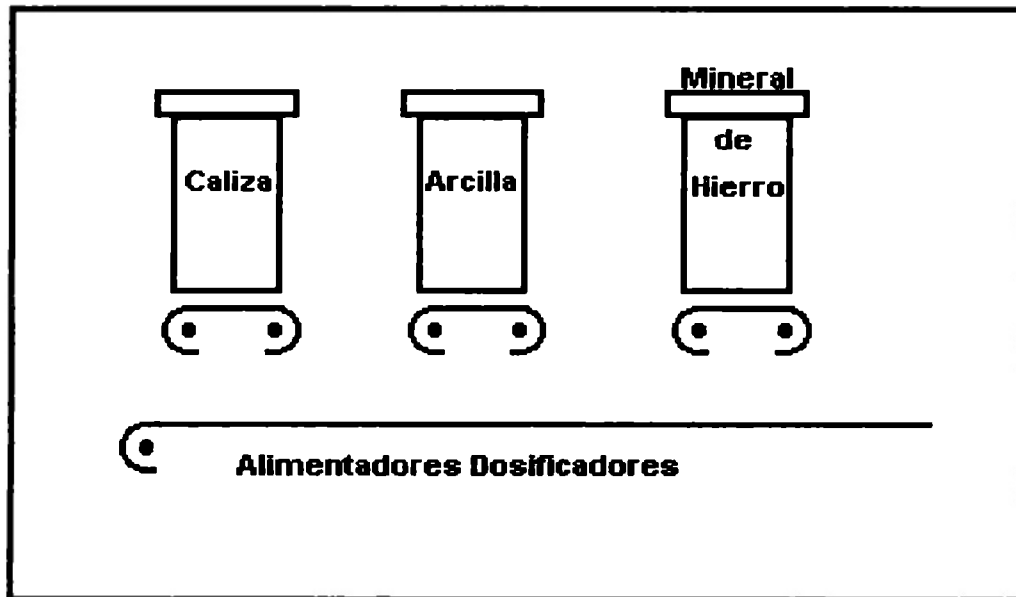


Figura 1.8 Almacenamiento de Materias Primas

1.3.6 MOLIENDA DE HARINA CRUDA

Las materias primas son alimentadas a un molino de bolas, el cual es un gran tambor cilíndrico giratorio de acero, en su interior tiene placas de acero endurecido que se fija a la coraza mediante tornillos (Fig. 1.9). El molino está dividido en dos cámaras por un tabique ranurado o mampara, con el fin de mantener los cuerpos moledores que son bolas de acero de diferentes tamaños en cada cámara, siendo en la primera de 3 1/2 a 2 1/2 pulgadas de diámetro que es donde se efectúa la molturación primaria por efecto del choque del material con la bola y blindaje interior del molino. El material premolido pasa a la segunda cámara que contiene bolas de 1 a 3/4 de pulgada, llevándose a efecto la molturación secundaria. Por medio de elevadores, gusanos y deslizadores se transporta el material al separador, que tiene la función de separar o clasificar el material fino del grueso, retornando las partículas gruesas a la alimentación del molino y las finas por medio de una bomba neumática se envían a los silos de almacenamiento de harina cruda (materia prima).

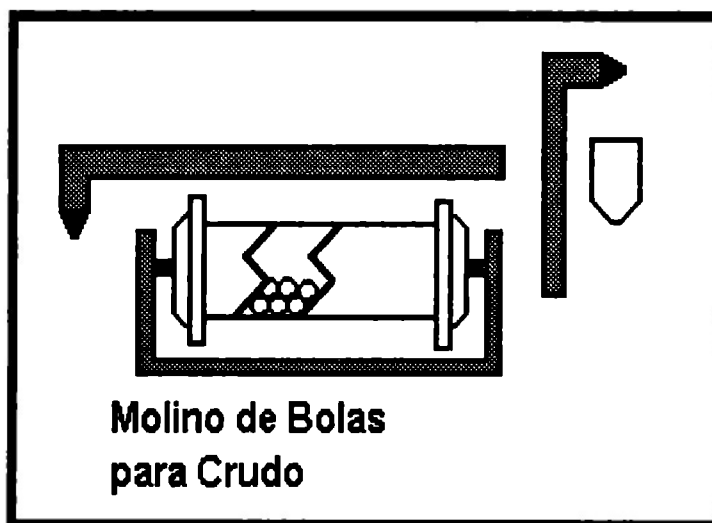


Figura 1.9 Molienda de Harina Cruda

1.3.7 HOMOGENEIZACIÓN DE HARINA CRUDA

El material que viene de la molienda se bombea por medios neumáticos y es almacenado en los silos homogeneizadores los cuales son cilindros de concreto en forma

vertical (Fig. 1.10), en cuyo interior el material es apilado en formas de capas. Se alimenta por la parte superior y al estar lleno, el silo descarga por medio de corriente de aire para fluidizar el material. La importancia de esta fase reside en la estandarización de la calidad del material, o sea que la composición química y física presente la mínima desviación posible, de tal manera que al ser alimentado el horno con harina cruda de buena homogeneización, las condiciones de quemado no varían constantemente.

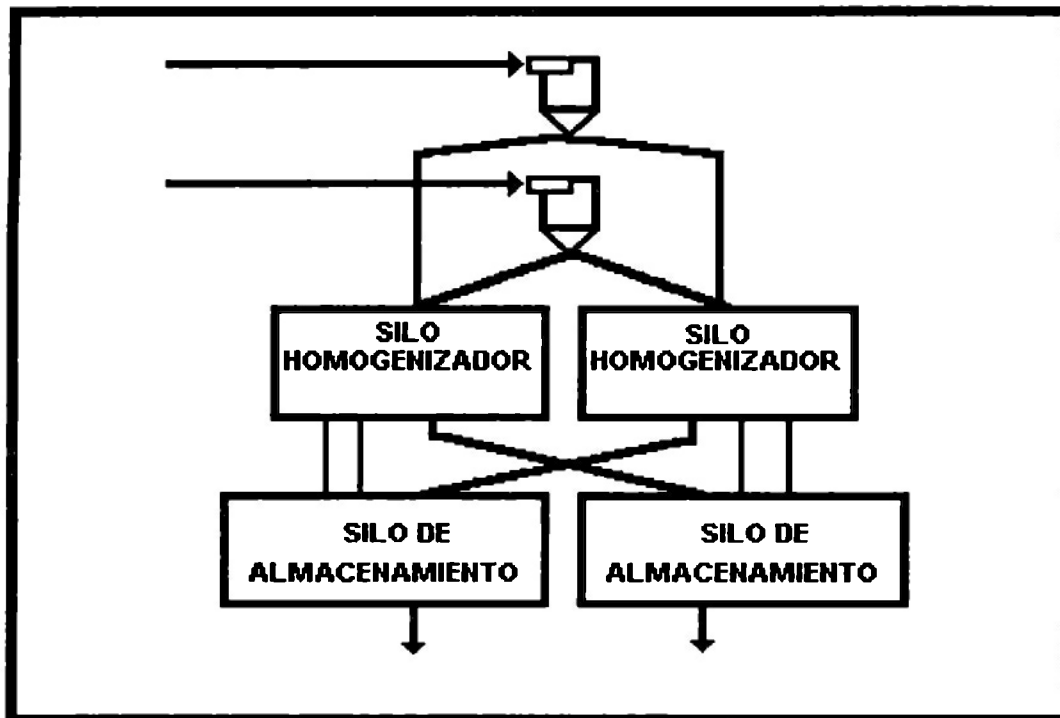


Figura 1.10 Homogeneización de Harina Cruda

1. 3. 8 CLINKERIZACIÓN

Esta es la parte medular del proceso donde se emplean grandes hornos rotatorios que son cilindros de placa de acero de varios espesores, teniendo un diámetro de 4.5 metros y 60 a 100 metros de longitud. El horno gira lentamente apoyado en soporte de rodillo, con una inclinación de 3% y su interior esta completamente recubierto de ladrillo refractario. En la parte inferior tiene un quemador que emana una flama de hasta 10 metros de largo, usando como energético el combustoleo o el gas natural. La materia prima (harina cruda) es introducida al horno por el extremo superior del precalentador (Fig. 1.11 A), el cual es un edificio vertical que posee ciclones o "etapas" que aprovechando los gases de la

combustión, secan y aumentan la temperatura del material, ya que la harina cruda antes de entrar a la instalación tiene una temperatura de 21°C a 38°C, conforme desciende se va incrementando hasta llegar a 800°C y así entrar al horno (Fig. 1.11 B), en donde continúa su descomposición química disociando el carbonato de calcio en óxido de calcio y gas carbónico. Esta reacción se denomina descarbonatación o calcinación y se lleva a efecto cuando alcanza entre 900°C y 1000°C. La harina cruda avanza a través del horno en sentido de la inclinación hasta que a 1400°C se obtiene un punto de fusión incipiente del material, dicha fusión no debe exceder el 20% de líquido para formarse pequeños nódulos o bolas incandescentes que al enfriarse se vuelven de superficie porosa y color gris obscuro, este producto de 3 a 4 centímetros de diámetro se denomina clínker. Lo que sucede en la zona de clinkerización es una reacción química entre calcio, silicio, aluminio y hierro para formar los principales compuestos del cemento que son los silicatos, aluminatos y ferroaluminatos, componentes que influyen en las características del cemento como resistencia, plasticidad, propiedades hidráulicas y conglomerantes.

Posterior a la formación de clínker pasa a una zona de enfriado a través de equipos que utilizan aire o agua saliendo del enfriador a 100°C. Los gases de la combustión y el polvo generado se extraen por un ventilador de tiro inducido y enviados al filtro colector de polvos que retiene de 8 a 10% de la alimentación de la harina cruda evitando cualquier emisión de partículas a la atmósfera.

Al salir del enfriador, el clínker es llevado a un almacén o silo de clínker por medio de un transportador de cubos en donde se deposita en lugar cerrado para evitar su intemperización.

1. 3. 9 MOLIENDA DE CEMENTO

El yeso es la última materia prima que se integra al proceso, su objetivo es alargar el tiempo de fraguado del cemento al utilizarse en la construcción. El clínker y el yeso son conducidos a unas tolvas separadas entre sí, de ahí ambos materiales son alimentados al molino en dosis diferentes a una banda común. El clínker en proporción de 94 a 95% y el yeso de 6 a 5%.

El molino de cemento es similar al de harina cruda (Fig. 1.12), que es un cilindro recubierto interiormente con placas de acero y como cuerpos molidores cuenta con bolas de acero especial de 3 1/2 a 2 1/2 pulgadas en la primera cámara (premolido) y de 1 3/4 de pulgada en la segunda cámara, estando separadas por una criba.

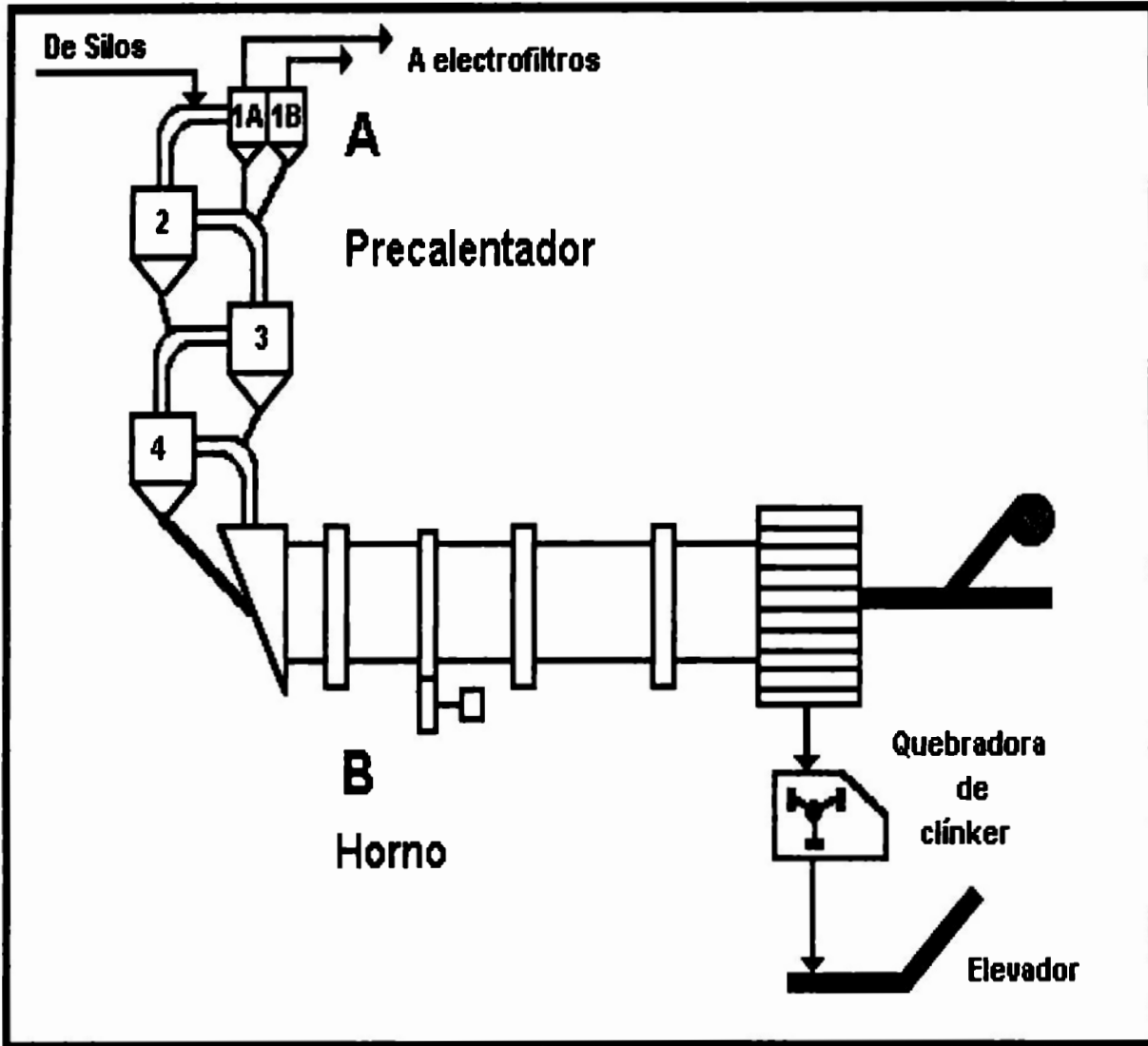


Figura 1.11 CLINKERIZACIÓN

El material por medio de elevadores de cangilones es llevado a un separador que tiene la función de distribuir el material fino a los silos de cemento y el grueso retornarlo al molino. También esta fase cuenta con colectores de polvo o filtros electrostáticos que capturan las partículas evitando su salida a la atmósfera y su recuperación en esta fase.

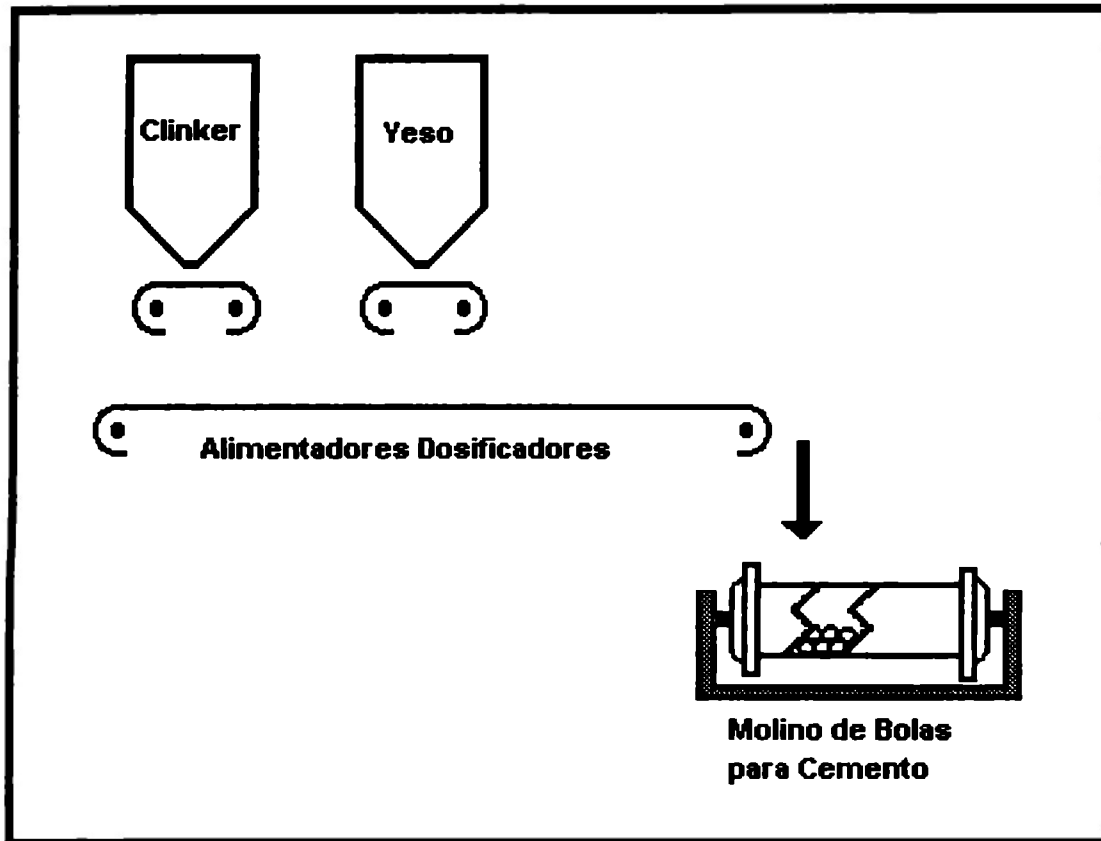


Figura 1.12 Molienda de Cemento

1. 3. 10 ENVASE Y EMBARQUE DE CEMENTO

El cemento es enviado a los silos de almacenamiento de este producto, la extracción de los silos se lleva a efecto por medio de sistemas neumáticos y es transportado a la sección de envasado pasando a través de unas cribas, a fin de separar los cuerpos extraños que eventualmente se hubieran deslizado. Llegando a las tolvas de reserva situadas encima de las máquinas envasadoras.

Para envasar el cemento en sacos de papel se utilizan dos tipos de máquinas envasadoras, rotativas y estáticas con operación de llenado y pesado.

Los sacos una vez llenados (50 Kg. más - menos 750 grs.) caen de la máquina ensacadora sobre unas cintas transportadoras que los conduce al puesto de embarque, donde se cargan en camiones o en vagones de ferrocarril.

El cemento para su expedición a granel es extraído de los silos por medio de dispositivos neumáticos, conducido a recipientes de transporte, vagones (tolvas de ferrocarril) o camiones tanque (pipas) que lo llevan al pie de la obra (Fig. 1.13).

Se tienen instalaciones de captación de polvo debidamente adaptadas a los puntos donde éste se desprende, manteniendo limpia la atmósfera.

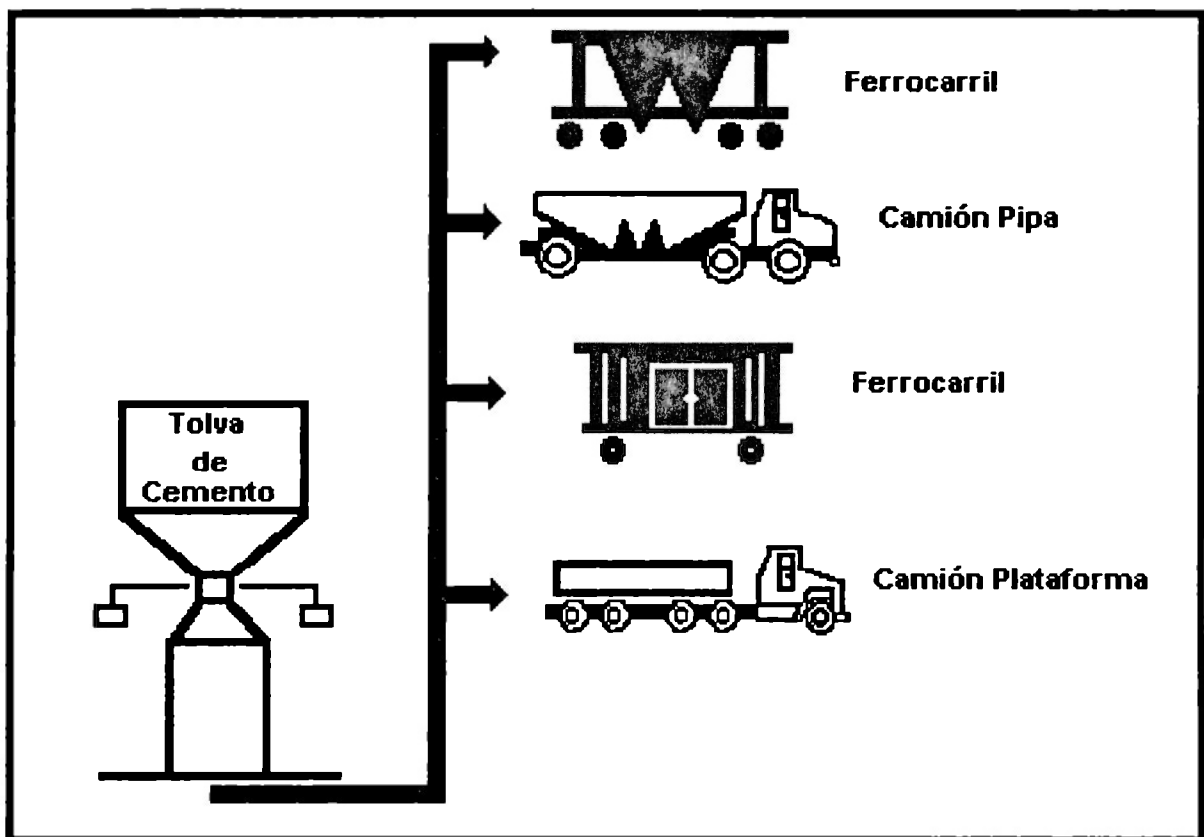


Figura 1.13 Envase y Embarque del Cemento.

1.4 CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO

El cemento Portland se define actualmente como el producto obtenido de la pulverización de un clinker que consiste esencialmente de Silicatos hidráulicos de Calcio, obtenidos por un calentamiento a fusión parcial de una determinada mezcla homogénea de materiales contenidos principalmente: Cal (CaO) y Sílice (SiO_2) con una pequeña porción de Alúmina (Al_2O_3) y Óxido Férrico (Fe_2O_3). Ningún otro material, excepto yeso (o sus derivados), o agua, o ambos podrán ser adicionados después del clinkerizado.

El Cemento Portland se clasifica en los cinco tipos siguientes:

- TIPO I ó NORMAL.- Para uso en construcciones generales de concreto cuando no se requieren las propiedades especificadas para los tipos II, III, IV y V.
- TIPO II ó MODERADO CALOR DE HIDRATACIÓN.- Para uso en construcciones generales de concreto expuestas a la acción moderada de los sulfatos, o cuando se requiere un calor de hidratación moderado.
- TIPO III ó RESISTENCIA RÁPIDA.- Para la elaboración de concretos en los que se requiere una alta resistencia a temprana edad.
- TIPO IV ó DE BAJO CALOR DE HIDRATACIÓN.- Para usar en concretos donde el requerimiento es un bajo calor de hidratación.
- TIPO V ó ALTA RESISTENCIA A LOS SULFATOS.- Para usar en concretos donde se requiere una alta resistencia a la acción de los sulfatos.
- El Cemento Portland Blanco puede ser clasificado como Tipo I ó Tipo III, según satisfaga los requerimientos de la norma, caracterizándose únicamente por su bajo o casi nulo contenido [2].

CAPITULO 2

QUÍMICA DEL CEMENTO

1.1 SIMBOLISMO QUÍMICO

Con la intención de simplificar y estandarizar el simbolismo químico que se usa en este trabajo, se hace el siguiente desarrollo.

Todos los materiales se derivan de Elementos, tales como el Hierro, Oxígeno, Aluminio, Azufre, Sílice, Calcio, Sodio, Magnesio, etc., los cuales se encuentran combinados en una variedad de formas, de tal manera que nos presentan los materiales que nosotros conocemos.

Cada elemento está en sí mismo formado de una acumulación de Átomos, los cuales están considerados como la más pequeña partícula indivisible de materia. Los átomos de cada elemento, y le imparten al elemento su identificación y característica. Hay una relación entre los átomos y las características del elemento, por ejemplo átomos pequeños son gases tales como hidrógeno y oxígeno, con átomos grandes se tienen elementos sólidos, tales como aluminio o hierro. La diferencia de tamaño de los átomos se definen en términos de Peso atómico, el cual no es un peso real, pero es un dato comparativo con respecto a todos los otros átomos, al átomo de oxígeno se le ha dado 16.00, y el cual hace que el átomo de hidrógeno tenga un valor mucho muy cercano a la unidad.

Las combinaciones de elementos o compuestos, están hechos de una acumulación de moléculas, en las cuales hay una combinación sistemática de los átomos de dos o más elementos. La combinación sistemática particular o Estructuras Moleculares, son únicas de cada compuesto y dan a éste, identificación y características. El peso Molecular, de cada compuesto es simplemente la suma de los pesos atómicos de los átomos que forman la estructura molecular.

2.2 FORMULACIÓN QUÍMICA

Como las estructuras moleculares son complejas, es necesario simplificar la descripción de los materiales con el uso de símbolos únicos para cada elemento. En la Tabla 2.1 se dan los símbolos únicos y pesos atómicos para una selección de los elementos que nos conciernen en el estudio de la Química del cemento. Los compuestos están formados por la combinación de elementos de acuerdo al número que nos definen

perfectamente las Leyes Naturales. En la fórmula química de los compuestos, su estructura está indicada por el número de átomos dados de cada elemento y lo cual no va a formar una molécula por compuesto, por ejemplo, la Cal es el Óxido de Calcio y la cual en su estructura contiene un átomo de calcio y un átomo de oxígeno y su fórmula se escribe: CaO. Similarmente, la sílica es un dióxido de silicio, el cual contienen en su estructura un átomo de sílice combinado con dos átomos de oxígeno, y su fórmula se escribe: SiO₂. En la Tabla 2.2 , tenemos pesos moleculares y símbolos de los compuestos relacionados con la química del cemento.

El número de átomos de un elemento particular está indicado por el sufijo, como en el caso del oxígeno en SiO₂.

SÍMBOLO DE LOS ELEMENTOS Y PESOS ATÓMICOS		
ELEMENTO	SÍMBOLO	*PESO ATÓMICO
ALUMINIO	Al	26.97
CALCIO	Ca	40.08
CARBÓN	C	12.01
HIDRÓGENO	H	1.01
FIERRO	Fe	55.84
MAGNESIO	Mg	24.32
MANGANESO	Mn	54.93
OXIGENO	O	16.00
FÓSFORO	P	30.98
POTASIO	K	39.10
SILICIO	Si	28.09
SODIO	Na	23.00
AZUFRE	S	32.06
TITANIO	Ti	47.90

Tabla 2.1

*REDONDEADOS A 2 DECIMALES

FORMULA MOLECULAR Y PESO MOLECULAR DE COMPUESTOS

COMPUESTOS	FORMULA	PESO MOLECULAR
AGUA	H ₂ O	18.02
DIÓXIDO DE CARBONO	CO ₂	44.01
CAL (OXIDO DE CALCIO)	CaO	56.08
MAGNESIA	MgO	40.32
SÍLICA	SiO ₂	60.09
TITANIA	TiO ₂	79.90
ALÚMINA	Al ₂ O ₃	101.94
ÓXIDO FÉRRICO	Fe ₂ O ₃	159.68
ÓXIDO MANGÁNICO	Mn ₂ O ₃	157.86
PENÓXIDO DE FÓSFORO	P ₂ O ₅	141.96
TRIÓXIDO DE AZUFRE	SO ₃	80.06
ÓXIDO DE SODIO	Na ₂ O	62.00
ÓXIDO DE POTASIO	K ₂ O	94.20
CARBONATO DE CALCIO	CaCO ₃	100.09
CARBONATO DE MAGNESIO	MgCO ₃	84.33
CARBONATO DE SODIO	Na ₂ CO ₃	106.01
SULFATO DE CALCIO	CaSO ₄	136.14
SULFATO DE POTASIO	K ₂ SO ₄	174.26

Tabla 2.2

2.3 ESTRUCTURA MOLECULAR

Por lo que concierne a nosotros, casi sin excepción, los compuestos dentro de la Química del Cemento tienen un comportamiento que consiste en una combinación de dos o más de las formas de óxidos mostrados en la Tabla 2.2., los cuales nos dan combinaciones para formar compuestos de formas más complejas con sus correspondientes estructuras, nosotros, en la escritura de las fórmulas de los más importantes compuestos de la química del cemento, usamos una fórmula en la cual conservamos la fórmula de los óxidos constituyentes incluidos en esta estructura, por ejemplo: para el silicato dicálcico, nosotros escribimos $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ y no Ca_2SiO_4 , como debía de ser usado, similarmente, aluminato tricálcico escribimos $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ y no $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$. Las razones para esto se verán claramente conforme continuemos en el desarrollo de este tema.

Hay excepciones para esto cuando nosotros tratamos con compuestos como Carbonatos, Sulfatos y Fosfatos. Dióxido de Carbono CO_2 , Trióxido de Azufre SO_3 y Pentóxido Carbónico, Sulfúrico y Fosfórico, los cuales con agua nos dan los ácidos respectivos.

$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Anhídrido Carbónico	$\text{H}_2\text{O}.\text{CO}_2$ ó H_2CO_3 Ácido Carbónico
$\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ Anhídrido Sulfúrico	$\text{H}_2\text{O}.\text{SO}_3$ ó H_2SO_4 Ácido Sulfúrico
$\text{P}_2\text{O}_5 + 3\text{H}_2\text{O}$ Anhídrido Fosfórico	$3\text{H}_2\text{O}.\text{P}_2\text{O}_5$ ó $2\text{H}_3\text{PO}_4$ Ácido Fosfórico

Estas formas anhidras son frecuentemente usadas en expresiones de análisis químicos. Para compuestos como éstos, por la forma convencional establecida nosotros usamos CaCO_3 para carbonato de Calcio, y no $\text{CaO}.\text{CO}_2$, similarmente K_2SO_4 para sulfato de potasio, y no $\text{K}_2\text{O}.\text{SO}_3$, de la misma manera usamos $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ para fosfato de calcio y no $3\text{CaO}.\text{P}_2\text{O}_5$. En la Tabla 2.3., están dadas las estructuras de los principales compuestos

que se usan en la Química del Cemento, incluyendo el Cemento y los productos más complejos de la reacción entre Cemento y Agua.

LOS PRINCIPALES COMPONENTES EN LA QUÍMICA DEL CEMENTO, SUS FÓRMULAS Y PESOS MOLECULARES		
--	--	--

COMPUESTOS	FORMULA	PESO MOLECULAR
SILICATO TRICÁLCICO	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	228.33
SILICATO DICÁLCICO	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	172.25
ALUMINATO TRICÁLCICO	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	270.18
ALUMINIO FÉRRICO TETRACÁLCICO	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	485.94
SILICATO DE CALCIO HIDRATADO	$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	134.1
ALUMINATO TETRACÁLCICO HIDRATADO	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	560.52
ALUMINATO TRICÁLCICO HIDRATADO	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	378.30
SULFOALUMINATO DE CALCIO HIDRATADO (ETRINGITA)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$	1237.22
SULFOALUMINATO DE CALCIO HIDRATADO	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	622.56

Tabla 2.3

2.4 FACTORES DE COMPOSICIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

Para fabricar cemento pueden utilizarse tanto minerales de origen natural como productos industriales. Como materiales de partida sirven sustancias minerales, que contienen los componentes principales del cemento: cal, sílice, alúmina y óxidos de hierro. Estos componentes raramente se encuentran en las proporciones deseadas, en una sola sustancia. Por lo tanto, la mayoría de las veces se ha de elegir la mezcla de

un componente rico en cal con otro pobre en cal con otro pobre en cal pero que contiene más alúmina y óxidos de hierro.

2. 4. 1 ESTRUCTURA ESENCIAL DEL CLÍNKER PARA EL CEMENTO PORTLAND

El clínker producido por el quemado de una mezcla del material crudo preparado para tal efecto, a una temperatura de fusión parcial (20 a 30% fase líquida), consiste esencialmente de una mezcla de cuatro componentes cristalinos de calcio, dos de óxido de silicio, uno con óxido de aluminio y óxido férrico juntos.

En el clínker además de los cuatro constituyentes principales, calcio (CaO), sílica (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), hay algunos constituyentes menores, tales como óxidos y metales alcalinos (Na₂O.K₂O), magnesia y azufre (presente principalmente como sulfatos alcalinos y de calcio), los cuales juntos representan una cantidad que varía entre 2% y 6% en peso del clínker.

Debe mencionarse en esta etapa que en la industria del cemento se usa un método de formulación abreviada, por ejemplo:

Calcio o CaO	se representa por la letra C
Sílica ó SiO ₂	se representa por la letra S
Alúmina ó Al ₂ O ₃	se representa por la letra A
Óxido férrico ó Fe ₂ O ₃	se representa por la letra F

Los cuatro principales componentes en el clínker son:

1. Silicato tricálcico, 3CaO.SiO₂, se escribe C₃S. Se le nomina frecuentemente como alita y bajo este nombre se deduce que no es puro C₃S, pues siendo algo modificado por la presencia en solución sólida de algunos constituyentes menores, en particular MgO y Al₂O₃.
2. Silicato dicálcico, 2CaO.SiO₂ ó C₂O, referido también como belita. Hay algunas formas cristalinas de C₂S, de las cuales está estabilizada por impurezas. La forma C₂S, debe ser evitada hasta donde sea posible, pues no tiene propiedades hidráulicas.

3. Aluminato tricálcico, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, escrita C_3A . No obstante que este compuesto se encuentra presente rara vez en una cantidad mayor de 15% y usualmente considerada dentro del rango de 9 al 12%, tiene un efecto importante en las propiedades del cemento, como se verá más adelante.
4. Aluminoferrito cálcico. Se le designa comúnmente como aluminoferrito tetracálcico $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ó C_4AF , pero puede de hecho considerarse que se va a encontrar dentro de un amplio rango de composición representada por composiciones de ferrito dicálcico (C_2F) y aluminato dicálcico (C_2A) de la cual C_4AF ó $\text{C}_2\text{A}\cdot\text{C}_2\text{F}$ es sólo una combinación particular. En el elemento de alta resistencia a los sulfatos, éste tiene una composición muy cercana a $\text{C}_2\text{A}\cdot 2\text{C}_2\text{F}$.

2. 4. 2 RUDIMENTOS QUÍMICOS

Carbonato de Calcio, el único compuesto que se analiza en la forma que se encuentra normalmente en las materias primas es el carbonato de calcio ó CaCO_3 .

El CaCO_3 al calentarse en el horno desprende CO_2 y se convierte a óxido de calcio ó CaO ($\text{CaCO}_3 + \text{calor} = \text{CO}_2 + \text{CaO}$). La razón por la que se analiza el CaCO_3 como tal, es que su análisis como carbonato se hace por el método llamado de titulación que es un método sumamente rápido que nos permite llevar un control horario (aún cuando aproximado) de la cantidad de CaCO_3 y por lo tanto de CaO que tenemos en la mezcla cruda.

Uno de los inconvenientes del método (más no el único), es que al mismo tiempo que analizamos el carbonato de calcio, también analizamos el carbonato de Magnesio que tenemos en la sección oeste de la cantera, ya que en el método de titulación no se puede distinguir entre carbonato de calcio y de magnesio.

Carbonato de Magnesio. El magnesio que contienen nuestras materias primas se encuentra como carbonato de magnesio (MgCO_3) es analizado como carbonato de calcio cuando se utiliza el método de titulación. Con el objeto de compensar este error, el laboratorio efectúa análisis periódicos completos de nuestras materias primas, determinando por otros métodos la cantidad promedio de carbonato de magnesio que titularíamos como carbonato de calcio y hace los ajustes necesarios. En otras palabras, si

el laboratorio espera que una piedra tenga 3% de carbonato de magnesio y desea una guía de 76% de carbonato de calcio, subirá la guía de carbonatos a 79%. El óxido de magnesio no nos perjudica, ya que nos ayuda en el quemado de hornos siempre y cuando se mantenga constante y dentro de los límites bajos, puesto que sirve de fundente en el proceso de clinkerización, pero sí la cantidad de magnesio en el cemento aumenta, puede causar serios problemas con expansiones anormales en el concreto.

Sílice. Se encuentra combinada con el fierro y con el aluminio, formando varias clases de compuestos sumamente complejos, o bien, en forma de sílice libre (cuarzo).

Cuando la sílice se encuentra en forma combinada con el aluminio y el fierro, estos compuestos se disocian fácilmente durante el proceso de calentamiento en el horno, liberando al óxido de silicio (SiO_2) que será el que se combine con el óxido de calcio (CaO) para formar los silicatos o sea el C_2S y en C_3S .

Cuando el sílice se encuentra en forma libre o sea en cristales de cuarzo, es muy difícil que combine con el óxido de calcio durante el proceso de calcinación.

Como los métodos normales de análisis que están a nuestro alcance no distinguen entre sílice libre y sílice combinada, los análisis mostrarán el total de sílice en la materia prima. Como la sílice libre no se combina fácilmente, el resultado será un clinker con partículas de sílice libre y un exceso de cal libre que no encontró sílice suficiente para combinarse.

En nuestras materias primas, la sílice libre se encuentra principalmente en la piedra caliza y puede ser detectada por medio de un examen óptico del material. La poca sílice libre que se encuentra en el barro es muy difícil de observar por encontrarse en cristales pequeños, pero afortunadamente parece estar concentrada en el barro arenoso que no utilizamos.

ÓXIDO DE ALUMINIO Y ÓXIDO FÉRRICO. El óxido de aluminio se combina con el óxido de calcio para formar el C_3A . Este a su vez se combina con el óxido férrico y con más cal para producir el C_4AF . Estos dos compuestos forman la matriz del clinker y durante su formación se encuentran en estado semilíquido facilitando la combinación de los silicatos C_2S y C_3S . De la relación de estos dos óxidos entre sí (A/F), o de la relación de los otros

óxidos con ellos (S/A + F, etc.), depende la cantidad de viscosidad del líquido presente en la zona de clinkerización y por lo tanto la facilidad de quemado.

PRINCIPALES COMPUESTOS ENCONTRADOS EN LA PIEDRA CALIZA.

CaCO_3	=	75 A 97%
Al_2O_3	=	0.2 A 2%
Fe_2O_3	=	0.2 A 1%
SiO_2	=	0.5 A 12%
MgO	=	0.6 A 3 % (alcanza valores hasta de 30%)

En la cantera se pueden distinguir tres zonas de piedra caliza más o menos definidas:

- Lado este: Piedra "roja", de CaCO_3 bajo (75 - 88%) y alúmina o sílice alta (puede ser silicosa o aluminosa).
- Parte central: Piedra gris, de CaCO_3 entre 90 y 95% contenido promedio de sílice, alúmina y fierro. Puede considerarse como la piedra más constante.
- Lado oeste: Piedra variable en apariencia, con un CaCO_3 alto (92 - 97%) contaminada con Mg que puede dar un carbonato aparente (por titulación) de 97 a 103%.

Barro:

Se distinguen tres clases de arcilla - barro:

- Barro café: Se encuentra en una capa variable en espesor (1 a 4 mts) inmediatamente abajo de la capa superior de caliche y tierra negra, está en algunas ocasiones muy contaminado con el barro arenoso.
- Barro arenoso ó arena pómez: Se encuentra en capas de 2 a 4 metros de espesor entre el barro café y la primera capa de barro rojo, también existe otra capa de barro arenoso entre la primera capa y la segunda capa de barro rojo aún sin explotar.
- Barro rojo: Se encuentra en dos capas de aproximadamente 4 metros de espesor cada una. La localización de esas capas ya está especificada en el inciso anterior.

El barro arenoso también conocido como arena pómez, aún cuando tiene una composición química parecida al barro café, se comporta de una manera distinta durante el

proceso, quizás debido a que los compuestos complejos de sílice-aluminio-ferro presentan distintos puntos de fusión que los compuestos encontrados en los barro café o rojo. Se ha decidido no usar este tipo de barro y por lo tanto no se dan análisis químicos tipo. Los compuestos primarios encontrados en el barro café y rojo son los siguientes:

Barro	Café	Rojo
CaCO ₃	10-25%	10-20%
MgO	1.5-3%	1.5-2.5%
Al ₂ O ₃	14-16%	18-21%
SiO ₂	51-60%	50-54%
Fe ₂ O ₃	2.5-4%	3.5-6.0%

MINERAL DE FIERRO

El mineral de fierro que usamos como corrector debido a la falta de óxido férrico de nuestras materias primas, es un mineral extraído de Zimapán que tiene un contenido de Fe₂O₃ entre 65 y 85%, siendo el resto SiO₂, Al₂O₃ y MgO en cantidades más o menos constantes.

2. 4. 3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

La composición química del cemento portland varía considerablemente en los componentes presentes. Se adjunta un análisis del cemento portland blanco y de un cemento portland de alta resistencia a los sulfatos, en ambos puede ser visto que sus componentes se encuentran engañosamente fuera del rango normal del cemento portland ordinario y lo cual da a estos cementos sus propiedades especiales.

La composición química del cemento está definida en términos de varios factores y los cuales son una guía a las propiedades del cemento.

Los factores son: relación de sílice, relación de alúmina/ferro, factor de la saturación de cal y factor de cal de combinación.

Hay un número de componentes que tienen que limitar sus cantidades presentes por las especificaciones necesarias.

1. Residuo insoluble (R.I.). Este es el material insoluble en ácido, el cual se deriva principalmente del material terroso que generalmente acompaña al yeso. No deberá exceder de 0.75% cuando se determina por método descrito en las especificaciones.
2. Magnesia (MgO). El contenido de magnesia, en peso, no deberá exceder de 5%.
3. Trióxido de azufre (SO₃). El contenido permitido de azufre total en el cemento expresado como SO₃, no deberá exceder de 3.5% cuando el contenido de C₃A es mayor de 8.0% ó 3.0%, cuando el contenido de C₃A es menor que 8.0%.
4. Pérdida por Ignición. El total de la pérdida por ignición no deberá exceder de 3%.

2. 4. 4 RELACIÓN DE SÍLICE

Esta es la relación del contenido de sílica en el cemento a la suma de los óxidos de aluminio y fierro contenidos en el mismo cemento y se expresa:

$$\frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3} \quad \text{o más brevemente:} \quad \frac{S}{A + F} \quad \text{o} \quad S/R$$

El significado de este factor se verá más claramente sobre el desarrollo de este estudio, pero de una manera simple y desde un punto de vista de composición, si es alta la relación de sílice, será alta la cantidad de silicatos de calcio que se tengan en este cemento, y los otros factores no presentarán cambio.

2.4.5 RELACIÓN ALÚMINA/FIERRO

La relación Alúmina/Fierro nos representa la relación de contenido de óxido de aluminio a contenido de óxido férrico en el cemento y se expresa:

$$\frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} \quad \text{o más brevemente } A/F$$

Esta relación nos determina la proporción de C_3A a C_4AF en el cemento. Entre mayor sea esta relación, mayor será la proporción C_3A . Cuando se tiene una relación de 0.64, el contenido de C_3A es cero, con el C_4AF como la fase ferrita.

2.4.6 FACTOR DE SATURACIÓN (F.C.S.)

En general se debe producir un clínter con un alto contenido de C_3S , tan alto como sea posible, dependiendo de la composición que nos puedan dar en general los materiales disponibles para la mezcla cruda y de las condiciones de manufactura. El potencial para esto puede ser expresado como factor de cal de saturación y el cual está definido por:

$$F.C.S. = \frac{(CaO) - 0.7 (SO_3)}{2.8(SiO_2) + 1.2(Al_2O_3) + 0.65(Fe_2O_3)}$$

(x 100 para ser expresados como porcentaje).

Donde cada símbolo dentro de los paréntesis se refiere al porcentaje (en peso del total del cemento), del óxido respectivo, incluyendo cualquier residuo insoluble. Veremos después que esta expresión asume que todo el SO_3 presente está combinado con CaO y el 0.7 (SO_3), representa el CaO equivalente al SO_3 en el $CaSO_4$.

Esta expresión ha sido derivada de los estudios de combinación de equilibrio de estos materiales. Cuando $F.C.S. = 1.0$ (ó 100%), la proporción máxima de sílice presente está potencialmente como C_3S y no hay presencia de cal libre a la temperatura de quemado en el sistema SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO . A medida que el $F.C.S.$, se hace menor que 1.0, la proporción de sílice como C_3S disminuye progresivamente y aumenta como C_2S .

2. 4. 7 FACTOR DE CAL DE COMBINACIÓN

La palabra, potencialmente, con respecto al contenido de C_3S , se usa porque en realidad en todo cemento normal hay contenido de cal libre, por ejemplo: Cal que no se ha combinado con cualquier otro componente y por lo tanto contribuye a la producción de C_3S . Es por esta razón que se tiene un factor adicional conocido como factor de cal de combinación y el cual es diferente del factor de cal de saturación, solamente que éste toma en cuenta el contenido de cal libre, lo que es:

$$F.C.C. = \frac{(CaO) - 0.7 (SO_3) - (CaO \text{ Libre})}{2.8(SiO_2) + 1.2(Al_2O_3) + 0.65(Fe_2O_3)}$$

Por lo tanto cuando el F.C.C.= 1.0, la máxima proporción posible de sílice está como C_3S de acuerdo a los estudios de equilibrio de la Química de la interacción de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO .

2. 5 POSICIÓN DE LOS CONSTITUYENTES MENORES

2. 5. 1 RESIDUO INSOLUBLE

Este se origina principalmente por impurezas de arcilla en el yeso. Pequeñas cantidades pueden ser ocasionalmente originadas por residuos silicios en el clínker. El límite máximo que fija la Norma Mexicana es de 0.75%.

2. 5. 2 MANGANESO

Principalmente presente como Mn_2O_3 , y se considera que actúa de una manera análoga al Fe_2O_3 , contribuyendo en la estructura del C_4AF , como un sustituto de fierro. Normalmente su efecto es muy ligero pero cuando se presenta en cantidades considerables, afecta disminuyendo la relación de Sílice y la relación de Alúmina/Fierro, y para los cálculos delo F.C.S., y de los componentes potenciales debe de sumarse al Fe_2O_3 .

2. 5. 3 TITANIO

Presente como TiO_2 , en solución sólida en los silicatos y otras fases y posiblemente algunas veces como Titanio de Calcio.

2. 5. 4 FÓSFORO

Generalmente se encuentra en solución sólida en la fase silicato dicálcico, y se considera que tiene un efecto benéfico en la propiedad del cemento cuando está presente en pequeñas cantidades dentro de un nivel óptimo de 0.2% y 0.3% como P_2O_5 .

2. 5. 5 MAGNESIO

Tiene un límite en el cual reacciona de manera análoga al CaO y crea un efecto de incremento en el F.C.S., del cemento y afecta la proporción de componentes generales.

Se sabe que entra en la estructura del C_3S en solución sólida en unión con algo de Alúmina. La Magnesia y la Alúmina juntas pueden presentar arriba del 5% de la Alita presente, lo cual representa un mayor contenido de Alita, que la obtuvo (C_3S) por un simple cálculo por las fórmulas de Bogue. La fase líquida a la temperatura de quemado es esencialmente la formada por C_3A y C_4AF , con algo de cal adicional y una pequeña cantidad de Sílice puede tomar hasta 5% de MgO (en el contenido líquido) dentro de esta solución, por lo que en el clínker frío el MgO viene incorporado dentro de las estructuras del C_3A y C_4AF y también en una pequeña porción dentro de la estructura del C_2S como un sustituto del CaO . Se tiene la consideración que un contenido de MgO hasta de 2% (en el clínker), sufre un acomodo por la razón anteriormente expresada, o sea, contribuyen en la estructura y contenido de los principales constituyentes del Cemento. Un contenido de MgO adicional o que no entre en combinación por una distribución irregular está presente como MgO es potencialmente el culpable de causar insanidades en la hidratación de morteros o concretos, pues produce fuerzas expansivas dentro del material ya endurecido cuando el MgO se hidrata para producir $Mg(OH)_2$. Esta es la razón principal por lo cual los límites de nuestras especificaciones nos dan un contenido máximo de 5.0% de MgO en el cemento.

2. 5. 6 TRIÓXIDO DE AZUFRE

El SO_3 en el cemento llega por dos caminos, uno, por la adición del yeso (en cualquiera de las formas de sulfato de calcio), y otro, desde las materias primas y del combustible, por lo cual este contenido de SO_3 , se encontraba integrado en el clínker. El sulfato presente en el clínker, se encuentra generalmente como sulfatos alcalinos, pero en clínker con alto contenido de SO_3 (mayor de 0.5%), pueden ser encontrados como sulfato de calcio, dependiendo de las concentraciones relativas de sulfato y álcalis en el clínker. En la mayoría de estos casos el sulfato de calcio se encuentra como una sal doble con sulfato de potasio, $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$, la cual tiene una alta solubilidad.

2. 5. 7 PÉRDIDA POR IGNICIÓN

Esta se origina por una mezcla de agua y dióxido de carbono. En el más simple de los casos, el agua se encuentra parcialmente combinada con el Sulfato de Calcio desde la adición del yeso (agua de cristalización del yeso o del semihidrato), y parcialmente en combinación con algo de la cal libre en forma de hidróxido de calcio. El contenido de CO_2 puede ser muy pequeño, procediendo de una carbonatación limitada de la cal libre y posiblemente de la cal combinada, ocurriendo esta carbonatación principalmente durante el proceso de molienda. Otra fuente de procedencia del CO_2 son la impureza que como carbonato de calcio traiga presente el yeso.

2. 5. 8 ÁLCALIS

Los álcalis particularmente el Óxido de Potasio (K_2O), se encuentra en forma de sulfatos para combinarse con los álcalis (K_2O y Na_2O), éstos entran en combinación en los componentes principales del clínker como sustitutos de cal (CaO), con lo cual, como en el caso de la Magnesia se origina un incremento en el factor de cal de saturación y modifica la combinación de los componentes potenciales en la dirección de un incremento en el contenido de C_3S . De hecho, gran parte de los álcalis que no están presentes como sulfatos, tienden a permanecer con las fases de aluminato tricálcico y silicato de calcio [9].

2.6 PROCESO DE CLINKERIZACIÓN

INTRODUCCIÓN.

El objetivo de este artículo es describir como la composición y finura de la mezcla cruda y los regímenes de calcinación y enfriamiento a los cuales está sujeto afecta la calidad del cemento.

Se ha encontrado que la calidad del cemento no depende únicamente de la composición química, sino que además hay una marcada influencia de la naturaleza física y estructura cristalina del clínker.

Son conocimientos básicos para que en cada planta con sus propias materias crudas, encuentren los parámetros y regímenes de trabajo para obtener la mejor calidad del cemento, ya que es necesario entender teóricamente los efectos de la composición química y física del crudo y la naturaleza del clínker.

La fabricación del cemento involucra un conjunto de Procesos y Operaciones Unitarias que permiten la conjunción y transformación de las materias primas explotadas en Canteras, hasta la obtención de un producto final de las características fisicoquímicas deseadas y obtenido en las condiciones técnicas y económicas más ventajosas, empleando para ello los equipos y maquinaria disponibles en planta, así como el personal especializado para cada etapa y su condición general.

El proceso de Producción de Clínker constituye el centro de Gravedad de este complejo esquema. Todas las actividades previas están orientadas a la preparación de un material crudo de alimentación al Horno de características óptimas adecuadas y la composición química, física y mineralógica del clínker producido determinará los parámetros de la molienda final y constituye la base fundamental de las condiciones de calidad del cemento y las características de su empleo en obra.

Por estas razones y por absorber este proceso aproximadamente el 75% de la energía total invertida en planta, ha merecido desde siempre, y con mayor intensidad a partir de la crisis energética, la mayor atención de las actividades de investigación en el campo de la ciencia y de la técnica, orientadas a su mayor conocimiento y optimización. El diseño de nuevas instalaciones y sistemas ha permitido mejores condiciones operativas y

un mejor aprovechamiento del poder calorífico de los combustibles utilizados; métodos de automatización y control de variables aprovechando los notables avances de la electrónica e informática han sido aplicados, complementando y facilitando la actividad productiva.

El estudio y la investigación de las reacciones que se producen durante el proceso, y sobre todos los factores que directa o indirectamente influyen su desarrollo, han producido trabajos de innegable valor científico de invalorable utilidad en su proyección a la práctica, siempre que se utilicen sus resultados con el criterio de adecuación necesario.

En términos generales se puede afirmar que existe una sensible desconexión entre la investigación de laboratorio y la producción en planta; esto ha provocado un desaprovechamiento de recursos valiosos para el mejoramiento de los resultados en ambos aspectos.

En este artículo se intenta establecer algunos lineamientos de carácter operativo, que a partir del establecimiento de objetivos básicos y en función de ellos, permita visualizar un modelo elástico hacia el cual puedan orientarse las características particulares de funcionamiento de cada planta, y que al haber sido realizado con criterio basado en la experiencia práctica y complementado con el conocimiento de los aportes de la investigación en temas relacionados con la producción de clínker, pretende una modesta contribución a la indispensable relación que debe existir entre ambos aspectos.

Siendo este proceso tan variado y complejo, no se intenta establecer conclusiones absolutas en ningún caso, sino más bien un aporte al criterio individual de conducción que debe caracterizar a cada caso particular.

2. 6. 1 EFECTO DE LA COMPOSICIÓN SOBRE LOS CONSTITUYENTES CRISTALINOS DEL CLÍNKER

Los principales constituyentes en el clínker, alita y belita, son esencialmente C_3S y C_2S respectivamente. Ellos se encuentran embebidos en un líquido usualmente cristalino de aluminato tricálcico C_3A y ferroaluminato tetracálcico C_4AF . Variaciones en las relaciones las cuales definen la composición del clínker, como son F.C.S., S/R y A/F alteran las cantidades de los principales constituyentes del clínker.

2. 6. 2 EFECTO DE LA CAL DE SATURACIÓN - F.S.C.

Esta relación afecta las potenciales proporciones de C_3S y C_2S . Aumentando el F.S.C. del clínker a una cal libre constante, aumenta la cantidad de C_3S a expensas del C_2S .

2. 6. 3 EFECTO DE LA RELACIÓN DE SÍLICE - S/R ó S/R₂O₃

El mayor efecto de la S/R es sobre la cantidad de "flux" ó fase líquida presente en la temperatura de clinkerización. Cuando la S/R es baja, la cantidad de fundente es alta y viceversa. Reduciendo la cantidad de fase líquida (aumentando la S/R) aumenta la proporción de silicatos y a constante F.S.C. significa obtener un aumento en la cantidad de C_3S .

2. 6. 4 EFECTO DE LA RELACIÓN ALÚMINA - A/F

La fase líquida consiste potencialmente de C_3A y C_4AF con pequeñas cantidades de sílice, magnesio, cal, álcalis, manganeso, etc. A más alta relación de A/F es mayor la proporción de Al_2O_3 relacionada al Fe_2O_3 . La viscosidad del fundente es afectada por esa composición a mayor relación A/F la fase líquida es más viscosa a una determinada temperatura, ó contrariamente, una mayor temperatura se necesita para producir una determinada viscosidad. La inicial cantidad de fundente producido depende de la relación A/F y puede tener significantes efectos en el proceso de calcinación y subsecuentemente en la calidad del clínker.

2. 6. 5 EL PROCESO DE CLINKERIZACIÓN

La calcinación del clínker consiste en una serie de reacciones entre partículas finamente divididas y químicamente diferentes. En general las reacciones pueden enunciarse en la siguiente forma:

- Evaporación del agua libre
- Pérdida de agua de combinación en los minerales arcillosos.
- Disociación de carbonatos (descarbonatación).
- Combinación entre la caliza y la arcilla (y mineral de fierro cuando se agrega).

Estas reacciones no siempre ocurren separadamente; algunas veces la cal principia a reaccionar con la arcilla mientras la descarbonatación apenas se está realizando. En este rango de temperaturas las reacciones ocurren a través de la formación de fundentes de bajas temperaturas formados en puntos de contacto entre las partículas diferentes y por difusión del estado sólido. Bajo estas condiciones las reacciones son lentas, pero estudios de laboratorio con mezclas experimentales muestran una disminución en la cal libre, combinándose a temperaturas más bajas de las que el fundente propiamente inicia a formarse. Es posible sintetizar en el laboratorio C_3S con la caliza y sílice finamente pulverizadas sin la presencia de fundente, siendo posible esto solamente por repetidas fusiones a alta temperatura, remoliendo y volviendo a fundir.

Como los materiales son transportados a través del horno y con la elevación de temperatura es formado más fundente, el primer fundente es producido y las reacciones aumentan enormemente y la cantidad de fase líquida aumenta al máximo a la más alta temperatura en la zona de calcinación.

Una baja temperatura del fundente entre la cal y sílice puede dar como resultado la formación de C_2S antes de la zona de calcinación. Resultan también formaciones de C_3A por reacción entre las partículas de cal y arcilla.

En el proceso seco con precalentador de suspensión pueden producirse bajas temperaturas del fundente en la entrada del horno, esto origina que las partículas al conglomerarse y aumentar su tamaño reduzcan la carga circulante de alimentación dentro del precalentador, disminuyendo la producción del horno. El alcance y naturaleza de estas bajas temperaturas de los fundentes son también factores que influyen en la solidez de los nódulos en el proceso semiseco. A la temperatura de calcinación la reacción continúa rápidamente, el C_3S es formado por cristalización del fundente dentro del cual la cal y sílice son disueltos y dependiendo de la composición el C_2S también puede cristalizar.

El enfriamiento principia teóricamente tan pronto como el clínker pasa el punto máximo de temperatura en la zona de calcinación. En el trayecto hacia la descarga del horno el clínker al pasar la zona de la flama es enfriado por el aire secundario a pesar de que todavía recibe calor de radiación proveniente de la flama. Después de pasar la

descarga del horno, el clinker es enfriado a varios regímenes los cuales dependen de la eficiencia de los enfriadores, pero la mayor influencia en la estructura del clinker y calidad del cemento corresponde al enfriamiento efectuado entre la zona de la flama y la descarga del horno. Durante el enfriamiento los cristales de la fase líquida y la forma de cristalización es controlada por la composición y el grado de enfriamiento.

2.7 FACTORES QUE AFECTAN LA COMBINACIÓN

2.7.1 EFECTO DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS EN LA COMBINABILIDAD

La temperatura a la cual en un tiempo determinado, hay completa combinación de la cal, es influenciada no solo por la composición química de la mezcla, sino también por la naturaleza mineralógica de las materias primas y de las finuras de las que son molidas.

Sabemos que aumentando el F.S.C. ó con F.S.C. constante, al incrementar la relación S/R la cantidad de C_3S ó alita aumenta y por lo tanto, con idénticos materiales, una temperatura alta es necesaria para efectuar la combinación.

En el laboratorio se han establecido regímenes de calentamiento que han sido adoptados para reproducir tan cerca sea posible las condiciones de calcinación en un horno y la temperatura de combinabilidad definida arbitrariamente como la temperatura necesaria para que un clinker contenga 2% de cal libre, ha sido determinada en varias mezclas.

2.7.2 EFECTO DE LOS MINERALIZANTES Y CONSTITUYENTES VOLÁTILES SOBRE LA COMBINABILIDAD

En esta sección se examinará el papel de los componentes secundarios en la alimentación del horno, para ver como estos componentes aumentan o modifican el proceso básico de clinkerización.

Hay aquellos mineralizantes los cuales aumentan la fase líquida y/o alteran las características de viscosidad; ambos efectos traen como resultado una mejor quemabilidad. Por el otro lado hay constituyentes que ayudan a la rápida formación de componentes los

cuales se descomponen a las temperaturas de la zona de calcinación, pero composicionalmente son desde antes parte integrante de los minerales finales del clínker; es decir, el material entra en la zona de calcinación en un avanzado estado de preparación. Ejemplo del primer tipo de mineralizantes serían el Fe_2O_3 , MnO_3 , MgO y los álcalis. Todos estos constituyentes aumentan la cantidad de fase líquida a las temperaturas de calcinación y se piensa que también hacen menos viscosa la fase líquida. Desde que la fase líquida es responsable, en un alto grado, para el transporte de cal y la sílice para obtener un íntimo contacto de combinación dentro de los silicatos de calcio, es obvio que aumenta en ambos la cantidad y movilidad, facilitan la combinación. Sin embargo en el caso del MgO y los álcalis, su basicidad y su comportamiento de sustitución de cal pueden lograr un aumento total en la base de la mezcla y como resultado hacen más difícil las características de combinabilidad, particularmente con F.S.C. en el rango de 100%. Debido a su combinación preferente con el SO_3 el efecto básico de los álcalis puede ser neutralizado asegurando una suficiencia del SO_3 para formar los sulfatos alcalinos en el sistema. Los factores de alta retención, junto con el azufre del combustible, en procesos de alta eficiencia térmica frecuentemente provocan esa situación.

Una contribución a la fase líquida es también hecha por el SO_3 en conjunto con los álcalis como sulfatos alcalinos, y con la abundante cal presente, como sulfato de calcio. Mientras esta fase líquida es diferente del fundente normal, la que forma el C_3A y el C_4AF es sin embargo efectivo, facilitando la actividad iónica y la combinación. En consecuencia es obvio que la carga circulante de SO_3 sobre la mezcla cruda descarbonatada es para formar CaSO_4 y éste junto con el CaO formará un fundente eutéctico a una temperatura en la región de los 1200°C . Con la presencia del K_2SO_4 , el CaSO_4 también producirá fases que también son líquidas a temperaturas tan bajas como 870°C . Habiendo hecho su trabajo de facilitar la integración de los componentes de clínker, una porción de los sulfatos alcalinos, principalmente el K_2SO_4 , se volatilizarán en la zona de calcinación y recircularlos a la entrada del horno o al precalentador. El CaSO_4 , se volatiliza, aunque no completamente, se disocia en CaO , el cual llegará a ser integrado en el clínker, y SO_3 , el cual recirculará a la entrada del horno o al precalentador. Con excepción de lo perdido por la recuperación del precipitador o lo que escapa por la chimenea, los sulfatos serán

atrapados por la alimentación y de nuevo estarán disponibles para realizar su acción mineralizante.

Hay un ejemplo, el caso de la alimentación de un horno Lepol, donde el trabajo de combinabilidad indicó tener una excesiva temperatura de calcinación para alcanzar el nivel de cal libre habiéndose obtenido en la planta una significativa temperatura menor. Las indicaciones fueron que el sulfato tuvo un factor importante en la combinabilidad. Tanto la fluorita como el SO_3 son ejemplo de mineralizantes que facilitan la formación de componentes intermedios como parte de su acción mineralizante. Algunos de estos intermedios componentes son: Fluoruro de Al y Ca ($\text{C}_{11}\text{A}_7\text{CaF}_2$); spurrita ($2\text{C}_2\text{S} \cdot \text{CaCO}_3$); Sulfosilicato de calcio ($2\text{C}_2\text{S} \cdot \text{CaSO}$); compuesto de Klein ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4$) y condrodita de calcio ($2\text{C}_2\text{S} \cdot \text{CaF}_2$). Esos minerales forman fácilmente a temperaturas entre 600°C la spurrita en presencia de la fluorita, y en la región de los 1000°C el fluoruro de aluminio y calcio. Todos estos componentes son descompuestos en C_3A ó C_2S a temperaturas abajo de 1350°C y difícilmente se encuentran como tales en el clínker salido del horno. Estos productos de descomposición están por supuesto, sobre el camino de los minerales del clínker final, y el hecho de que ellos son formados por descomposición probablemente significa que su estado físico es tal como facilitado, como el caso del C_2S que su fácil combinación con más cal hace formar C_3S .

2. 8 RÉGIMEN DE CALCINACIÓN

2. 8. 1 INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN EN LA CALIDAD DEL CEMENTO

De la breve sinopsis de las reacciones que toman lugar en el clínker se ha visto que la formación de alita ó C_3S depende del grado al cual la cal y sílice pueden disolverse en el fundente y en el tiempo durante el cual los cristales formados permanecen en contacto con el líquido a alta temperatura. El C_3S es el principal compuesto de las resistencias dadas por el clínker. Se han hecho pruebas para obtener alguna correlación entre los compuestos potenciales, cal libre o cal combinada y resistencias. Los trabajos de laboratorio han

demostrado que ninguno de estos factores es tan importante como los regímenes de calcinación a los cuales el clínker ha sido sometido.

Claramente un quemado más suave nos ha conducido a un mejoramiento en la calidad. Es de notarse que una cal libre excesiva ha bajado la resistencia a 28 días. Generalmente siempre y cuando la cal libre no exceda mucho de 3.0%, las resistencias a 28 días no deberían ser afectadas y no debería haber problemas de expansión.

Cuando la cal de combinación fue mantenida a 88%, las resistencias a 3 y 7 días aumentaron significativamente aumentando el F.S.C. y la cal libre. Cuando la cal de combinación fue aumentada a 95% calcinando una mezcla de 97% de F.S.C., a mayor temperatura por un mayor tiempo, las resistencias a 3 y 7 días disminuyeron, pero las de 28 días aumentaron. Con un F.S.C. de 101% la mezcla calcinada a moderada temperatura dio mayores resistencias. El C_3S calculado según Bogue muestra una escasa relación con las resistencias.

De los resultados de estas investigaciones se concluye que el régimen de calcinación puede ser de mayor importancia que la composición de los componentes.

2. 8. 2 RELACIÓN DE LA CALIDAD DEL CEMENTO CON LA ESTRUCTURA CRISTALINA DEL CLÍNKER

Las resistencias producidas cuando el cemento es mezclado con agua resultan de la hidratación del C_3S ó alita; el grado de hidratación está relacionado por el contacto del agua con la superficie disponible y por la reactividad intrínseca de los cristales. Esta última propiedad probablemente depende de la estructura del cristal y se ha mostrado que el tamaño del cristal tiene una importante relación sobre la reactividad. En una determinada mezcla o más alta temperatura es menos viscoso el líquido fundente y por lo tanto más rápida la disolución de cal y sílice y la precipitación de cristales de C_3S . Entre más tiempo estén los cristales en contacto con el fundente son más grandes. Exámenes microscópicos de clínkeres han mostrado que la temperatura tiene una marcada influencia en el tamaño de los cristales y el tiempo de calcinación, aunque menos significativo, también hace crecer los cristales, produciendo cristales grandes de C_3S a expensas de la calidad del cemento. Cuando el clínker es severamente sobrecalcinado muy pequeños cristales de C_3S son

producidos, pero a la falta de combinación hay considerablemente menos C_3S de la potencialmente presente y las resistencias del concreto son pobres. Lo que se requiere es el desarrollo de la máxima cantidad de cristales de alita o C_3S pequeños, muy activos y mal formados.

2. 8. 3 ÓPTIMO RÉGIMEN DE CALCINACIÓN

Es obvio que la calcinación del clínker para producir la mejor calidad de cemento es gobernada, por un lado, por fuerte calcinación en un intento de producir al máximo contenido de C_3S , y por otro lado por la necesidad de limitar el crecimiento de los cristales de C_3S . Por lo tanto hay un óptimo régimen de calcinación en el cual para una determinada composición una adecuada combinación es lograda con el mínimo crecimiento de los cristales. Esto algunas veces causa tener cal libre mayor de la que normalmente debería ser considerada aceptable, pero sin embargo acompañada por altas resistencias en el cemento. A altas temperaturas los cristales de C_3S crecen, la cal libre disminuye y la calidad de cemento baja.

El concepto de las condiciones de óptima calcinación para una determinada mezcla es de fundamental importancia en la producción de cemento de alta calidad.

Recientemente un experimento fue llevado a cabo en escala industrial para confirmar los resultados de laboratorio. Una mezcla fue sujeta a aumento de condiciones de fuerte calcinación y se determinaron las resistencias de los cementos producidos, moliendo al mismo Blaine y contenido de C_3S .

Los clínkeres fueron examinados microscópicamente y pudo verse claramente que los cristales de C_3S crecieron progresivamente con la temperatura. La óptima resistencia ocurre con la máxima cantidad de cristales pequeños; la alta temperatura aumenta la combinación pero los cristales de C_3S también aumentan en perjuicio de la calidad. Con una mezcla de F.S.C. bajo se puede obtener mejor calidad de cemento con una cal libre baja, que con un F.S.C. alto.

2. 8. 4 CONDICIONES REDUCTORAS EN EL HORNO

Condiciones de reducción pueden ocurrir cuando la relación combustible/aire es incorrecta ó cuando la mezcla cruda contiene material carbonoso. También puede ocurrir si el combustóleo se deposita sobre la cama de clínker debido a una flama incorrecta. Debido a estos errores operacionales el Fe_2O_3 es el principal óxido afectado por la reducción pues al perder oxígeno a alta temperatura es reducido, pasando a FeO , ó aún fierro metálico. Esto, por supuesto, se debe a una pérdida de la fase ferrita ó aumento real del A/F. Bajo tales condiciones el MgO presente en el clínker tenderá a pasar como periclusa que es potencialmente productor de la expansión.

Las condiciones reductoras propician la formación del ión Fe^{2+} el cual puede sustituirse dentro de la estructura cristalina del C_3S ó alita. Cuando este clínker es reoxidado y abandona la zona de calcinación al encontrar el aire secundario, el ión Fe^{2+} pasa al Fe^{3+} . La estructura del C_3S no puede acomodar este ión y resulta una degradación del C_3S o belita y cal libre. Este ocasiona una disminución en la calidad del cemento.

2. 9 FASE LÍQUIDA

2. 9. 1 LA IMPORTANCIA DE LA FASE LÍQUIDA

Se ha mostrado anteriormente como la mayor parte del proceso de clinkerización toma lugar a través de la fase líquida, la cual se desarrolla cuando la temperatura se incrementa. La mayor parte de los clínkeres contienen de 20-30% de líquido en la zona de calcinación. Puesto que la combinación y la producción de alita dependen de la formación de líquido, la mínima temperatura a la cual se forma en la mezcla cruda es de gran importancia; igualmente los cambios en las características de la fase líquida con cambios de la temperatura son fundamentalmente importantes para comprender los factores que tienen influencia en la calidad del cemento.

2. 9. 2 EFECTO DE LA COMPOSICIÓN EN LA FASE LÍQUIDA

Generalmente se considera que la más baja temperatura a la cual se forma la fase líquida está en el rango de 1250-1300°C. Mientras que casi todas las composiciones de las mezclas crudas probablemente forman líquido a esa temperatura, la cantidad de líquido formado y el aumento en cantidad con la temperatura depende de la proporción de alúmina, óxido férrico y otros menos importantes componentes, y variará enormemente de una a otra mezcla. La cantidad de líquido formado a una dada temperatura puede ser calculado aproximadamente por las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ líquido formado a } 1338^{\circ}\text{C} = 6.1 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\% \text{ líquido formado a } 1400^{\circ}\text{C} = 2.95 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 2.2 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\% \text{ líquido formado a } 1450^{\circ}\text{C} = 3.0 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 2.25 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

Estas se aplican a clínkeres con un A/F mayor de 1.38. Cuando el A/F es menor de 1.38 el porcentaje de líquido formado a 1338°C es de $8.2 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 5.22 \text{ Fe}_2\text{O}_3$.

A estas fórmulas muy frecuentemente se les suma los porcentajes de álcalis y MgO, pero hay duda de la validez de estos cálculos, por lo que algunos laboratorios no lo usan.

Tanto la proporción y la viscosidad de la fase líquida dependen del contenido de alúmina y óxido férrico. Para una alta relación A/F es más viscosa la fase líquida a una determinada temperatura o mayor es la temperatura requerida para una dada viscosidad. El manganeso y la fluorita en cantidades limitadas son usadas para bajar la viscosidad de la fase líquida.

2. 9. 3 ACTUACIÓN DE LA FASE LÍQUIDA EN LA CLINKERIZACIÓN

Si la proporción de solución de cal y sílice en la fase líquida dependen de la viscosidad del fundente, entonces un fundente de alta relación A/F requerirá una mayor temperatura que uno de bajo A/F, para efectuar el mismo grado de combinación. Es de esperarse que la temperatura influya en la formación de los cristales de C₃S. Un material con un A/F de 1.9 fue calcinado a 1375°C y un material con un A/F de 2.8 a 1450°C. La

diferencia en cantidad de fundente está relacionado con la diferencia del S/R, mientras mayor es éste se tiene menor fase líquida.

La cantidad de fundente es importante, a mayor fundente es un estado viscoso, más rápida es la combinación. Un contenido bajo en fundente requerirá una mayor temperatura para incrementar su movilidad y facilitar la reacción, y aunque las temperaturas de calcinación pueden ser altas los cristales de alita no necesariamente aumentan de tamaño. Un ejemplo es el clínker de cemento blanco donde con una relación S/R la cantidad de fundente es relativamente baja puesto que es rica en alúmina y viscosa. Este clínker tiene una muy alta temperatura de combinabilidad y los cristales de alita son pequeños.

Un clínker de alta resistencia a los sulfatos tiene una baja relación de S/R. Esto significa que la cantidad fundente es relativamente alta puesto que el fundente es rico en fierro (bajo A/F) y altamente móvil. Estos dos factores dan como resultado un desarrollo de grandes y bien formados cristales de C_3S .

Cuando el fundente es abundante y su viscosidad marcadamente disminuida por la presencia de manganeso, muy grandes cristales de C_3S se encuentran clínkeres que tienen un contenido Mn_2O_3 de aproximadamente 1%.

2.10 RÉGIMEN DE ENFRIAMIENTO

2.10.1 ZONA DE ENFRIAMIENTO

El enfriamiento que es mencionado en esta sección no es solamente aquel que toma lugar después que el clínker deja el horno, sino el total periodo desde la zona de calcinación. Desde el punto de vista de la estructura cristalina la parte más importante del enfriamiento toma lugar entre la zona de calcinación y la descarga del horno. El grado de enfriamiento afecta grandemente la cristalización del fundente y también de los cristales de C_3S .

2. 10. 2 EFECTO DEL GRADO DE ENFRIAMIENTO SOBRE LA ESTRUCTURA DEL CLÍNKER

El clínker que ha sido enfriado rápidamente, la fase aparece uniforme con pequeños cristales de C_3A y C_4AF , mientras que el clínker, mientras que el clínker enfriado lentamente los cristales de C_3A y C_4AF están bien definidos y fácilmente visibles. Los componentes que bajo condiciones de enfriamiento rápido permanecen en solución sólida en el fundente, tienden a ser desalojados de la solución de enfriamiento lento. Estudios de difracción por rayos X han mostrado que la alúmina es retenida en solución sólida dentro del C_3S por un rápido enfriamiento; pero bajo condiciones de enfriamiento lento el fundente cristaliza; los silicatos son parcialmente liberados las soluciones son esparcidas; las composiciones modificadas; y los cristales de C_3S ceden cal al fundente y se degradan a C_2S cuando la fase líquida en clínkeres de alta relación A/F es deficiente en cal.

2. 10. 3 EFECTO DEL GRADO DE ENFRIAMIENTO SOBRE LA CALIDAD DEL CEMENTO

Una considerable cantidad de evidencias han mostrado que con el rápido enfriamiento se logran las más altas resistencias a 28 días. El efecto es más marcado a altas relaciones de A/F , disminuyendo cuando decrece el A/F a un mínimo cercano a 1.4 y aumenta de nuevo a inferiores relaciones de A/F . Clínkeres de laboratorio han sido preparados cubriendo un amplio rango de composiciones, a una alta relación de A/F el efecto de enfriamiento sobre las resistencias de 28 días es altamente significativo.

Otros trabajos de laboratorio han mostrado que el rápido enfriamiento puede principiar desde una temperatura tan alta como es posible lograr y con una acción tan rápida como sea posible para bajar $1000^{\circ}C$. Esto probablemente explica el porqué fue aparente que las condiciones óptimas de calcinación fueron más difíciles para las resistencias de 28 días que para los 3 días.

2. 11 EFECTO DE LA MEZCLA CRUDA SOBRE LA CALIDAD DEL CEMENTO

2. 11. 1 FINURA DEL CRUDO

La finura del crudo es probablemente el factor individual más importante que influye sobre la calidad del cemento.

Ha sido mostrado ampliamente en el laboratorio que, manteniendo todas las demás condiciones iguales, entre mayor sea la finura del crudo, más baja será la temperatura de combinabilidad del clínker y más pequeño el cristal de C_3S . La facilidad con la cual las partículas se combinan depende de su finura, composición y naturaleza mineralógica. La influencia física de las partículas grandes no se ha comprendido totalmente, pero el análisis microscópico ha ayudado mucho a aclarar las reacciones que se llevan a cabo cuando las partículas grandes de sílice o carbonato de calcio están presentes en una mezcla. Los efectos resultantes en la estructura del clínker se muestra claramente.

2. 11. 2 RESIDUO SILICEO

Una partícula gruesa de sílice en la mezcla cruda da como resultado un racimo denso de cristales de C_2S , con frecuencia baja en fundente distribuida alrededor de un poro dentro del clínker. En la fase inicial del proceso de calcinación, una fusión de baja temperatura se forma en los límites entre la partícula silicea y las partículas de cal que la rodean. Esta fusión se mueve a través de toda la partícula silicea formando silicato líquido bajo en cal, el cual es absorbido dentro de la mezcla cruda que la rodea ya descarbonatada y porosa y así se forma un anillo de belita con el poro característico en el centro. En casos extremos donde la cantidad de cal disponible para reaccionar con las partículas silíceas es menor que al requerido para formar C_2S esté completa y un vidrio altamente silíceo y no hidráulico permanece en la zona central. Aunque microscópicamente es aparente que una fusión a una temperatura relativamente baja se lleve a cabo, un efecto que se puede esperar que promueva la reactividad, también está claro que una capa densa y relativamente impenetrable de C_2S sólido se forma en la interfase de esta fusión cal-sílice y que el crudo que la rodea crea áreas protegidas de la reacción. Se debe notar también que una parte de sílice necesita algo así como 2.8 veces su peso de cal para convertirse

en C_3S ; así se origina un desequilibrio más serio en la mezcla que el que origina la cal. Una calcinación muy fuerte, sin embargo, puede transportar cal a través del fundente hasta el anillo de C_2S y convertirlo en cristales muy grandes de C_3S los cuales frecuentemente contienen múltiples inclusiones pequeñas y residuos de C_2S o belita.

2.11.3 RESIDUO CALCÁREO

Siempre que se habla de componentes duros y puros, se piensa en cuarzo y pedernal y es aparente según observaciones microscópicas, que la heterogeneidad que se deriva del residuo calcáreo también contribuye a las dificultades en la combinabilidad. Fallas en la molienda de un componente calcáreo puro conducen a la formación repetida de grandes racimos de cristales globulares de óxido de calcio en el clínker. Al contrario de los residuos silíceos no se forman fusiones a baja temperatura siempre y cuando las condiciones de quemado no sean demasiado fuertes los racimos de cristales de cal libre frecuentemente retienen la forma de los fragmentos calcáreos de los cuales se originan.

Hay sin embargo indicaciones que el residuo calcáreo de un tamaño y nivel dados es menos difícil de combinarlo que un residuo silíceo puro de un nivel y tamaño similar. Durante la descarbonatación, un fragmento de material calcítico se vuelve muy poroso, porque pierde casi la mitad de su masa. La fase líquida del clínker puede ser absorbida rápidamente dentro de la estructura porosa la cual además presenta una gran superficie reactiva en la fase líquida.

2.11.4 EFECTO DEL RESIDUO EN EL TAMAÑO DE CRISTAL

Esta breve descripción, aclara porqué las partículas grandes necesitan más energía para reaccionar. La cal sin combinar debería reaccionar con el C_2S para formar C_3S . La cal debe ser transportada por el fundente a una alta temperatura o se necesitará más tiempo para el fundente y la reacción subsecuente. Durante este tiempo los cristales de C_3S que ya estaban formados de las partículas finas de la mezcla cruda siguen creciendo uniformemente y para cuando ha habido suficiente reacción de combinación para producir un contenido aceptable de cal libre el aumento del tamaño del cristal de alita ó C_3S producirá menos que el potencial de calidad. Entre más amplio sea el rango del tamaño de

partícula habrá más probabilidad que los cristales de C_3S formados a edad temprana crecerán excesivamente. A consecuencia de esto la molienda en circuito cerrado es preferible para obtener la máxima calidad del cemento, además de sus efectos económicos [9].

2. 12 EL MEDIO AMBIENTE

Debe contarse con que las exigencias ambientales del futuro en muchos países, serán considerablemente incrementadas de manera que se tomarán tan rigurosas o todavía más de lo que lo son al presente en los Estados Unidos de Norteamérica y en Europa Occidental. Esto no debe dar motivo a aflicción, particularmente al comprobar lo que surgido a la superficie en Europa Oriental después de que repentinamente se permitió discutir acerca de los problemas ambientales.

No requiere habilidad particular alguna el limitar la emisión de partículas provenientes de una fábrica de cemento, ni tampoco demanda ninguna de innovación tecnológica, solo inversiones económicas. La emisión de contaminaciones aéreas, que en la industria del cemento son, principalmente, óxidos de azufre SO_x y óxidos de nitrógeno NO_x , representan un problema que es algo más dificultoso de solucionar [10].

2. 12. 1 MEDICIÓN DEL NO_x

En Suiza, la ley Federal del 7 de octubre de 1983 sobre la protección del medio ambiente (Ley de protección del medio ambiente, USG) regula, fundamentalmente, las medidas para la conservación de la pureza del aire. Con el fin de cumplir los objetivos de esta ley, en mayo de 1984 se dio a conocer el decreto sobre la conservación de la pureza del aire, la cual entrará probablemente en vigor a principios de 1986.

En la República Federal de Alemania (RFA), la protección contra inmisiones está básicamente regulada mediante la Ley Federal de Protección Contra Inmisiones del 15 de marzo de 1974. Para conservar la pureza del aire son vigentes, como prescripción administrativa general, las "instrucciones técnicas para la conservación de la pureza del

aire" (TA-Luft). Además de las TA-Luft, existen las directrices de la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI). Sin embargo, para la industria del cemento, sólo existe hasta la fecha el proyecto de una directriz.

Según las TA-Luft alemanas 83, las instalaciones que emiten más de 20 kg. de NO_x (indicado como NO) por ahora deberán poseer una instalación de medición y control continuos. En el decreto suizo sobre la conservación de la pureza del aire (proyecto 1983), la disposición correspondiente está formulada con menos claridad. Dice: "En el caso de instalaciones con emisiones considerables, los cantones ordenan la medición y registro continuos de dichas emisiones"

Sin embargo, guiándonos por las TA-Luft alemanas, es de suponer que una emisión de más de 20 Kg./h de NO_x deberá calificarse de considerable.

Según investigaciones de la Asociación de Fábricas Alemanas de Cemento (VDZ) (confirmadas en parte por mediciones propias del HAACT), la emisión específica de NO_x, según sean las influencias de materia prima, instalaciones y fabricación, oscila entre 0.6 y 2.5 kg. de NO_x/t de clínker. Esto significa que la emisión de NO_x de un horno de cemento sobrepasa, por lo general, el límite de 20 kg./h. Por consiguiente, en la RFA ya son obligatorios los aparatos para la medición y control continuos de emisiones de NO_x, y, en breve, se prescribirán también en Suiza como en otros países [11].

2. 12. 2 LA PROBLEMÁTICA DE LA MEDICIÓN DE NO_x

El nitrógeno forma óxidos de todas las cifras de oxidación positivas hasta +V. Se conocen los siguientes óxidos de nitrógeno: N₂O, NO, N₂O₃, NO₂, N₂O₄, N₂O₅, NO₃.

De estas combinaciones, sólo el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de nitrógeno (NO) tienen una importancia práctica en lo que se refiere a los problemas de emisión.

Con respecto a la contaminación del aire, resulta importante, en primer lugar, el efecto directamente tóxico del dióxido de nitrógeno (NO₂). Por otra parte, los óxidos nítricos participan también en los procesos fotoquímicos que causan la formación de "smog". Para todo cuanto se refiere a la protección contra inmisiones, es interesante la suma de óxidos de nitrógeno (NO + NO₂ → NO_x).

La causa principal de emisiones de óxidos de nitrógeno son los procesos de combustión, en los que se forma primariamente el monóxido de nitrógeno (NO). Por debajo de los 400°C, el monóxido de nitrógeno empieza a formar, junto con oxígeno, el dióxido de nitrógeno (NO₂), según la fórmula $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$.

Debido a reacciones secundarias, el dióxido de nitrógeno da origen a la nueva formación parcial de monóxido de nitrógeno, de modo que, finalmente, en la atmósfera exterior se establece una relación de monóxido y dióxido de nitrógeno, básicamente independiente de la emisión inicial de nitrógeno. Por lo tanto, al efectuar una medición de NO_x, deberán tenerse igualmente en cuenta tanto el monóxido de nitrógeno (NO) como el dióxido de nitrógeno (NO₂) [13].

2. 12. 3 REDUCCIÓN DEL NO_x CON AMONÍACO

Por ensayos realizados en fábricas de cemento, se sabe que el amoníaco, inyectado en determinadas zonas de temperatura de la instalación de hornos de cemento, puede reducir en gran proporción el monóxido de nitrógeno (NO). La gama de temperaturas en la que se pueden obtener las cuotas máximas de reducción de NO, se sitúa entre unos 800°C y 1100°C. Es decir, en los hornos con precalentador ciclón, el amoníaco debe introducirse en la zona de entrada/ciclón inferior.

El amoníaco se inyecta en una zona determinada del precalentador, en donde puede reaccionar con combinaciones de la atmósfera del horno. En tanto que modelo, se supone que los gases de humo se mantienen por un espacio determinado de tiempo en una zona de reacción a temperatura constante, y que sólo las moléculas o radicales O₂, H₂O, OH^{*}, NH₃, NH₂^{*}, y NO del gas de humo y del amoníaco inyectado reaccionan conjuntamente. Se excluye la posibilidad de que se produzca reacción con otros componentes del gas de humo (p.ej. CO) o con el polvo del horno [12].

2. 12. 4 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE LAS LLAMAS EN LA FORMACIÓN DE NO_x

El monóxido de nitrógeno (NO) se origina en la combustión de combustibles fósiles por la oxidación parcial del nitrógeno molecular del aire de combustión del nitrógeno

orgánicamente ligado en el combustible. Durante un tiempo de permanencia más largo de los humos dentro de un margen de temperatura inferior a 200°C, el monóxido de nitrógeno (NO) se oxida y forma el dióxido de nitrógeno (NO₂), substancialmente más tóxico. Ambos óxidos de nitrógeno (u óxidos azoicos) se designan de manera resumida por NO_x.

Mecanismo de reacción del NO

La formación de monóxido de nitrógeno no es ningún proceso sencillo que pueda describirse mediante unas pocas ecuaciones. La complejidad de las reacciones que participan en este proceso ha impedido establecer, hasta la fecha, una teoría completa sobre la formación del NO. Sin embargo, parece tratarse substancialmente de dos procesos cuyos productos se designan por "NO del combustible" y "NO térmico".

La formación del NO del combustible.

Los combustibles sólidos contienen cantidades bastante diferentes de compuestos orgánicos de nitrógeno:

Aceite pesado:	700-1000 ppm en volumen de N
Carbón	1000-4000 ppm en volumen de N.

Ya en la pirólisis de estos combustibles, o sea a unas temperaturas relativamente bajas, los compuestos de nitrógeno se desdoblan en forma de compuestos secundarios, por ejemplo aminas y cianuros, los cuales se oxidan con radicales OH o con O₂ para formar monóxido de nitrógeno o reaccionar con compuestos de nitrógeno (predominantemente NO) para formar nitrógeno molecular. Según estudios realizados, la formación de NO procedente de nitrógeno del combustible tiene lugar de manera relativamente independiente respecto a su clase de ligazón, pero resulta substancialmente influida por el contenido de nitrógeno en el combustible.

Bajo condiciones subestequiométricas en relación con la proporción combustible/oxígeno en el frente de las llamas (es decir, en el caso de excedente de combustible), el proceso más importante es la formación de la ligazón N—N, reduciéndose NO a N₂. De manera opuesta a ello, la formación de NO resulta favorecida bajo

condiciones de poco combustible, es decir, bajo condiciones supraestequiométricas (exceso de oxígeno).

Por consiguiente, la formación de "NO del combustible" está determinada por las siguientes magnitudes de influencia:

1. Exceso de aire en el frente de las llamas.
2. La cantidad, pero no la clase de los compuestos de nitrógeno.

La formación de NO térmico.

En la zona de los productos de combustión, es decir, detrás del frente de la llama, con un tiempo de permanencia suficientemente largo de los gases de combustión por encima de los 1500°C aproximadamente, se origina el "monóxido de nitrógeno térmico".

La cantidad real de monóxido de carbono que se forma en procesos técnicos de combustión se encuentra muy por debajo de la concentración de equilibrio como consecuencia de la fuerte dependencia de la temperatura de la reacción de monóxido de nitrógeno y de los tiempos de permanencia relativamente cortos a estas temperaturas. En el aire, el 50% del valor de equilibrio a temperaturas de unos 2000°C no se alcanza hasta después de 2.5 segundos. Los tiempos de permanencia de los gases en la llama de hornos rotatorios de cemento se encuentran visiblemente en un orden de magnitud por debajo de dicha cifra. Por consiguiente, un tiempo de permanencia largo de los gases a temperaturas elevadas favorece la formación térmica del NO.

Por lo tanto, la formación del NO térmico está determinada por las siguientes magnitudes de influencia:

1. Temperatura
2. Composición de los gases
3. Tiempo de permanencia a temperaturas elevadas.

En los trechos con incrustaciones relativamente fuertes, la transmisión del calor es menor, debido al efecto de aislamiento, que en las zonas con pocas incrustaciones.

La consecuencia de ello es que determinadas zonas de la llama se vuelven más calientes cuando la incrustación es fuerte, y las zonas de temperaturas elevada se extienden más hacia el interior del horno. En otros términos, una fuerte incrustación en la

zona de la llama aumenta, de un lado, la temperatura de la misma y, de otro lado, su longitud, y con ello la duración de la permanencia de los gases en zonas de temperaturas elevadas, lo cual favorece la formación del "NO térmico". Debido al estrechamiento de la sección transversal, como resultado de las incrustaciones grandes, aumenta la velocidad del gas y se reduce la recirculación de los humos dentro de la llama. La consecuencia de ello es mezcla longitudinal peor de los gases en la llama, lo cual puede producir localmente unas temperaturas y concentraciones de oxígeno más elevadas, y esto favorece igualmente la formación de "NO térmico". Por consiguiente, la formación y la forma de las incrustaciones tienen un efecto directo sobre la formación de NO y, por lo tanto, también sobre las emisiones de NO_x.

La formación de NO en hornos rotatorios de cemento.

Cuando se observa la formación de NO en hornos rotatorios de cemento, hay que distinguir entre la formación de NO en el quemador principal de la parte rotatoria y la formación en un quemador secundario en el caso eventual de que el mismo exista.

La formación de NO en el quemador principal (parte rotatoria).

En los quemadores de los hornos rotatorios, se trabaja con llamas turbulentas de difusión, en las que la mayor parte del aire de combustión no se alimenta hasta después del encendido del combustible (parte secundaria de aire del orden de magnitud de un 90%). Debido a ello, se origina una zona de pirólisis y frente de llamas fuertemente subestequiométrica. Por consiguiente, los compuestos de nitrógeno que se encuentran en el combustible se transforman aquí únicamente en cantidades pequeñas en NO. Esto quiere decir que se forma poco "NO combustible"; el nitrógeno del combustible se transforma en N₂. En la zona de los productos de combustión (humos) se alcanzan temperaturas superiores a 1800°C, y se forma en ella "NO térmico". Por consiguiente, en las llamas del quemador principal se origina predominantemente "NO térmico".

La formación de NO en el quemador secundario.

En un quemador secundario, el combustible alimentado al mismo se quema a unas temperaturas mucho más bajas (800°C hasta aprox. 1200°C) que en el principal, lo que quiere decir que el NO originado en el quemador secundario no puede haberse formado térmicamente, o sea a partir de $N_2 + O_2$. En un quemador secundario se origina por lo tanto, predominantemente, "NO de combustible".

Correlación entre el NO y la temperatura de la zona de combustión.

Si se parte de un determinado ajuste de los quemadores y de una determinada situación constante de las incrustaciones, existe seguramente una correlación entre la concentración del NO y diversos parámetros, como la temperatura de la zona de combustión, el peso por litro, cal libre, contenido de K_2O del clínker, etc.

Como quiera que en los ensayos realizados se trata de los primeros estudios específicos relativos al NO_x en este horno, se estudió además de la correlación entre el NO y las incrustaciones, únicamente la correlación con la temperatura de la zona de combustión. La llamada temperatura en la zona de combustión se midió con un pirómetro de dos colores orientados hacia el lecho de clínker. Esta temperatura está determinada, por consiguiente, por las siguientes influencias:

1. La temperatura del clínker
2. el contenido de polvo y la temperatura del mismo.

La temperatura del clínker determina entonces la formación de NO en el sentido de que, a medida que aumenta la temperatura del lecho de clínker, se incrementa también la temperatura de los gases en la zona de la llama, formándose más NO.

El desarrollo de polvo perturba, en la zona de la llama, el intercambio de calor entre la llama y el lecho de clínker: cuando el contenido de polvo es elevado, la temperatura de la llama resulta más baja y por consiguiente, se forma menos NO.

Por consiguiente, puede suponerse una correlación entre el NO y la temperatura de la zona de combustión, a saber, en el sentido de que a medida que aumenta la temperatura en la zona de combustión también se incrementa la concentración de NO [13].

CAPÍTULO 3

LÓGICA DIFUSA

3. 1 SISTEMAS DE CONTROL BASADOS EN LÓGICA DIFUSA

INTRODUCCIÓN

Para comprender mejor la aplicación de la lógica difusa al control de sistemas, se expondrán algunos conceptos importantes de la teoría de los subconjuntos difusos. En la siguiente exposición sólo se presentarán las operaciones y teoremas involucrados en el desarrollo del controlador lógico difuso.

3. 1. 1 SUBCONJUNTOS DIFUSOS

Para exponer los conceptos de la lógica difusa se retomará la idea que se tiene de función de pertenencia en la teoría de los conjuntos ordinarios. En ella la pertenencia de los elementos a sus conjuntos es estricta, por ejemplo "lunes" pertenece al conjunto de "los días de la semana" mientras que abril no pertenece a ese conjunto. Y se suele representar la pertenencia de un elemento x a un conjunto A , por medio de la "función de pertenencia" $\mu_A(x)$ cuyo valor indica si el elemento pertenece o no al conjunto A :

$$\mu_A(x) = 0 \text{ si } x \notin A$$

$$\mu_A(x) = 1 \text{ si } x \in A$$

Si ahora se quisiera definir al conjunto de las personas más altas, ¿se incluirían a las personas con 1.8 mts. de altura o sólo aquellas cuya altura fuese mayor a 1.85 mts?. Para este caso la respuesta se complica, las personas "más altas" no es un concepto definido sino más bien impreciso. Para representar este conjunto, imaginemos que su función de pertenencia puede tomar cualquier valor dentro del intervalo $[0, 1]$. Esto es, el cambio entre la pertenencia y la no pertenencia es gradual en vez de abrupto. Así, al subconjunto B de las personas "mas altas" se le puede asignar la función de pertenencia $\mu_B(X)$:

$$\mu_B(X) = \begin{cases} 2.5X - 4 & 1.6 \leq X \leq 2 \\ 1 & 2 < X \leq 2.4 \\ 0 & \text{para cualquier valor} \end{cases}$$

la cual se representa en la figura 3.1

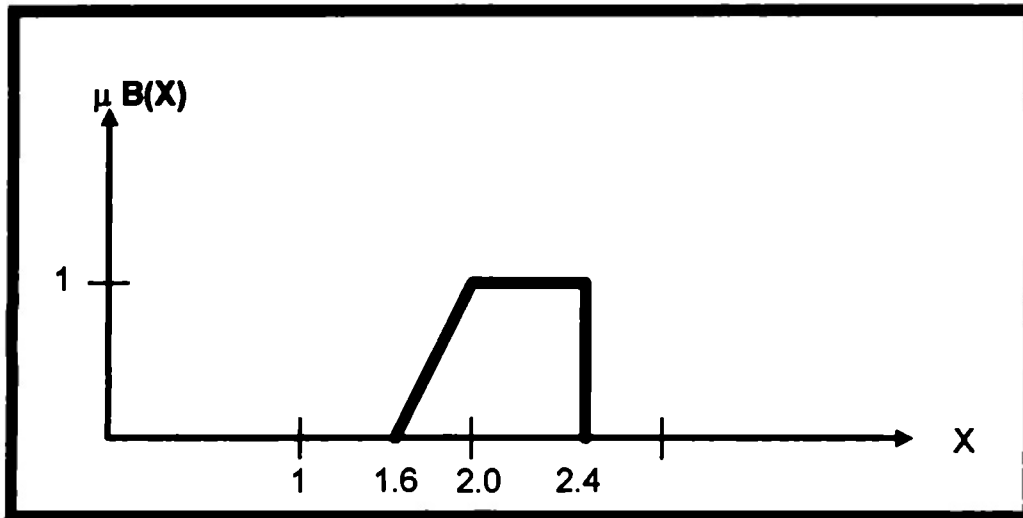


Figura 3.1 Función de pertenencia del subconjunto difuso B.

Nótese que se debe decir “subconjunto difuso”, ya que el conjunto de referencia no es difuso (es ordinario). Por ejemplo si hablamos del conjunto de los hombres (no difuso) es posible obtener el subconjunto difuso de los hombres jóvenes.

Resumiendo, en la teoría de conjuntos convencional la pertenencia es una función binaria que toma sólo dos valores: 1 (pertenencia) y 0 (no pertenencia). Y en la teoría de subconjuntos difusos se tiene un continuo de grados de pertenencia en el intervalo $[0, 1]$. A partir de la discusión anterior se dará la definición de un subconjunto difuso.

Definición 3.1 Sea U un conjunto enumerable o no y u un elemento de U , entonces un subconjunto difuso C de U , es una colección de pares ordenados del elemento genérico u y su grado de pertenencia $\mu_C(u)$:

$$C = \{(u, \mu_C(u)) / u \in U\}$$

$$\mu_C(u): U \rightarrow [0, 1]$$

El universo U , puede ser continuo y entonces:

$$C = \int \mu C(u) / u$$

Si el universo es discreto, entonces:

$$C = \sum \mu C(u_i) / u_i, \text{ donde } i = 1, 2, \dots, n$$

Donde el signo de la integral y el de la sumatoria representan una unión en vez de una suma y $\mu C(u) / u$ se interpreta como el grado de pertenencia del elemento u en el conjunto C .

3. 1. 2 OPERACIONES BÁSICAS CON SUBCONJUNTOS DIFUSOS

Sean A y B dos subconjuntos difusos en el universo U con funciones de pertenencia μA y μB respectivamente (ver figura 3.2 a), entonces las operaciones de unión, intersección y complemento, quedan definidas como sigue.

Definición 3.2 La unión de A y B es un subconjunto $C = A \cup B$, cuya función de pertenencia es:

$$\mu C(u) = \text{máx} \{ \mu A(u), \mu B(u) \}, \forall u \in U.$$

Definición 3.3 La intersección de A y B es un subconjunto $C = A \cap B$, cuya función de pertenencia se define como:

$$\mu C(u) = \text{mín} \{ \mu A(u), \mu B(u) \}, \forall u \in U.$$

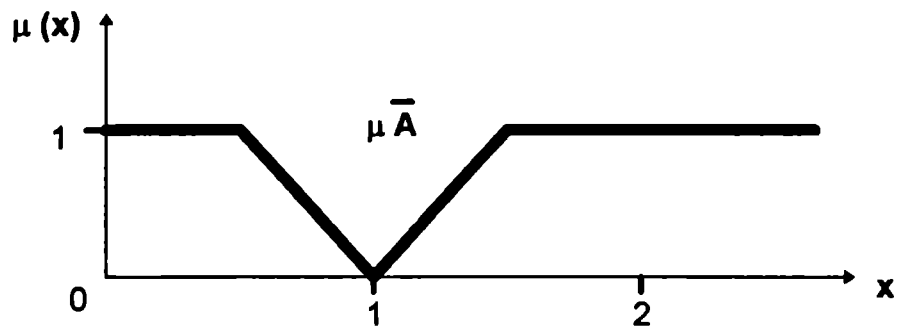
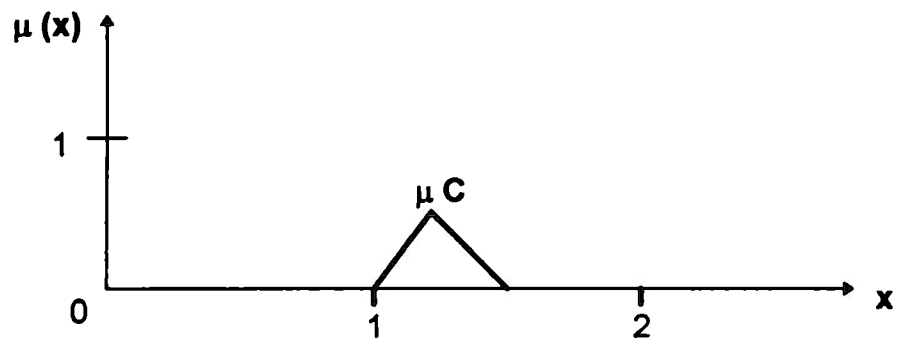
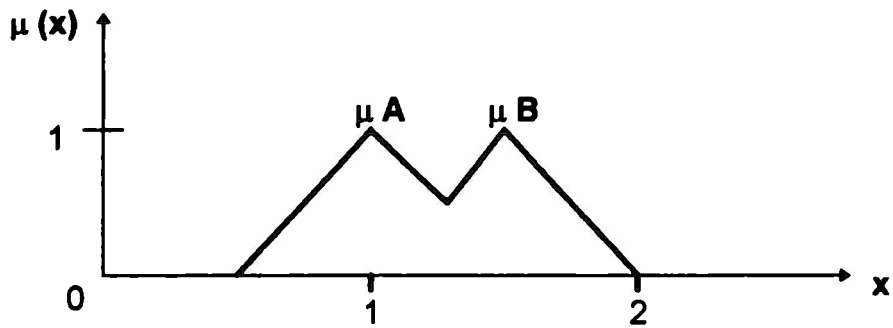
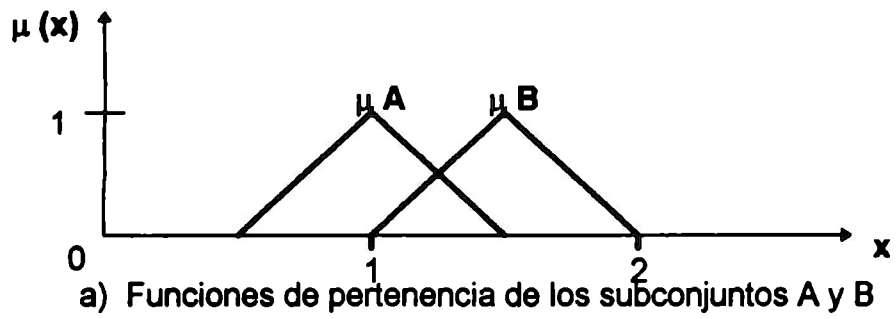


Figura 3.2

3. 2 INTRODUCCIÓN A LA LÓGICA DIFUSA

En muchos procesos nos encontramos en situación de tratar con variables con comportamiento no lineal en el tiempo, y en donde las mediciones directas son difícilmente practicables. En consecuencia, las posibilidades de control automático quedan restringidas a unos pocos lazos de variables secundarias, quedando la responsabilidad del control de las variables primarias en el operador.

Un primer acercamiento para resolver el problema puede ser el desarrollo de un modelo matemático del funcionamiento del proceso. Sin embargo, en la práctica se suele llegar a modelos excesivamente simplistas o demasiado complicados para ser aplicados con efectividad.

Asimismo, puede ser contradictorio el esfuerzo a desarrollar en el establecimiento del modelo matemático y la relativa simplicidad con que el operador puede acumular la experiencia necesaria para un funcionamiento correcto.

En la mayor parte de los casos se trata de asimilar un conjunto de reglas experimentales, que definirán determinadas actuaciones a partir de los distintos estados del proceso.

Mientras que en el modelo matemático los estados y acciones se definirán por valores numéricos absolutos, el operador actuará más por conceptos tales como "mucho", "poco", "ligeramente", "correcto", etc. más familiares a su entendimiento de la realidad del proceso y sus posibilidades de control.

Estaríamos entonces dentro del campo de aplicación de los sistemas más expertos basados en lógica difusa.

3.3 PRINCIPIOS DEL CONTROL DIFUSO

3.3.1 REGLAS DE CONTROL LINGÜÍSTICO

La aplicación de las técnicas de control con lógica difusa se unen al concepto de reglas de control lingüísticas. Un controlador difuso consiste en un conjunto de reglas de control, definiendo cada una de ellas una acción a tomar dependiendo de unas condiciones de proceso dadas, tal como:

SI (CONDICIÓN) Y (CONDICIÓN) ENTONCES (ACCIÓN)

Las condiciones y las acciones pueden estar definidas en términos de “muy alto”, “algo bajo”, “aumentar ligeramente”, etc. En la aproximación lingüística de la lógica difusa cada uno de estos términos se representa como miembro de una función única que, para unas condiciones de proceso dadas, es un valor entre 0 y 1.

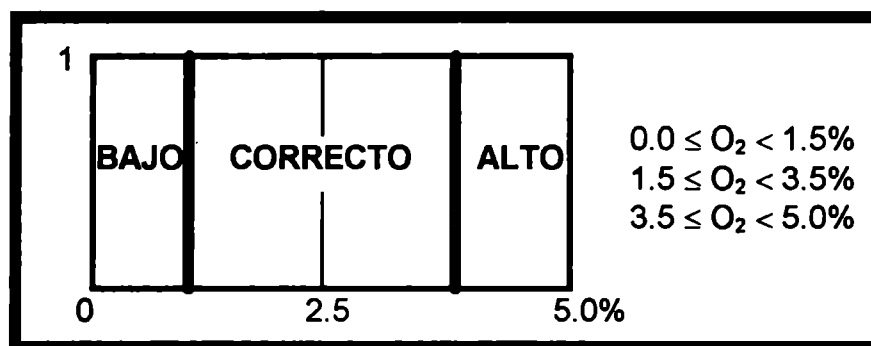


Fig. 3.3 Representación de los términos bajo, correcto, alto, en lógica binaria.

Así, el valor lógico de una condición, que en lógica binaria estaría restringido a “verdadero” o “falso” (0 ó 1), en lógica difusa puede ser cualquier valor en el intervalo [0, 1], siendo este valor una medida del grado de cumplimiento de la condición para un estado de proceso dado.

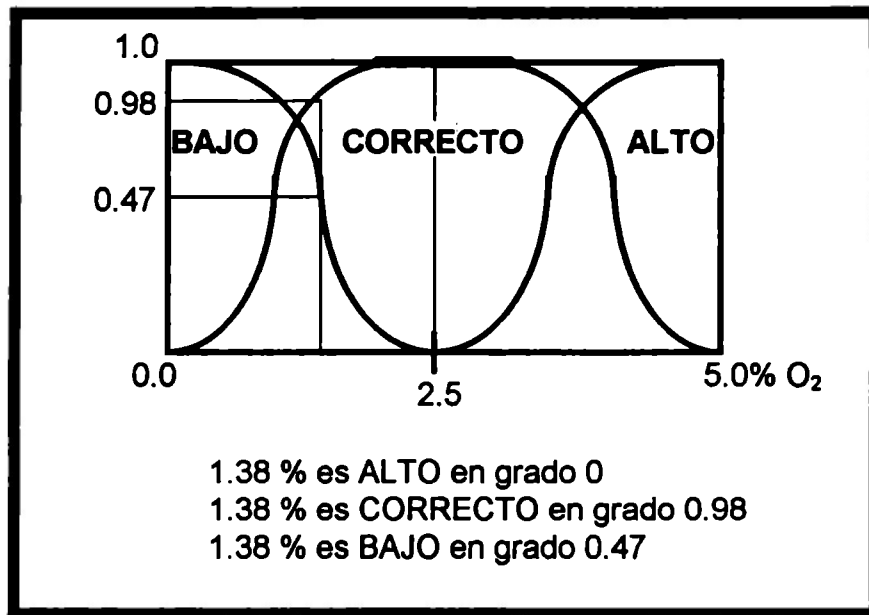


Figura 3.4 Representación de los términos de la figura 3.3 en lógica difusa

Como ejemplo comparativo, tomemos las figuras 3.3 y 3.4, para las condiciones “si el porcentaje de oxígeno es alto” y “si el porcentaje de oxígeno es correcto”.

En lógica binaria (Fig. 3.3), un valor de proceso en el intervalo 0 -5 % puede ser BAJO, CORRECTO o ALTO. En lógica difusa (Fig. 3.4), los términos BAJO, CORRECTO, ALTO se representan mediante curvas continuas, en oposición a los escalones de la lógica binaria, y muestran un valor de proceso como BAJO, CORRECTO Y ALTO con distintos grados de cumplimiento entre 0 y 1.

La idea de la representación en curvas continuas es mostrar tan realísticamente como sea posible la transición gradual que aprecian los humanos entre “BAJO” y “NO BAJO”, para evitar los saltos bruscos en valores intermedios.

3. 4 CONTROLADOR DIFUSO

En el siguiente ejemplo se ilustra cómo formular un controlador sencillo en lógica difusa. En el ejemplo, el exceso de oxígeno en un proceso de cocción se quiere controlar a través de la regulación de la alimentación de combustible. El flujo de aire es constante, y cuando el porcentaje de oxígeno es demasiado alto o demasiado bajo, se ajusta la alimentación de combustible.

En la figura 3.5 se muestra el programa a implementar. Hay tres líneas de control que indican cómo ajustar la alimentación en relación al porcentaje de oxígeno. Se definen las entradas y salidas consideradas en la base de datos, con escala del porcentaje de oxígeno.

```
0 NOMBRE : LOGDIF
1 *
2 * ESTE PROGRAMA CONTROLA
  OXÍGENO AJUSTANDO COMBUSTIBLE
3 *
4 * ENT/O2/0.7/1.6/3
5 * SAL/COMBUSTIBLE/+ - 0.5
6 *
7 *
8 SI BAJO (O2) ENTONCES
  DISMINUIR COMBUSTIBLE.
9 SI CORRECTO (O2) ENTONCES
  MANTENER COMBUSTIBLE
10 SI ALTO (O2) ENTONCES
  AUMENTAR COMBUSTIBLE
11 *
12 FIN
```

Figura 3.5 Ejemplo de programa

En el ejemplo, 1.6 % de O₂ es el valor normal, y 0.7% y 3% los extremos. Estos extremos no tienen por qué ser simétricos con respecto al valor normal. En la salida, se definen los incrementos a considerar en la alimentación de combustible, siendo +- 0.5% t/h los extremos.

Supongamos que el porcentaje medido de oxígeno es 1.21%.

Veamos los distintos grados de cumplimiento de condiciones y acciones en la figura 3.6.

La primera regla,

SI BAJO (O₂) ENTONCES DISMINUIR (ALIMENTACIÓN COMBUSTIBLE)

indica que se requiere una disminución moderada en la alimentación de combustible. El porcentaje de oxígeno 1.21 % sólo es BAJO en grado 0.42, por lo que la disminución de alimentación está amortiguada correspondientemente. El área sombreada corresponde a la contribución de la primera regla en la acción de control resultante, que se producirá según la combinación de esta contribución con las de las reglas subsiguientes.

En la regla siguiente,

SI CORRECTO (O₂) ENTONCES MANTENER (ALIMENTACIÓN COMBUSTIBLE)

el porcentaje de oxígeno 1.21% es correcto en grado 0.99 por lo que se toma la acción de mantener casi completamente.

La acción de disminuir de la última regla no tiene efecto, ya que el 1.21% de oxígeno es ALTO en grado 0.

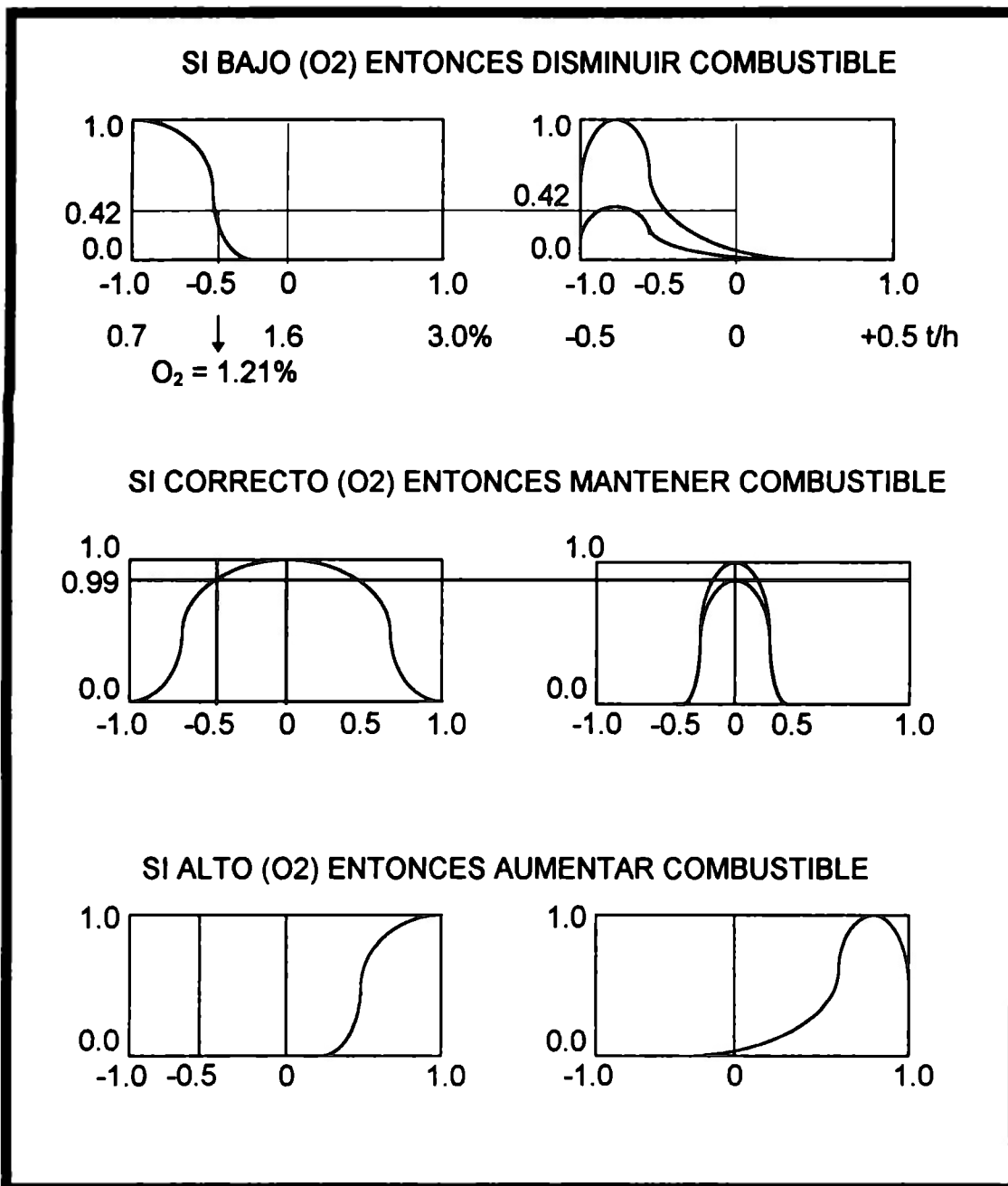


Figura 3.6 Porcentaje de Oxígeno 1.21 %

Por tanto, el 1.21% de oxígeno es **CORRECTO** con tendencia a **BAJO**, y la acción de control estará entre **MANTENER Y DISMINUIR**.

La figura 3.7 muestra cómo se determina la acción de control.

Las contribuciones en área de cada una de las reglas individuales se combinan y se determinan la acción de control por el valor de la abcisa que divide el área conjunta en dos partes iguales ($A_1 = A_2$). En este caso, ALIMENTACIÓN = -0.105 t/h.

Así, el 1.21% de porcentaje en oxígeno resulta en una reducción en la alimentación de combustible de 0.105 t/h.

Las tres reglas influyen la acción de control resultante de acuerdo con el grado de cumplimiento. A pesar de que la estrategia de control sólo consiste en tres instrucciones de control aparentemente imprecisas y simples, la técnica de lógica difusa implica el compromiso de los grados de cumplimiento de las condiciones y el balance en pros y contras, de manera que resulte en una acción de control "razonable" para las reglas dadas [5].

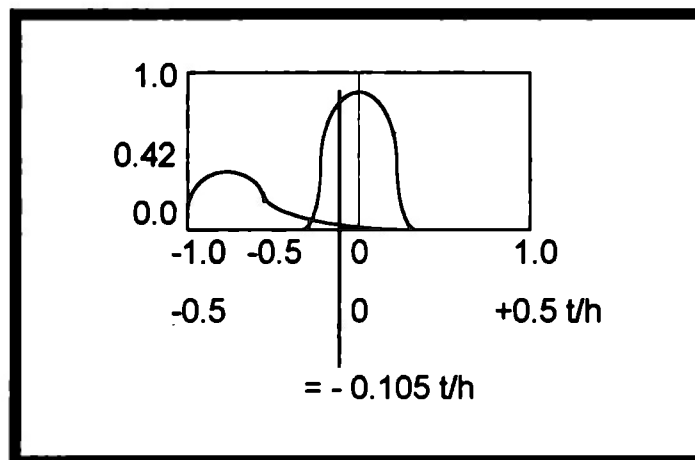


Figura 3.7 Resultado de el ajuste de combustible

3.5 CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN CONTROLADOR DIFUSO

Aunque actualmente no existe alguna clase de metodología sistemática para el diseño de un controlador lógico difuso, C.C. Lee propone en el reporte de investigación [14] y [15], un procedimiento que incluye estrategias de fuzificación y defuzificación, derivación de la base de datos y reglas de control difuso, la definición formal de una implicación difusa, y un análisis de los mecanismos de razonamiento difuso.

A continuación se describen los componentes de un controlador lógico difuso, para posteriormente exponer los parámetros más comunes de diseño del mismo. Los componentes principales de un controlador lógico difuso son:

- 1) Interface de fuzificación.
- 2) Base de conocimientos.
- 3) Lógica de decisiones.
- 4) Interface de defuzificación.

La información del sistema a controlar se obtiene a través de la interface de fuzificación. Enseguida es procesada haciendo uso de la base de conocimientos y de la lógica de decisiones que es en sí el corazón del controlador. Finalmente la salida obtenida es defuzificada para que el control pueda ser aplicado al sistema.

En la siguiente figura 3.8 se indica la configuración básica de un controlador lógico difuso en diagrama de bloques.

3. 5. 1 INTERFACE DE FUZIFICACIÓN

La interface de fuzificación involucra las siguientes funciones:

- Medición de los valores de las variables de entrada.
- Efectúa un mapeo a escala que transfiera el rango de los valores de las variables de entrada a sus correspondientes universos de discurso.
- Realiza la fuzificación de los valores escalados, es decir que transforma las variables de entrada en variables lingüísticas las cuales toman valores que son etiquetas de subconjuntos difusos. Así, la interface de fuzificación le entrega al algoritmo de control la información del sistema en un formato adecuado.

3. 5. 2 BASE DE CONOCIMIENTOS

Su estructura se deriva de la experiencia desarrollada por un operador y/o del conocimiento en ingeniería de control, y depende del proceso a controlar y de las metas de control requeridas. La base de conocimientos consiste de una base de datos y de una base de reglas de control difuso:

- La base de datos provee las definiciones que se usan para especificar las reglas de control lingüísticas y el tratamiento en términos de lógica difusa de los datos disponibles.

- La base de reglas define las metas del control y la estrategia de control tomada de la experiencia, por medio de un conjunto de reglas de control lingüísticas.

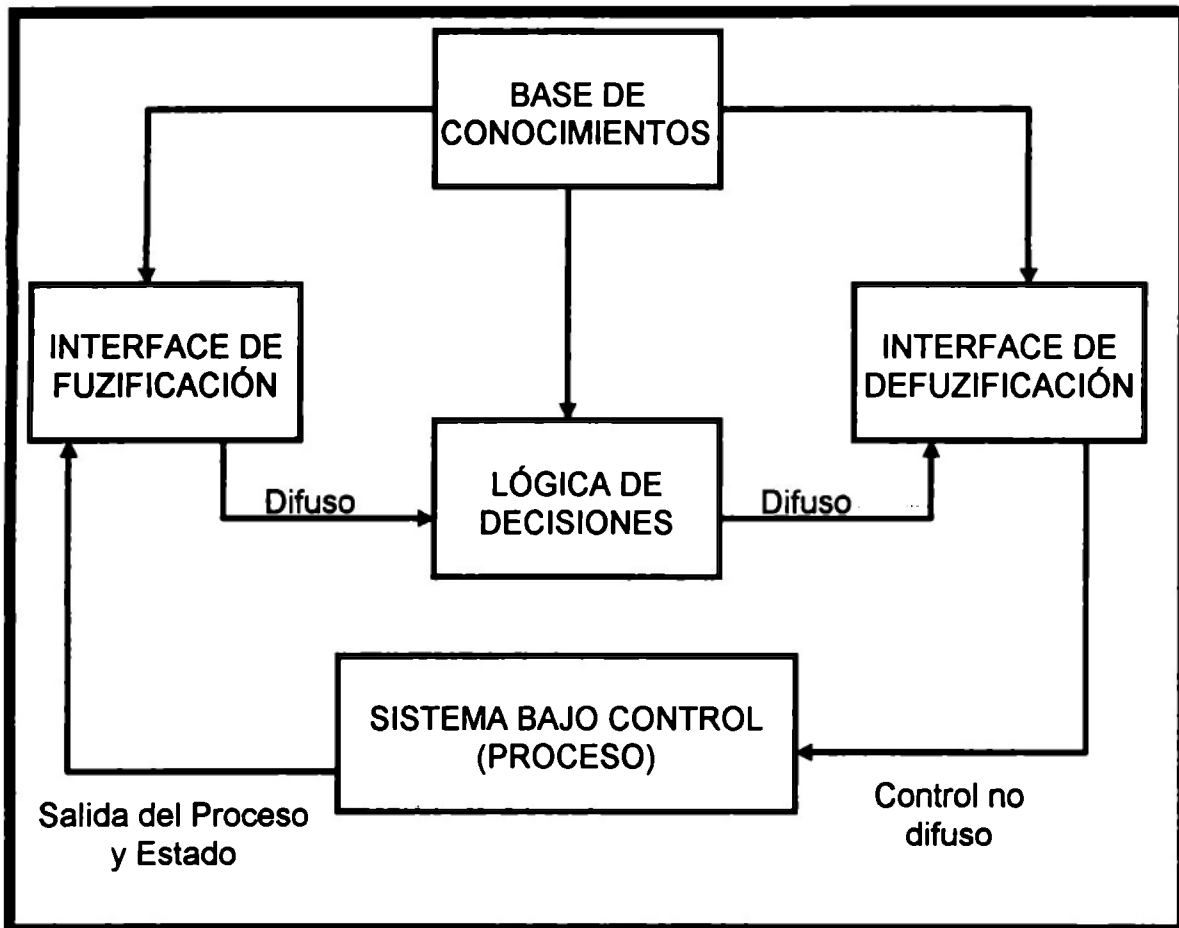


Figura 3.8 Configuración básica de un controlador lógico difuso.

3. 5. 3 LÓGICA DE DECISIONES

Es la parte más importante del controlador lógico difuso, ya que gracias a ella es posible simular el mecanismo de toma de decisiones utilizado por el cerebro humano. Esto se logra mediante el uso de los conceptos de implicación e inferencia difusas.

3. 5. 4 INTERFACE DE DEFUZIFICACIÓN

Realiza las siguientes funciones:

- Un mapeo a escala, que transfiere el rango de valores de las variables de salida a sus correspondientes universos de discurso.

- Defuzificación, la cual transforma la salida de control difuso obtenida (variable lingüística), a un valor no difuso de control (variable numérica) aplicable al sistema.

3. 6 PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN CONTROLADOR LÓGICO DIFUSO

Este punto se desarrolla siguiendo el mismo orden de aparición que en el punto precedente.

3. 6. 1 FUZIFICACIÓN

Para realizar esta operación existen varios métodos [14], [15], pero sólo se presentarán los más usuales:

- El operador de fuzificación (fuzificador) más sencillo, transforma un dato numérico en un singular difuso. Esto es, el valor de entrada u_0 se convierte en un subconjunto difuso que tiene un grado de pertenencia 1 en u_0 y 0 en cualquier otro punto.
- Debido al ruido presente en todo sistema de control se hace necesario convertir las mediciones probabilísticas en mediciones posibilísticas (difusas). De esta manera disminuye la complejidad requerida para el uso de variables aleatorias. El fuzificador en este caso puede generar subconjuntos difusos como los de la figura 3.9.

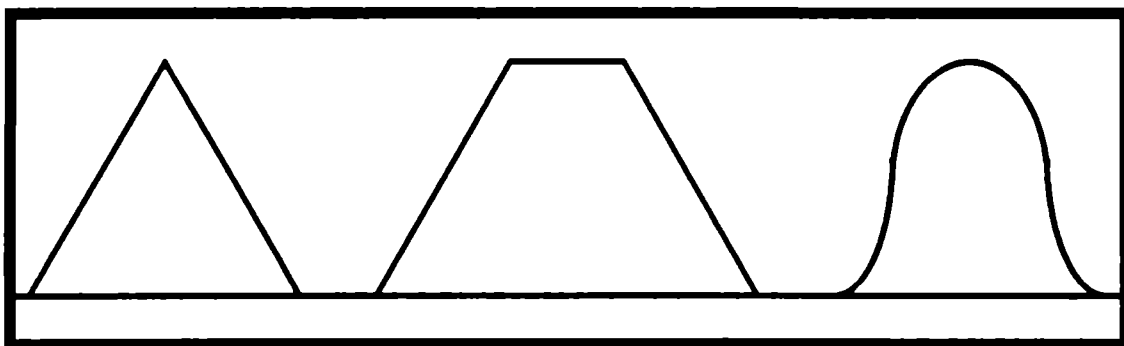


Figura 3.9

La forma de la función de pertenencia depende básicamente de la incertidumbre de las mediciones y de la capacidad de cálculo del control.

- Existen procesos que involucran el manejo de datos precisos, datos probabilísticos o datos híbridos (que son una combinación de los anteriores). En este caso, el

fuzificador se desarrolla haciendo uso de números híbridos, los cuales involucran la incertidumbre (números difusos) y la aleatoriedad (números aleatorios) en un solo concepto.

3. 6. 2 BASE DE DATOS

Incluye la discretización y normalización de los universos de entrada y salida, la definición de los subconjuntos difusos (partición de los universos y funciones de pertenencia) y satisfacer la propiedad de completitud.

a) La discretización : Es evidente la necesidad de discretizar, ya que los datos se procesan en forma digital. Esto produce niveles cuantizados, cada uno de los cuales representa un elemento genérico en un universo discreto. Por lo tanto los subconjuntos difusos se definen al asignar un grado de pertenencia, por medio de funciones de pertenencia, a cada nivel cuantizado. Para lograr la discretización se requiere de efectuar un escalamiento de los valores de las variables. El escalamiento puede ser uniforme (lineal) o no.

b) La normalización: La normalización del universo discreto puede ser lineal o no. Los cálculos de la lógica difusa se realizan con base en escalas dentro de un intervalo de $[-1, 1]$ con la finalidad de facilitar su interpretación, el manejo y su cálculo.

c) Partición de los universos: Sabemos que las variables lingüísticas pueden tomar ciertos valores representados mediante números (subconjuntos) difusos. Por ejemplo la variable humedad puede tomar los valores: alta, media y baja como se muestra en la figura 3.4. Lo anterior implica que la partición difusa de los universos está determinada por el número de subconjuntos difusos en cada universo. El número de términos (subconjuntos difusos) influye en la calidad del control: si aumenta el número de términos la calidad también aumenta.

d) Funciones de pertenencia: Pueden definirse numéricamente o utilizando una función. La definición numérica relaciona cada elemento del universo con un grado de pertenencia al subconjunto difuso correspondiente. Esto se puede representar mediante una tabla; en la figura 3.10 se muestra un subconjunto difuso así definido. La definición funcional se da cuando esta relación se implementa a través de una función

analítica. Las formas típicas de los subconjuntos difusos así definidos pueden verse en la fig. 3.9.

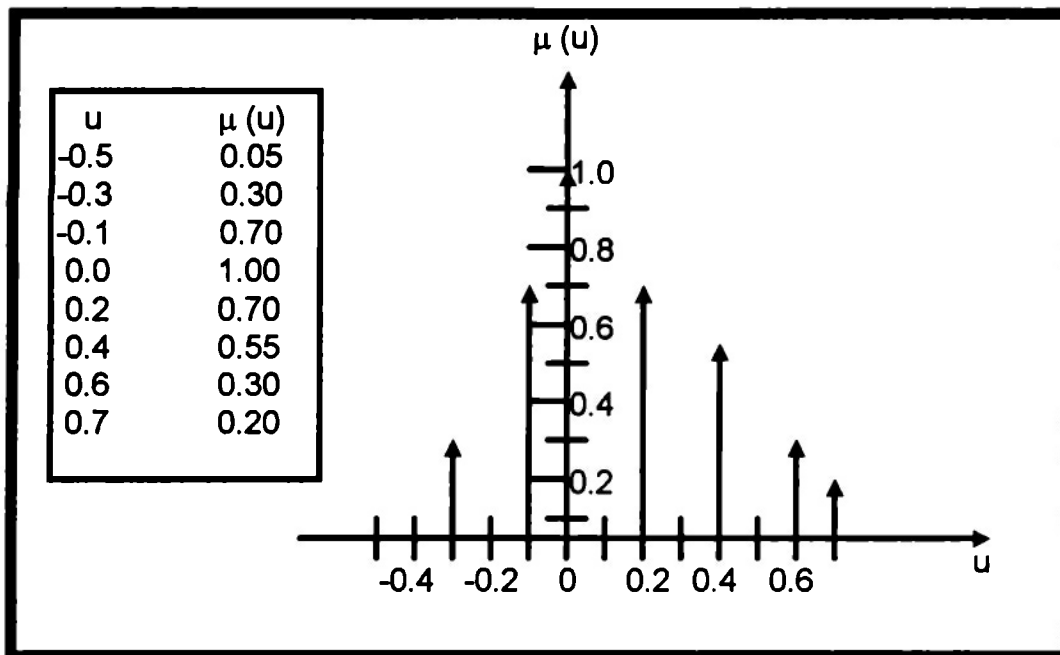


Figura 3.10

e) **Compleitud:** Esta propiedad indica que el algoritmo debe ser capaz de inferir una acción de control correcta para cada estado del proceso.

3. 6. 3 BASE DE REGLAS

La estrategia de control, derivada de la experiencia, se expresa mediante el uso de algoritmos difusos. Las reglas de control que forman el algoritmo difuso pueden definirse usando los siguientes criterios:

a) **Selección de las variables:** Las variables de entrada se seleccionan basándose en la experiencia y en conocimientos en ingeniería de control. Generalmente se usan como variables del error, el cambio (derivada) del error, etc.

b) **Origen y obtención de las reglas de control:** Hay cuatro fuentes de obtención de las reglas de control:

- La experiencia y los conocimientos en ingeniería de control. Es la más usual, las referencias [16], [17], muestran ejemplos detallados de ésta técnica.

- La observación de las acciones de control de operadores humanos .
- El modelo difuso del proceso, consultar referencias [14], [15].
- Dando el control la capacidad de construir sus propias reglas. En este caso se tendría un controlador auto-organizado. Como un ejemplo de ésta técnica puede consultarse la referencia [16].

c) **Justificación de las reglas de control difuso:** Básicamente, las reglas se pueden generar a través de dos tipos de métodos.

- El primero es heurístico y se apoya en la experiencia y el análisis del comportamiento del sistema. Es el método más utilizado en el diseño de los controladores lógico difusos, ya que se implementa de manera natural y sencilla a partir del conocimiento cualitativo del proceso. En su depuración es de mucha ayuda tener nociones de ingeniería de control. En [16], [17], [18], [19], [20], se reportan varios ejemplos exitosos en los cuales se usó este método.
- El segundo es determinístico, es decir que a partir del estudio de sistema, se formulan y definen los parámetros y la estructura de las reglas de control difuso. Este método es laborioso y aún está siendo investigado. En la referencia [14], se listan algunas de las aplicaciones llevadas a cabo con el uso de este método.

d) **Tipos de reglas de control difuso:** Existen dos tipos de reglas de control difuso: de evaluación de estado y de evaluación de objeto.

- **Reglas de evaluación de estado:** Las usan la mayoría de los controladores de lógica difusa, se expresan en forma de enunciados condicionales difusos cuya estructura general es, para un sistema de múltiples entradas y una salida:

R1: Si x es A1,... y w es B1 ENTONCES z es C1

R2: Si x es A2,... y w es B2 ENTONCES z es C2

.....

Rn: Si x es An,... y w es Bn ENTONCES z es Cn

donde x,...,w, son variables lingüísticas de entrada, z es la variable lingüística de salida, y A1,...B1, y C1 son respectivamente, los valores que toman cada una de esas variables. Como su nombre lo indica, este conjunto de reglas evalúa el estado

actual del sistema para posteriormente obtener, mediante los mecanismos de inferencia difusa, una salida de control basada en esa evaluación.

- Reglas de evaluación de objeto: Este tipo de reglas involucra la evaluación del estado actual así como del resultado de la acción de control. La regla de control más apropiada se elige mediante resultados de predicción correspondientes a cada comando de control. Estos resultados de predicción son índices de cumplimiento de los objetivos de control.

e) Propiedades de consistencia, interactividad y completitud.

- Consistencia: Implica que las reglas de control deben ser examinadas para evitar la posibilidad de contradicción entre ellas.
- Interactividad: Es un índice de la redundancia que pudiera haber entre las reglas. La interacción de las reglas de control es un problema complejo y que aún está siendo investigado.
- Completitud: La base de reglas debe ser tal que para cada estado del proceso se genere una acción de control adecuada.

3. 6. 4 LÓGICA DE DECISIONES

Sirve para simular la toma de decisiones de manera semejante a como lo haría un ser humano. Para expresar el algoritmo de control en términos de operaciones con subconjuntos difusos se emplean los conceptos de relación difusa, producto cartesiano de subconjuntos difusos y la regla composicional de inferencia ([1], [14], [15]).

Las reglas de control difuso empleadas en el algoritmo de control se pueden representar por medio de relaciones difusas. En términos generales una relación difusa establece una correspondencia entre los valores de una variable x de un universo X con los valores de una variable w en el universo W . Lo anterior se puede representar como:

$$R = \int_{X, W} \mu_R(x, w) / (x, w), \quad x \in X, w \in W$$

La función de implicación puede tomar varias formas y la selección de la misma depende de muchos factores. Actualmente se conocen alrededor de 40 funciones de implicación. En [15] se describen dos de estas funciones y se listan las funciones de implicación más usadas en los controladores lógico difusos.

Ahora, en una implicación difusa del tipo: Si x es A y w es B ENTONCES z es C , el conectivo y generalmente se representa como un producto cartesiano [15]. El producto cartesiano se define como:

$$\mu_{A \times B}(x, w) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(w)\}$$

La regla composicional de inferencia es la que nos permite obtener la decisión de salida a partir de la representación de las reglas de control en términos de lógica difusa. Si se tiene una relación R en $U \times V$, y x es un subconjunto de U , entonces el subconjunto w inducido por x en V está dado por:

$$w = x \circ R$$

donde $x \circ R$ es la composición de x y R . Este operador composicional puede representarse de varias formas, las más comunes se incluyen en [15].

3.7 ESTRATEGIAS DE DEFUZIFICACIÓN

Consiste en un mapeo de los valores de salida del algoritmo difuso a valores de salida no difusos aplicables al sistema bajo control. No existe una estrategia de defuzificación única, y por lo tanto la selección de la misma la determinan las necesidades del control y la capacidad del mismo. En los controladores lógico difusos crecientemente desarrollados las estrategias más usadas son: el criterio del máximo, el promedio del máximo y el método del centro de áreas. En seguida se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

- Método del criterio máximo: Da como resultado el punto en el cual la distribución de posibilidades de la acción de control alcanza el valor máximo.

- **Método del promedio del máximo:** Esta estrategia genera una acción de control la cual es el promedio de todas las acciones de control cuyos grados de pertenencia alcanzan el máximo valor.
- **Método del centro de áreas:** Es ampliamente usado, [16], [18], [21], [22]. Se calcula el centro de gravedad de la distribución de las salidas del control difuso para obtener la acción de control para el sistema.

CAPÍTULO 4

LOS SISTEMAS EXPERTOS Y LA LÓGICA DIFUSA

4.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS EXPERTOS

Durante las últimas tres décadas, la potencialidad de la informática electrónica se ha usado al grado creciente para apoyar decisiones humanas de diferentes maneras. En los sesenta los sistemas de gestión de información (MIS) creados, probablemente exageraron las esperanzas de los gerentes. Desde el decenio de 1970 y más tarde en los 80's los sistemas de apoyo para las decisiones (DSS) encontraron su camino en la gestión e ingeniería. Los más jóvenes de estos desarrollos son el conocimiento llamado Sistemas Expertos que se han aplicado desde mediados del decenio de 1980 para resolver problemas de gestión (Zimmermann 1987, p.310). Se presume generalmente que los sistemas expertos influirán cada vez más en la adopción de medidas de procesamiento en el negocio en el futuro.

Si uno interpreta decisiones más bien generales, que es, incluyendo la evaluación, el diagnóstico, pronóstico, etcétera, estos tres tipos podrían clasificarse como sistemas de apoyo de decisión que difieren gradualmente con respecto a las propiedades siguientes:

1. ¿ Se perfecciona el sistema o simplemente provee información?
2. ¿ Es generalmente útil o simplemente para áreas y propósitos específicos?
3. ¿ Se contiene a si mismo con respecto a los procedimientos y los algoritmos o se hace inferencia aprendiendo, derivando y adoptando reglas desde el conocimiento que se averigua desde un humano (experto) analizado dentro de el sistema?

Se puede esperar que en el futuro esta decisión apoye a los sistemas que contendrán creciente grado en el futuro de todos los tres tipos de los sistemas antes dichos. Si bien la teoría de lógica difusa puede usarse en los tres prototipos, nosotros nos concentraremos en sistemas expertos, solamente porque la necesidad y el problema de manejo con incertidumbre de muchos tipos es muy evidente allí; y de aquí en adelante la aplicación de la teoría de la lógica difusa es muy prometedora y, de hecho, la mas avanzada. En operaciones de investigación el modelado de problemas normalmente está siendo hecho por el especialista. El usuario entonces provee datos

y el modelo matemático provee la solución al problema por medio de algoritmos seleccionados por el especialista.

En sistemas expertos, el dominio del conocimiento se enfatiza típicamente sobre métodos formales de razonamiento. En intentar de equiparar el desempeño de expertos humanos, la llave para resolver el problema, frecuentemente yace más en el conocimiento específico de como usar los hechos pertinentes que en generar una solución desde algunos principios lógicos generales. Los expertos humanos logran el desempeño porque ellos son el conocimiento. Convencionalmente la ingeniería de software es con base en los lenguajes de programación procesales. Las tareas para ser programadas tienen que ser bien entendidas, el flujo global del procedimiento tiene que ser determinado, y los detalles de algoritmos de cada subtarea tienen que ser conocidos antes de la programación real para poder proceder. La depuración frecuentemente representa una inversión enorme en el tiempo, y hay poca esperanza de automáticamente explicar como los resultados son derivados. Luego la modificación o el mejoramiento de un programa llega a ser muy difícil.

La mayoría de las actividades humanas en lo que concierne a planificación, diseño, análisis, o la consultoría no se ha considerado prácticamente para ser programada en software convencional. Tales tareas requieren procesar símbolos y significados más bien que de números. Pero más pretenciosamente, es sumamente difícil describir tales tareas paso por paso del proceso. Cuando se pidió a un experto común, no pudo describir el procedimiento de manera que se resolviera el problema del proceso entero. Sin embargo, un experto pudo afirmar un número general de pedazos de conocimiento, sin una secuencia global coherente, bajo la interrogación entrenada y persistente. La temprana investigación concentrada sobre como un proceso de relaciones pertinentes en un dominio para resolver un problema determinado. Las fundaciones importantes han sido desarrolladas para permitir, en un principio, cualquier y todas las consecuencias lógicas de ser generadas desde un conjunto determinado de hechos declarados. Tal problema general de propósito que resuelve técnicas, sin embargo, comúnmente llegar a ser poco práctico como un mundo de juguete usado para demostraciones es reemplazado por igual en uno simplemente verdadero. La realización de ese conocimiento de como resolver problemas en el dominio específico

debería ser una parte de la base desde donde las inferencias se sacan contribuidas pesadamente para hacer la tecnología experta de sistemas prácticos.

Mientras el especialista modeló el paquete del software normalmente apoyado en el experto, y el sistema experto se supone para modelar y hacer su conocimiento experto disponible a no expertos para propósitos de toma de decisión haciendo, consultas, diagnósticos, aprendiendo, o investigando.

El carácter de un sistema experto podría llegar a ser más evidente si nosotros cotizamos algunas de las características del sistema consideradas como atributos de sistemas expertos. Los atributos de sistemas expertos incluyen:

- El sistema experto tiene un dominio de conocimiento específico separado y la metodología de resolver problemas incluye los conceptos de la Base de Conocimientos y el Diseño Inferencial.
- El sistema experto deberá pensar en la forma en que el experto humano lo hace.
- Su base dinámica de conocimiento deberá ser extendible, modificable, y se facilitará conectándose en diferentes módulos de conocimiento.
- El traslado interactivo de conocimiento deberá minimizar el tiempo necesitado para transferir el conocimiento del experto a la base de conocimientos.
- El sistema experto deberá obrar recíprocamente con el lenguaje natural al dominio del experto; deberá permitir al usuario pensar en la orientación del problema de condiciones. El sistema deberá adaptarse al usuario y no de manera contraria. El usuario deberá aislarse de los detalles de la implementación.
- El embotellamiento principal en el traslado de pericia del ingeniero de conocimiento deberá ser eliminado.
- La estrategia de control deberá ser simple y transparente al usuario, el usuario deberá ser capaz de comprender y predecir el efecto de adición de nuevos detalles a la base de conocimientos. En el mismo tiempo, se debe tener suficiente poder como para resolver problemas complejos.
- Deberá ser una estructura barata para construir y experimentar con sistemas expertos.
- Se debe ser capaz de razonar bajo condiciones de incertidumbre e información insuficiente y debe ser capaz de razonar probabilísticamente.

- Un sistema experto deberá ser capaz de explicar por qué un hecho se necesita para completar la línea de razonamiento y como se llegó a una conclusión.
- Los sistemas expertos deberán ser capaces de aprender desde la experiencia.

Kastner y Hong proveen esta definición: " Un sistema experto es un programa de computadora que resuelve problemas que hasta ahora requirieron de la pericia humana, es importante por usar explícitamente conocimientos del dominio representado y procedimientos de decisión computacional. "

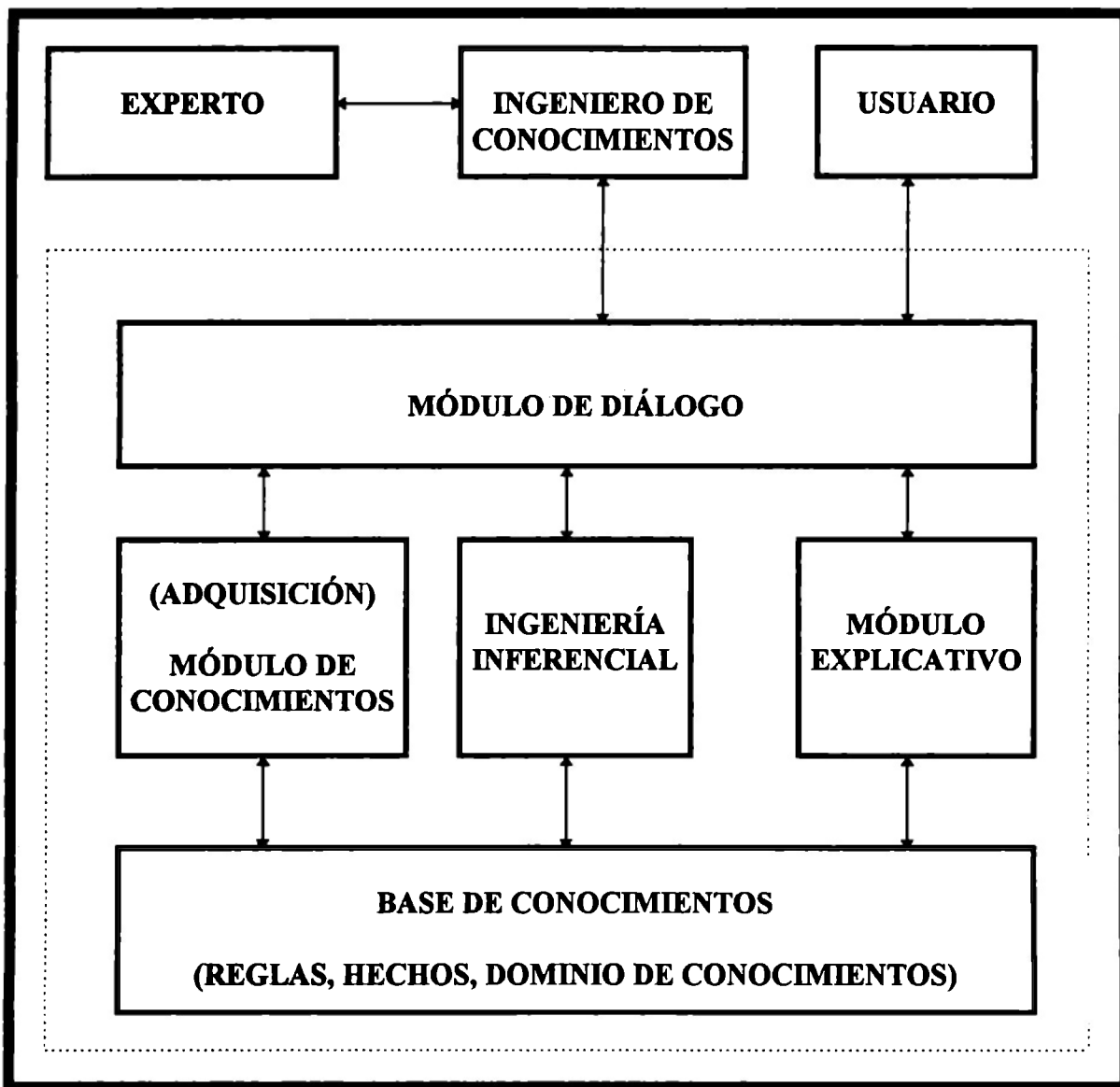


Figura 4.1

La estructura general de un sistema experto se muestra en la Figura 4. 1. En los siguientes, cinco componentes de tal sistema se explican en más detalle. El Módulo de Adquisición de conocimiento se apoya en la formación de una base de conocimientos de un sistema experto.

El tema de adquisición de conocimiento para sistemas basados en conocimientos cae convenientemente en dos partes dependiendo sobre si el conocimiento se obtiene desde los expertos por los ingenieros de conocimiento o si ese conocimiento se adquiere automáticamente por la computadora usando alguna forma de estrategia y algoritmos de aprendizaje automático.

Un módulo que ayuda al ingeniero de conocimientos durante el proceso de elección de conocimientos podría consistir de un editor fácil de usar.

Otra manera para adquirir dominio dependiente del conocimiento es la aplicación de una máquina que aprenda técnicas automáticamente para generar una parte de la base de conocimientos. Es de esperar que los mejoramientos rápidos tendrán lugar en el campo de adquisición automática de conocimiento en el futuro.

La base de conocimiento contiene todo el conocimiento sobre un cierto dominio que se ha metido por medio del antedicho módulo de adquisición de conocimientos. Aparte de especial sistema y requerimientos de almacenaje de estructuras dependientes, la base de conocimiento puede cambiarse en algunos sistemas expertos. Puede haber varias bases de conocimientos, cada cobertura tiene un diferente dominio, que puede ser conectada en la estructura del sistema experto restante.

Hay básicamente dos tipos de conocimiento que necesitará ser representado en el sistema: el conocimiento enunciativo y el conocimiento procesal. La parte enunciativa de la base de conocimientos describe los objetos (hechos, términos, conceptos, ..) que son usado por el experto (y el sistema experto), también describe las relaciones entre estos objetos. Esta parte de la base de conocimiento se refiere a veces a la base de datos o base de hechos.

La parte procesal de la base de conocimiento contiene la información sobre como estos objetos puede usarse para inferir conclusiones nuevas y finalmente llegar a

una solución. Desde este conocimiento se expresa comúnmente como (heurístico u otras) reglas, es generalmente conocido como la base de reglas [23].

4. 2 LA LÓGICA DIFUSA

Los sistemas expertos y el control por lógica difusa, los dos sistemas tienen seguramente una cosa en común: ambos quieren modelar la experiencia humana, al comportamiento humano en la toma de decisiones.

La idea básica detrás de este enfoque estuvo en incorporar la experiencia de un operador humano de proceso en el diseño del controlador. Desde un conjunto de reglas lingüísticas las cuales describen la estrategia de control del operador en un algoritmo de control se construye donde las palabras se definen como un conjunto difuso. Las ventajas principales de este enfoque parecen ser la posibilidad de implementar una regla de la perturbación desde la experiencia, intuición, heurístico, y el hecho que no necesita un modelo del proceso.

Ciertas plantas industriales complejas, por ejemplo, un horno de cemento, pueden controlarse con resultados mejores por un operador experimentado que por controladores automáticos convencionales. Las estrategias de control empleado por un operador pueden frecuentemente ser formuladas como un número de reglas que son simples para efectuar manualmente pero difícil de implementar por usar algoritmos convencionales. Esta dificultad es porque los seres humanos usan los términos cualitativos más bien que los cuantitativos cuando se describen diversas decisiones para ser tomados como una función de estados diferentes del proceso. Es esta naturaleza difusa o cualitativa la manera en que el hombre toma sus decisiones, son las que han fomentado el diseño de control para tratar de aplicar la lógica difusa para el control de procesos.

Los procesos industriales complejos tales como reactores químicos de lote, hornos de ráfaga, hornos de cemento, y el oxígeno básico en la elaboración de acero son difíciles controlar automáticamente.

Esta dificultad se debe a su no-linealidad, variación del tiempo del comportamiento, y la mala calidad de medidas disponibles. En tales casos, el control automático se aplica a esas variables secundarias que pueden medirse y controlarse,

por ejemplo, temperaturas, presiones, y flujos. Los objetivos sobre todos los procesos de control, tal como la calidad y la cantidad del producto que se producen, han pasado a estar en la izquierda del operador humano.

En algunas plantas modernas con los procesos de control por computadora, los modelos de la planta han sido usados para calcular los requerimientos de que el controlador que automatice las funciones más altas de control de nivel. La planta modela si ellos son con base en relaciones físicas y químicas o los métodos de estimación de parámetros son los acercamientos al proceso verdadero y pueden requerir una cantidad grande de tiempo de computadora. Algunas aplicaciones exitosas se han informado, pero las dificultades se han experimentado donde los procesos operados sobre una gama amplia de condiciones y sufridas de perturbaciones estocásticas.

Un enfoque alternativo al control de procesos complejos está en investigar las estrategias de control empleado por el operador humano. En muchos casos, el operador del proceso puede controlar un proceso complejo más efectivamente que un sistema automático; cuando él experimenta una dificultad, esto frecuentemente se atribuye al valor o la manera de información de muestra o la profundidad al que él puede evaluar decisiones.

Hay, sin embargo, también aclarar diferencias entre sistemas expertos y el control de lógica difusa:

1. La existencia de sistemas de control de lógica difusa originados en el diseño de control más que en la inteligencia artificial.
2. Los modelos del control de lógica difusa son sistemas basados en reglas.
3. Por el contraste a sistemas expertos, el control de lógica difusa sirve casi exclusivamente al control de sistemas de producción tal como energía eléctrica, plantas de horno de cemento, plantas químicas, y sus dominios son más estrechos que la de los sistemas expertos.
4. En general, las reglas de los sistemas control de lógica difusa no son extraídos desde el experto humano mediante el sistema pero han sido formulados específicamente por el diseñador del control de lógica difusa.

5. Finalmente, a causa de su propósito, sus aportes son normalmente observaciones de sistemas tecnológicos y sus salidas son controladas por declaraciones [23].

4.3 CONTROL DIFUSO DE UN HORNO DE CEMENTO

En este caso nosotros consideraremos un proceso físico como el objeto de control. La figura 4.2 ilustra el proceso de producción. El problema principal en el modelado matemáticamente una estrategia de control es que las relaciones entre variables de aporte (características medidas del proceso) y control de las variables son complejos, no-lineales, contenidos interrelacionados, retrasos de tiempo, y que la respuesta del horno para controlar aportes depende de las condiciones predominantes del horno. Esto era seguramente una razón por la que un sistema de control difuso se diseñó y fue usado, que eventualmente igual condujo al controlador difuso comercialmente disponible.

4.3. 1 FORMULACIÓN DE REGLAS

El objetivo final del sistema computarizado de control de un horno está en automatizar la estrategia de control de rutina de un operador experimentado del horno. Las estrategias aplicadas son con base en detallados estudios sobre las experiencias del operador del proceso que incluye un modelo cualitativo de influencia de las variables de control sobre los variables medidas.

La primera fase para obtener un conjunto de expresiones lingüísticas de control es la definición de las variables que van a ser implementadas dentro de ellas. Una vez seleccionadas se hacen combinaciones de las variables en situaciones que puedan presentarse dentro de la operación del horno, para posteriormente generar la acción de control que sea la más adecuada.

El conjunto de reglas está formado por:

- 20 Reglas de Control
- 7 Variables Manipuladas
- 4 Variables Controlada
- 3 Zonas de Manipulación

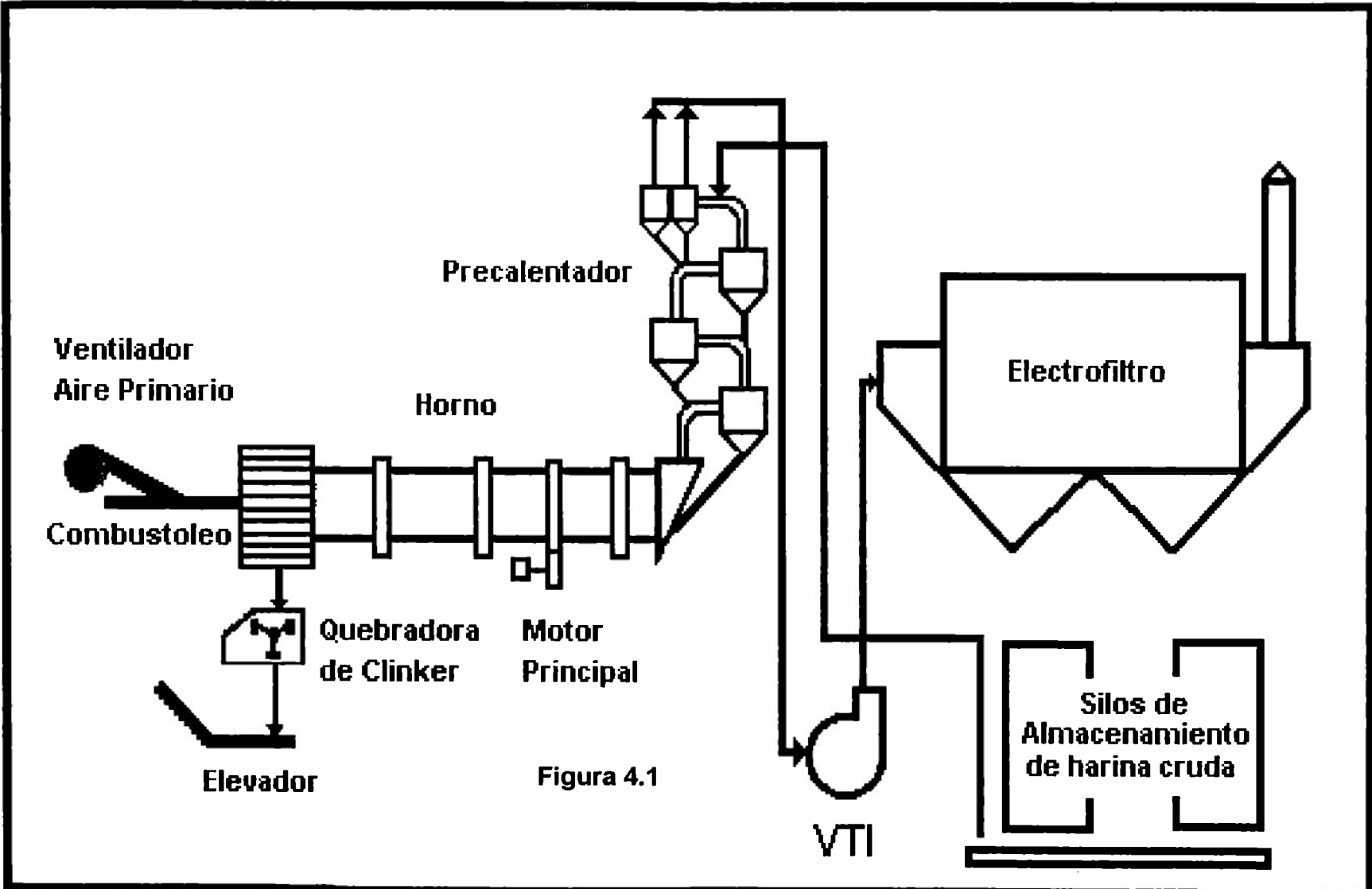


Figura 4.1

En una primera revisión de las reglas de control el conjunto de variables utilizadas son:

- Observación Visual
- Amperaje del motor principal
- Porcentaje de CO salida VTI
- Porcentaje de O₂ salida VTI
- Temperatura placas 1er. compartimiento.
- Temperatura pirómetro óptico.
- Tiro de cámara de gases
- Factor de saturación de cal.
- Cal libre.

El % de Cal Libre y el Factor de Saturación de Cal fueron eliminadas como variables, ya que estos datos son proporcionados por el Laboratorio después de 1 hora. Para este tiempo como vemos ya no es práctico retroalimentar estos datos al sistema. Si embargo estos parámetros son llevados para tener un seguimiento en el control de calidad.

Este sistema no toma los valores de las temperaturas en la cámara de gases y en la zona de combustión, es por eso que no se tomaron en cuenta las 27 condiciones básicas de operación de un Horno por K. Peray.

Se puede considerar al NO_x como un indicador muy bueno de la temperatura punta del clínker dentro del horno sometido a las siguientes observaciones:

- El sistema de preparación y encendido del combustible tiene que estar bien diseñado.
- La forma de la llama no debería cambiar de forma significativa ya que el nivel general de NO_x está comprobado que es función del diseño del sistema de combustión y las características asociadas de la llama.
- Una reducción de las condiciones, generalmente en exceso, de 3,000 ppm de CO medidos en la salida del Horno, puede degradar seriamente el NO_x.
- El NO es el componente predominante del NO_x (90% o más) hasta que se presente un exceso significativo de aire en la corriente del gas que, cuando se combina con bajas temperaturas, posibilitará al NO oxidar, cada vez en mayor cantidad, a NO₂.

- El nivel de NO_x no da siempre una verdadera indicación de la calidad del clínker cuando las condiciones del horno están por debajo de lo normal. Por ejemplo, la señal de NO_x se mantenía alta (indicando una aparente buena calidad de las condiciones de la zona de combustión del clínker) aunque el horno estuviera en una condición de flujo.

De este grupo de variables se seleccionó y depuró de acuerdo a los comentarios extraídos de los horneros, el siguiente grupo:

- ppm de NO_x Cámara de Gases,
- Amperaje motor principal.
- Porcentaje de O₂ salida VTI
- Porcentaje de CO salida VTI
- Presión 2do. compartimiento
- Temperatura cámara de gases
- Temperatura salida precalentador.

A partir de este grupo de variables se realizó un árbol de combinaciones de 7x7 que generó un total de 54 reglas congruentes. A partir de estas se realizó una depuración de los casos que se presentan realmente durante la operación normal del horno, generando un conjunto de 20 reglas.

Los criterios utilizados en la implementación del conjunto de reglas resultantes son los siguientes:

1. - Existe una regla de todo satisfactorio que determina la ganancia del controlador.
2. - El orden de prioridad de las acciones de control con respecto de las variables de manipulación es de acuerdo con la magnitud de la perturbación, la prioridad de las variables controladas es: Flujo de combustible, Apertura persianas VTI, Alimentación de crudo, y velocidad de rotación del horno.
3. - En las reglas de control las variables manipuladas poseen cierta prioridad en cuanto a su manifestación en el horno, la prioridad de las variables se presenta a continuación:

PRIORIDADES

- ppm de NO_x Cámara de Gases,
- Amperaje motor principal.
- Porcentaje de O₂ salida VTI
- Porcentaje de CO salida VTI
- Temperatura cámara de gases
- Temperatura salida precalentador.
- Presión 2do. compartimiento.

4.- El conjunto de reglas es el resultado de una depuración de un conjunto obtenido de un árbol de combinaciones de 7 x 7 utilizando criterios de congruencia y factibilidad.

5.- Las acciones de control son únicamente tres: aumento, no acción, disminución las cuales actúan sobre 4 variables de control.

4. 3. 2 CONDICIONES DE OPERACIÓN

El sistema experto de control para un horno rotatorio de fabricación de cemento, está diseñado para operar cuando se alcanza una condición de operación estable, y mediante las acciones de control que el sistema envíe, tratará de que el horno se mantenga en este estado. De esta manera se obtiene un producto uniforme de mayor calidad, aumentando la disponibilidad del refractario y en general del horno.

Los hornos de fabricación de cemento están sujetos a una gran cantidad de irregularidades durante la operación, debidas principalmente a la propia naturaleza dinámica del proceso; tal como cambios en la composición química del crudo alimentado, en el combustoleo utilizando durante la combustión, etc; es decir el horno constituye un sistema no lineal. Por ello durante el desarrollo de un sistema experto es fundamental definir el rango de operación bajo el cual estará operando, y las condiciones de operación que podrá manejar el sistema.

El rango de operación define la magnitud de las acciones de control que envía el sistema experto, las condiciones de operación que sea capaz de manejar deberán estar dentro del conjunto de reglas del conocimiento. Durante el presente desarrollo el rango de operación elegido permite mantener el control operacional del horno y el

envío de acciones de control suaves. Las condiciones de operación pueden ser de dos tipos: normales y anormales.

Operación Normal.- Una operación normal está definida como aquella en la cual el valor de las variables está dentro de un rango definido de operación estable, las características de una operación normal son:

- El valor de las variables adquiridas del sistema se mantiene en un rango definido de operación.
- La operación está contemplada en el conjunto de reglas del conocimiento.
- La magnitud de las perturbaciones en el sistema son pequeñas.
- Requieren no más de dos acciones de control aplicadas de manera simultánea.

El problema del control del horno pide una solución que pueda implementar técnicas de control de multivariables. Esto significa que las medidas clave de la planta -por ejemplo, NO_x, %O₂, %CO., etc.- están todas interrelacionadas con los parámetros claves de control como son combustible, alimentación de crudo, apertura de VTI, velocidad de giro del Horno. Por consiguiente no es posible ajustarlas mediante ciclos de control independientes.

REGLA 0

TODO → SATISFACTORIO.

PPM DE NO _x CÁMARA DE GASES	SATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPAL	SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O ₂ SALIDA VTI.....	SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....	SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....	SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....	SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....	SATISFACTORIO

ACCIÓN

NINGUNA

REGLA 1

NO_x → ALTO, AMP → NORMAL

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESALTO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

DISMINUCIÓN DE COMBUSTIBLE

(La tendencia de la temperatura es a subir).

REGLA 2

NO_x → ALTO, AMP → ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESALTO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALALTO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

DISMINUCIÓN DE ALIMENTACIÓN

(Posible enfriamiento, mucho material en el horno)

REGLA 3

NO_x → ALTO, AMP → ALTO, TCG → ALTO, TSP → ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESALTO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALALTO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....ALTO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....ALTO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

DISMINUCIÓN APERTURA VTI

(Para no llevarse el flujo de calor del horno)

REGLA 4

AMP → ALTO, O₂ → BAJO, CO → ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALALTO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....BAJO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....ALTO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

AUMENTO DE APERTURA VTI

(Descostramiento, se aumenta la apertura del VTI para aumenta el O₂ en la combustión)

REGLA 5

O₂ → ALTO, CO →BAJO, TCG → ALTO, TSP → ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....ALTO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....BAJO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....ALTO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....ALTO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

DISMINUCIÓN DE APERTURA VTI.

(Demasiado O₂ tiende a incrementar al NO_x, bajar el flujo de calor al horno)

REGLA 6

O₂ → ALTO, CO → ALTO, TCG → ALTO. TSP → ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....ALTO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....ALTO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....ALTO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....ALTO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

DISMINUCIÓN DE COMBUSTIBLE

DISMINUCIÓN DE CRUDO

(CO entrada de aire falso, no hay buena combustión)

REGLA 7

NO_x → BAJO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESBAJO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

AUMENTO DE COMBUSTIBLE

AUMENTO DE ALIMENTACIÓN

(Soporta el horno combustible, tendencia a enfriarse)

REGLA 8

NO_x → BAJO, AMPER → BAJO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESBAJO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALBAJO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

AUMENTAR ALIMENTACIÓN

AUMENTO APERTURA VTI

(Se está calentando → bastante fase líquida, el VTI es para enfriar un poco)

REGLA 9

NO_x → BAJO, AMP → BAJO, O₂ → ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESBAJO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALBAJO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....ALTO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

AUMENTO DE COMBUSTIBLE

(Se aumenta el combustible para mejorar la combustión, una vez mejorada la combustión se puede pasar a la regla 8).

REGLA 10

NO_x → BAJO, AMPER → BAJO, O₂ → BAJO, CO→ ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESBAJO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALBAJO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....BAJO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....ALTO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

AUMENTAR PERSIANAS VTI

(Para mejorar la combustión)

REGLA 11

O₂ → ALTO, CO → BAJO, P2C → BAJO, TCG →ALTO, TSP → ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....ALTO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....BAJO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....ALTO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....ALTO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....BAJO

ACCIÓN <TAPONAMIENTO>

EJECUTAR SECUENCIA DE PARO

(El indicativo es la baja presión el segundo compartimiento, que se debe corroborar con la temperatura y presión en las etapas del precalentador, con baja presión y altas temperaturas oscilantes)

REGLA 12

P2C → ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....ALTO

ACCIÓN

DISMINUCIÓN DE COMBUSTIBLE

DISMINUIR CRUDO

DISMINUIR VELOCIDAD DEL HORNO

(Está cargado el enfriador)

REGLA 13

TSP -> ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....ALTO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

SI EL CRUDO NO SE ENCUENTRA EN SU MÁXIMO VALOR AUMENTAR CRUDO.

SI EL CRUDO SE ENCUENTRA EN SU MÁXIMO VALOR DISMINUIR APERTURA VTI.

(MATL. FÁCIL)

REGLA 14

NO_x → NORMAL, AMP →ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALALTO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

DISMINUCIÓN DE ALIMENTACIÓN

(El horno tiende a enfriarse)

REGLA 15

NO_x → NORMAL, AMP →BAJO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALBAJO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

AUMENTAR ALIMENTACIÓN.

(El horno tiende a calentarse, bastante fase líquida)

REGLA 16

O₂ → BAJO, CO →NORMAL

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....BAJO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

AUMENTAR APERTURA VTI.

REGLA 17

O₂ → BAJO, CO →ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....BAJO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....ALTO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

AUMENTAR APERTURA VTI.

DISMINUIR COMBUSTIBLE

(Checar perfil de temperaturas en el horno.)

REGLA 18

O₂ → NORMAL, CO →ALTO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....SATISFACTORIO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....ALTO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

BAJAR COMBUSTOLEO

AUMENTAR APERTURA VTI.

REGLA 19

O₂ → ALTO, CO →BAJO

PPM DE NO_x CÁMARA DE GASESSATISFACTORIO
AMPERAJE MOTOR PRINCIPALSATISFACTORIO
PORCENTAJE DE O₂ SALIDA VTI.....ALTO
PORCENTAJE DE CO SALIDA VTI.....BAJO
TEMPERATURA CÁMARA DE GASES.....SATISFACTORIO
TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADOR.....SATISFACTORIO
PRESIÓN 2DO. COMPARTIMIENTO.....SATISFACTORIO

ACCIÓN

DISMINUCIÓN DE VTI

Operación Anormal.- Una operación anormal está definida como aquella en la cual la operación del horno muestra un comportamiento oscilante debido a una perturbación severa en sus condiciones de operación, las características de una operación anormal son:

- El valor de las variables adquiridas del sistema sale del rango definido de operación.
- No está contemplada dentro del conjunto de reglas del conocimiento.
- La magnitud de la perturbación es severa y desestabiliza el sistema.
- Requiere de más de dos acciones de control aplicadas de manera simultánea.

El conjunto de operaciones anormales se describe a continuación:

- ◇ Arranque
- ◇ Paro
- ◇ Caída repentina de la costra o rompimiento del anillo (avalanchas de material).
Ocurre cuando el material sin calcinar avanza sobre la zona de calcinación, debido a una sobrecarga por la caída de costra o rompimiento del anillo o labio. El síntoma de este fenómeno es una caída rápida del amperaje, además de la existencia de material polvoso en la carátula del horno. La definición como una operación anormal dependerá de la severidad del problema.
- ◇ Piedras de clínker en la zona de quemado (cascado).
- ◇ Rápida formación del anillo.
- ◇ Alta temperatura en la zona de la cámara de gases (taponamiento).
- ◇ Uso de combustible gaseoso.
- ◇ Pérdidas de alimentación de crudo.
- ◇ Falla de equipos (eléctrica o mecánica) que altere de manera directa la operación del horno.
- ◇ Taponamiento de la sonda del VTI.

Reglas de Condiciones Anormales:

1. Si el motor del VTI está parado
Y la válvula de combustible auxiliar está cerrada
Y el flujo de combustible principal es menor que 1000
Entonces: Velocidad rotación horno = 0.5
Posición persianas VTI = 0

2. Si el ventilador de Aire primario está parado.
Y la válvula de combustible auxiliar está abierta
Entonces: Enviar aviso de cerrar la válvula de combustible auxiliar.

3. Si el ventilador de Aire primario está parado
Y la válvula de combustible auxiliar está cerrada.
Y el flujo de combustible principal es menor que 1000
Entonces: Posición de persianas VTI = 0
Alimentación de crudo = 0
Velocidad de rotación del horno = 0.5

4. Si la velocidad de rotación del horno es menor que 1
Y el amperaje del motor principal es menor que 30.
Y la válvula de combustible auxiliar abierta
Entonces: Enviar aviso de cerrar la válvula de combustible auxiliar
Reducir combustible principal a 900.

5. Si la velocidad de rotación del horno es menor que 1
Y el amperaje del motor principal es menor que 30
Y la válvula de combustible auxiliar cerrada.
Y el flujo de combustible principal es menor que 1000.
Entonces: Posición persianas VTI = 0
Alimentación crudo = 0

6. Si la alimentación de crudo es menor que 50
Y la válvula de combustible auxiliar está abierta.
Entonces: Cerrar válvulas de combustible auxiliar.
Reducir combustible principal a 900.

7. Si la alimentación de crudo es menor que 50
Y la válvula de combustible auxiliar está cerrada
Y el flujo de combustible principal es menor que 1000.
Entonces: Posición de persianas VTI = 0
Velocidad rotación del horno = 0.5

8. Si el motor de la rastra está parado
Entonces: Enviar aviso al operador.

9. Si el motor del quebrador está parado
Entonces: Enviar aviso al operador.

10. Si el motor del enfriador está parado
Entonces: Enviar aviso al operador.

11. Si el ventilador 1er. Compartimiento está parado.
Entonces: Presión 2do. compartimiento = 50
Enviar aviso al operador.

12. Si el ventilador 2do. compartimiento está parado.
Entonces: Presión 2do. compartimiento = 50
Enviar aviso al operador.

13. Si el ventilado del 3er. compartimiento está parado.
Entonces: Enviar aviso al operador.

14. Si la presión 2do. compartimiento es mayor que 260
Y la presión 2do compartimiento es menor que 280
Y la velocidad del enfriador es mayor que 23
Entonces: Alimentación de crudo = 50
Velocidad rotación horno = 1.7
15. Si la presión 2do. compartimiento es mayor que 280
Entonces: Enviar aviso al operador.
16. Si la presión cámara de gases es mayor que 80
Entonces: Enviar aviso al operador.
17. Si la temperatura cámara de gases es mayor que 1000
Y la presión VTI es mayor que 700
Entonces: Enviar aviso al operador.
18. Si el CO VTI es mayor que 0.3
Y posición persianas VTI es mayor que 75
Y posición persianas VTI es menor que 85
Entonces: Posición persianas VTI = 90.
19. Si el CO VTI es mayor que 0.3
Y posición persianas VTI es mayor que 85
Y posición persianas VTI es menor que 95
Entonces: Posición persianas VTI = 100.
20. Si el CO VTI es mayor que 0.3
Y posición persianas VTI es mayor que 95
Entonces: Enviar aviso al operador.

21. Si el flujo de combustible principal es menor que 2650
Entonces: Enviar aviso al operador.

22. Si la alimentación de crudo es menor que 50
Entonces: Enviar aviso al operador.

23. Si la velocidad rotación horno es menor que 1.6
Entonces: Enviar aviso al operador.

24. Si la posición persianas VTI es menor que 65
Entonces: Enviar aviso al operador.

25. Si el NO_x VTI es menor que 150
Y el amperaje es menor que 80
Entonces: Enviar aviso al operador.

26. Si el NO_x VTI es menor que 30
Y el CO VTI es menor que 0.05
Y el O₂ VTI es mayor que 9
Entonces: Enviar aviso al operador.

27. Si la temperatura salida precalentadores es menor que 290
Y la temperatura cámara de gases es menor que 750
Entonces: Enviar aviso al operador.

28. Si la temperatura salida precalentador es mayor que 400
Y la temperatura cámara de gases es mayor que 1050
Entonces: Enviar aviso al operador.

4. 3. 3 APLICACIÓN EN PLANTAS DE CEMENTO

Lo anteriormente expuesto tiene clara aplicación en plantas de cemento. En estas plantas el control convencional es a menudo inadecuado para la conducción del proceso, por los siguientes motivos:

- Se suelen producir grandes variaciones en el tipo de los materiales tratados, lo que dificulta la estabilización.
- Los objetivos operacionales diseñados para el sistema requieren a menudo estrategias de control contradictorias.
- Resultados cambiantes dependiendo del operador en planta.
- Dificultades para determinar desviaciones en el desarrollo del proceso, debidas a las grandes constantes de tiempo y la falta de posibilidades de mediciones precisas.

En las plantas que cuentan con este tipo de controladores, se han observado las siguientes ventajas:

1. El consumo estándar de combustible se reduce substancialmente.
2. Las producciones de clínker pueden ser incrementadas por encima de las habituales con una reducción del consumo estándar de combustible.
3. La calidad del producto se mejora significativamente y se reduce la molturabilidad del clínker.
4. Los costos de trituración se reducen con la calidad mejorada del producto y reducen la molturabilidad.
5. Los parámetros de procesos clave se controlan más estrechamente (p. ej. NO_x , O_2 , combustible, cal libre).
6. Los niveles de NO_x de salida del horno se reducen significativamente.
7. Los problemas de efectos de las alteraciones del proceso son minimizados.
8. Se reducen las temperaturas punta del revestimiento y las tensiones térmicas.
9. Aumenta la vida del revestimiento.
10. Los tiempos de trabajo del horno son mejorados.
11. Se posibilita enormemente un conocimiento específico del horno en lo referente al proceso y a la dinámica del mismo.

12. Se pueden desarrollar prácticas mejoradas de trabajo.
- 13.- El control lógico difuso permite una visión consistente al controlador y elimina las variaciones normales de turnos.
14. La carga de trabajo usual de los operadores es reducida.
15. El sistema ofrece una gran colección de datos de gestión.
16. El control lógico difuso abre una oportunidad para la dirección de gestionar mejor el proceso y su operación [26].

En una planta de cemento, un sistema típico de control basado en lógica difusa contiene de 100 a 200 reglas, dependiendo del tipo de horno. Estas reglas están ordenadas en grupos de diferentes prioridades, ya que a menudo las acciones a tomar son contradictorias según las estrategias de control consideradas [5].

Al estar estos sistemas implementados en una computadora, el operador puede seguir e interpretar las acciones del sistema de control fácilmente a través de los monitores del proceso.

Los valores se toman a través de la instrumentación del horno, o bien de la posible red de PLC's del control general. Algunas medidas pueden introducirse directamente por el operador, tales como la estimación de la calidad, posicionamiento de la llama en el horno, peso del litro, etc.

Sistemas de este tipo están ya instalados para control del horno, control del enfriador, arranque del horno y molienda de cemento.

Se abren así nuevas posibilidades para un funcionamiento más estable y automatizado de las plantas de cemento, aprovechando y mejorando continuamente la experiencia de cada caso particular mediante la adaptación de sistemas expertos.

CAPÍTULO 5

AUTOMATIZACIÓN DEL LABORATORIO MEDIANTE ROBÓTICA

5.1 EL CONCEPTO DE ROBÓTICA VERSUS EQUIPOS AUTOMATIZADOS

Se empezó a utilizar robots en operaciones de laboratorio a mediados de los años ochenta. Típicamente, el equipo implicado era mucho más pequeño que el equipo utilizado en la preparación de muestras de cementos; no obstante, la problemática sobre la elección de tecnología para automatizar operaciones de laboratorio es similar.

En las figuras 5.1 y 5.2 pueden verse los criterios de selección de tecnología. Automatizar laboratorios siempre es caro y antes, cuando no se disponía de robots, sólo se consideraba una automatización para preparación y análisis de grandes cantidades de muestras o para procedimientos que implicaban riesgos o molestias para el personal de laboratorio. La flexibilidad y consistencia introducida por la robótica han traído consigo la necesidad de considerar la automatización de una gama de procedimientos de laboratorio más amplia.

En lo que se refiere a laboratorios de fábricas de cemento, se ha podido disponer en el mercado de equipos para automatizar la preparación de muestras de polvo de XRF/XRD desde mediados de los años setenta. Sin embargo, éstos son mucho más caros que los tradicionales equipos manuales.

Es posible automatizar equipos para otras técnicas, como por ejemplo: preparación de perlas fundidas, alimentación de muestras a granulómetros, etc. De hecho ha sido realizado, pero es muy costoso ya que cada sistema requiere de un equipo especialmente diseñado. Pequeños ajustes hechos a la medida para cada fábrica individual serían imposibles en la práctica por el coste que esto implicaría.

Hay que destacar que la configuración diseñada utiliza el robot como una unidad flexible que se puede volver a programar. Este podrá usarse casi sin dificultad para tareas adicionales o podrá re-programarse de acuerdo con la mejora del equipo o cambios de procedimiento.

Muchos proyectos de automatización de laboratorio en que se emplea robótica incorporan al robot como un dispositivo especializado que, una vez instalada la aplicación especial, no podrá utilizarse para otras tareas.

En la figura 5.3 pueden apreciarse las ventajas e inconvenientes de la automatización mediante robótica. Es evidente que algunos de los beneficios también son aplicables a sistemas de equipos automatizados [24].

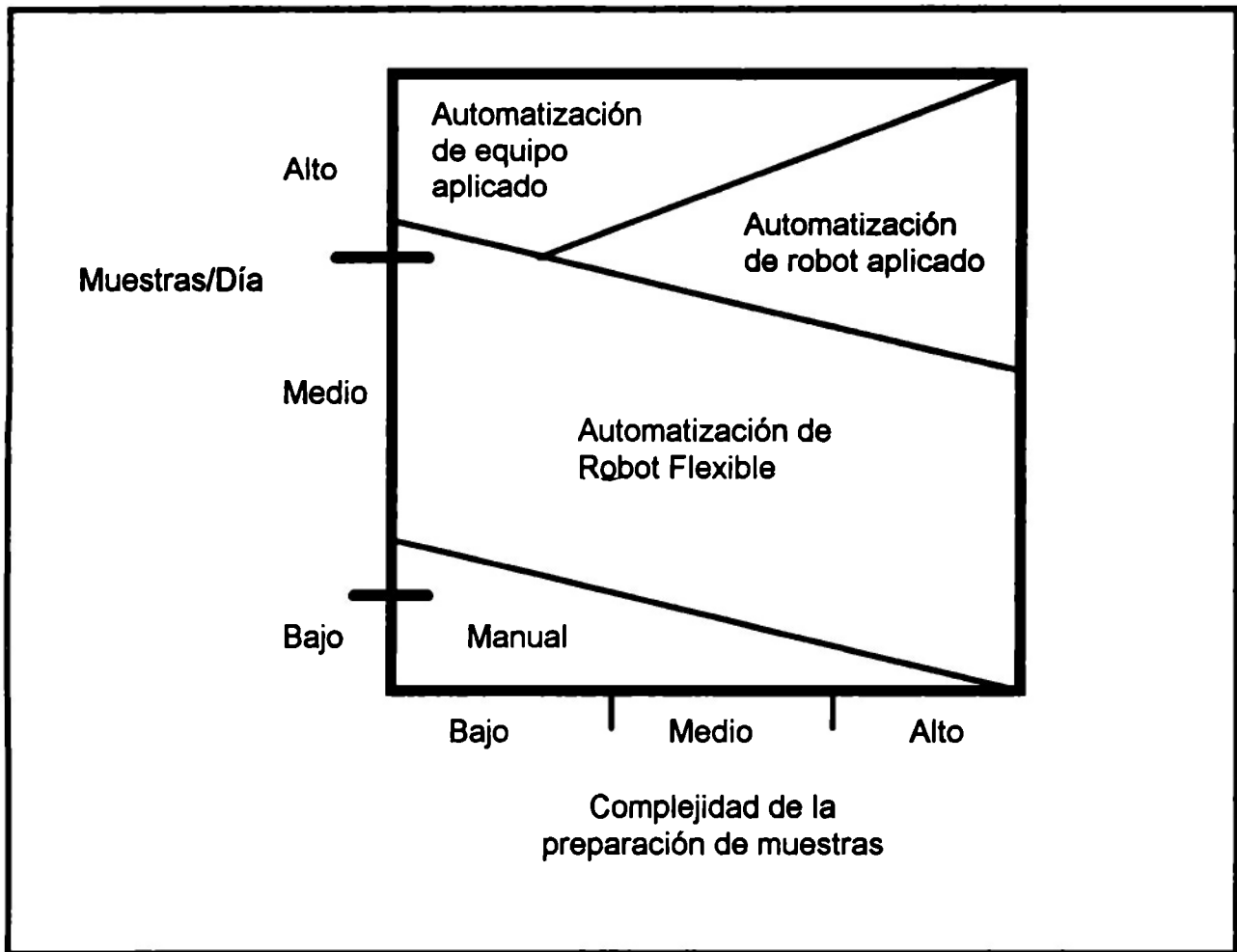


Figura 5.1

	Robot	Equipo Automatizado
Rapidez	Alta	Alta
Capacidad	Alta	Muy alta
Flexibilidad	Alta	Baja
Adaptabilidad	Muy Alta	Baja
Dependencia del Suministrador	Baja	Muy Alta
Dependencia de respaldo de operación manual.	Baja	Alta
Seguridad	Definición por parte del usuario	Alta.

Figura 5.2

Ventajas:

- Alta capacidad
Alta velocidad
24 hrs.
No hora de lunch, ni hora del amigo, etc.
No lunes en las nubes.
- Exactitud de análisis mejorado.
Todas la muestras tratadas idénticamente
Ningún error por falla del operador.
Resultados rápidamente disponibles.
- Los procedimientos de trabajo los hace superfluos.
Reducción del personal del laboratorio.
El personal se despliega a tareas calificadas.
Se toma tiempo para condiciones anormales.
- Utilización óptima de preparación y equipo analítico.
- Operación manual.

Desventajas

- Requiere de supervisión y mantenimiento calificado.
- Ciego, mudo y estúpido.
Se desempeña exactamente como se programa.
Ninguna conciencia de consecuencias sobre posibles errores.

Figura 5.3

Se describen a continuación dos sistemas de automatización de laboratorios uno del grupo F.L. Smidth & Co. que lleva por nombre FLS-QCX/Robolab y el del grupo Polysius que lleva el nombre de POLAB. Los dos sistemas convergen al mismo punto: Automatizar un laboratorio de Control de Calidad.

A continuación se describe el sistema Robolab.

5.2 ROBOLAB

Existe cada vez un mayor número de fábricas de cemento que muestran su interés en la automatización de los trabajos rutinarios de laboratorio, es decir: análisis de materias primas, harina cruda, harina alimentada al horno y cemento, clínker, de forma que se pueda prescindir, prácticamente, de personal en los turnos nocturnos y

durante los fines de semana. El motivo de ello está no sólo es un ahorro de los gastos en recursos humanos, sino también en la necesidad de obtener resultados de análisis fiables y consistentes a cualquier hora y de incrementar la capacidad de análisis.

Teniendo esto en cuenta, F.L.Smith & Co. ha desarrollado un concepto totalmente nuevo de automatización de laboratorio, basado en la aplicación de un robot industrial. FLS-QCX/Robolab constituye un módulo nuevo dentro de los módulos opcionales y adicionales para el sistema FLS-QCX: Quality control by Computer and X-Ray Spectrometer (Control de calidad por computadora y espectrómetro de rayos X)

5. 2. 1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El sistema FLS-QCX se utiliza para la supervisión y control de los parámetros de calidad química en las distintas etapas de procesamiento en la industria de cemento y otras industrias afines. Se ha desarrollado el sistema poniendo énfasis en un análisis de muestras rutinarias de la producción en proceso que sea fiable y rápido, y que se pueda hacer las 24 horas del día. Junto con las mediciones de proceso relacionadas, los resultados de análisis se usan para control de calidad e informes.

5. 2. 2 ESTRUCTURA DEL SISTEMA

La estructura del sistema QCX incorpora un sistema de ordenador conectado a una variedad de equipos de proceso de entrada y salida (PLC's), instrumentos de análisis y terminales de operador. La arquitectura del sistema es modular, lo cual permite tanto la configuración básica para control de calidad de mezcla cruda basada en XRF como disponer de un sistema completo automatizado de calidad química e información a laboratorio.

Podrán conectarse como máximo 16 instrumentos distintos de análisis (XRF, XRD, analizadores de tamaño de partículas, analizadores de absorción atómica, analizadores de CO₂ y SO₃, analizadores de superficie, etc.). En principio no hay ningún límite para el número de terminales de operador, aunque la capacidad del ordenador pondrá un límite práctico. Cada terminal de operador podrá configurarse exactamente con las aplicaciones requeridas por la política de dirección y la localización física del terminal.

El sistema se suministra como un paquete completo listo para usar que no requiere programación por el usuario. Solamente es preciso definir los datos específicos de funcionamiento de la fábrica.

Debido a la estructura modular es posible mejorar posteriormente el sistema mediante la adición de uno o más módulos opcionales.

Esta modificación pasará siempre a través de FLS pero podrá implementarse en fábrica durante una corta parada del sistema.

El sistema comprende unas extensas facilidades de información, basadas en un procesamiento seleccionado de datos y un estándar de informe. Para necesidades individuales de información específicas de la fábrica, la estructura permite la transferencia de datos a otras computadoras, PC's o redes.

El sistema QCX es un módulo de automatización del sistema de control total de fábrica denominado FLS-ACE y podrá integrarse plenamente con el sistema FLS-SDR (o sea, Supervisión, Diálogo, Reporte y funciones automáticas de control) en cualquier combinación de módulos disponibles tanto para el sistema QCX como para el sistema SDR (Fig. 5.4).

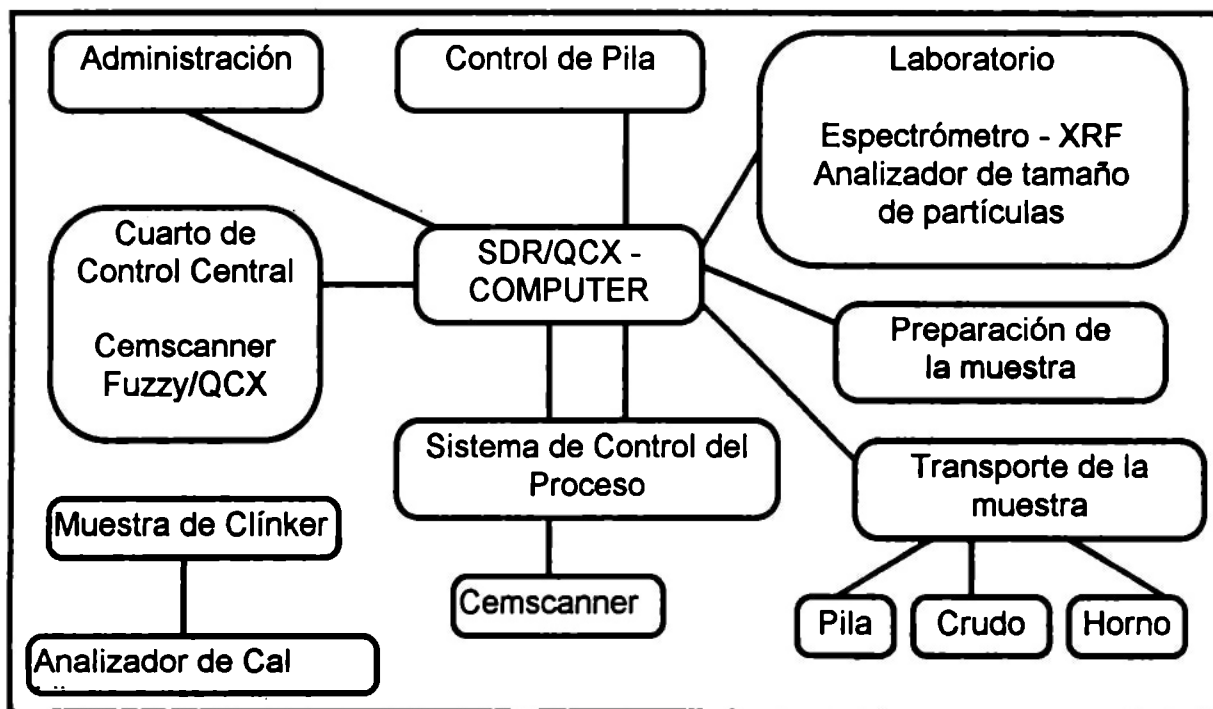


Figura 5.4

5. 2. 3 DESCRIPCIÓN

El equipo básico QCX/ROBOLAB comprende:

- Robot industrial
- PLC para control de robot y equipo manejado por el robot.
- Equipo de preparación de muestra de acuerdo con la configuración específica de la fábrica, incluyendo adaptaciones especiales para manejo por robot.

Las funciones principales del módulo QCX/ROBOLAB son las siguientes:

- Preparación totalmente automatizada mediante el uso de un robot industrial y equipo convencional de preparación manual o semiautomático.
- Transporte totalmente automatizado de muestras hasta y desde los instrumentos de análisis, como por ejemplo espectrómetros XRF/XRD, analizadores de tamaño de partículas mediante láser, etc.
- Alta flexibilidad en cuanto a la cantidad y el tipo de equipos manejados por el robot.
- Alta capacidad. El rendimiento típico es de 10 muestras por hora o más, según la configuración del sistema.
- Tiene un Back-up manual incorporado, puesto que todos los equipos manejados por el robot también podrán manejarse por un ordenador humano.
- Estructura modular que facilita la incorporación de nuevos equipos. Esto permite la automatización paso a paso de la preparación de muestras y/o un mejoramiento continuo del equipo para asegurar la aplicación de la tecnología más reciente de preparación y análisis [24].

5. 3 POLAB

Las crecientes exigencias impuestas a la calidad del producto, las unidades de producción cada vez mayores y la elevada presión de costos hacen que los sistemas modernos de automatización se conviertan en un elemento irrenunciable para cualquier fábrica de cemento. Los sectores de la automatización "Afianzamiento de la Calidad" y "Conducción del Proceso" son temas centrales en cualquier plan de inversión y deben ser estudiados en estrecha vinculación con la técnica de proceso y la maquinaria.

En el proceso de producción de cemento se ha hecho imprescindible llegar a detectar rápidamente las influencias de los materiales, por ejemplo, en el crudo, en el clínker, en el cemento y en sus aditivos, a fin de controlar la calidad con exactitud y seguridad.

Este objetivo del control de calidad, sin el cual no cabe pensar hoy en día en un afianzamiento de la misma, indujo a Dyckerhoff la implantación con POLYSIUS del sistema POLAB.

5. 3. 1 PROTECCIÓN DE LA CALIDAD

La cada vez mayor competencia y el número creciente de productos finales en la industria básica requieren de un control continuado y una constante mejora de la calidad de los productos, para asegurar la competitividad. El laboratorio asume en este contexto la responsabilidad de mantener las normas y de garantizar la calidad del producto dentro de unas tolerancias muy estrechas. Ello requiere de un control constante de los productos iniciales, de los intermedios y de los finales, interviniendo directa y automáticamente con mecanismos de regulación y mando en el desarrollo del proceso.

El sistema ha de ser flexible y debe haber probado su eficacia en el servicio diario. Han de realizarse de forma rentable y fiable los siguientes cometidos:

- La toma de muestras representativas de los más variados flujos de material;
- El rápido transporte de las muestras de laboratorio;
- La preparación individual de las muestras;

- Una técnica de análisis en sintonía con la producción;
- Mecanismos fiables de mando y regulación para asegurar y controlar la calidad;
- Control y documentación de la calidad a largo plazo, mediante sistemas de información de gestión al laboratorio.

Los componentes para la preparación de muestras con técnica robótica estructurados de forma modular, que se presentan a continuación, están siendo utilizados desde hace cinco años y han probado su eficacia en muchas aplicaciones prácticas.

5. 3. 2 CRITERIOS PARA LA UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA ROBÓTICA EN LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS

En el laboratorio central han de manipularse durante la preparación de las muestras pesos relativamente pequeños y reducidos volúmenes, de forma muy precisa, con movimientos rápidos y seguros sobre recorridos breves de transporte. De especial importancia son, en este contexto, una gran exactitud de posicionamiento y agarre, con buena reproductibilidad a largo plazo.

La protección personal debe quedar garantizada, cumpliendo para ello las normas DIN y VDI.

En consonancia con la cantidad de muestras y con la técnica de análisis necesaria en el proceso de producción, han de poder realizarse de forma relativamente simple ampliaciones del sistema. Un Software ergonómico ha de garantizar el necesario intercambio de información entre el usuario y el sistema. El laborante ha de poder ajustar los procesos de preparación de muestras en cualquier momento con ayuda de simples diálogos de pantalla a las circunstancias cambiantes.

El mini-robot elegido dispone de un Software inteligente y tiene una gran disponibilidad. Está montado conjuntamente con los equipos de preparación de muestras en carcazas normalizadas.

Como consecuencia de los cortos recorridos de transporte, se obtienen con esta disposición rápidos movimientos de maniobra y una gran cantidad de muestras preparadas. Frente a una solución con transportes puramente mecánicos, el robot

permite ahorros en componentes y reduce el mantenimiento. Además, el amplio radio de acción del brazo del robot permite, dentro del armario, poder adaptarse rápidamente a nuevos desarrollos en el proceso y utilizar nuevos grupos constructivos para la preparación de muestras. Los trabajos de limpieza y mantenimiento se hacen con el equipo en marcha, no habiendo de interrumpirse la misma para su realización. La técnica presentada garantiza, por tanto, el libre acceso de personas a la sala de preparación de muestras en cualquier momento.

5. 3. 3 SOLUCIONES INDIVIDUALES GRACIAS A LA TÉCNICA MODULAR POLAB

En función de la cantidad de muestras, del grado de automatización deseado para el proceso de producción y del tipo de preparación y análisis necesarios, se configuran para cada caso individual los módulos necesarios con elementos acreditados integrando mini-robots. Con esta forma constructiva flexible, que dispone de una técnica muy avanzada de sistemas, pueden realizarse ampliaciones, pasando por automatizaciones de tipo medio hasta muy complejos.

La figura 5.5 muestra un ejemplo de configuración de un módulo básico para preparar hasta 10 muestras por hora. Este módulo lleva a cabo principalmente las siguientes tareas:

- Entrada de hasta 34 muestras manuales (1);
- Manipulación de los cartuchos con muestras tomadas automáticamente en el proceso (2);
- Dosificación gravimétrica de partes de muestras para los procesos individuales de preparación y análisis (3);
- La molienda fina en diferentes etapas de proceso, adaptadas al posterior análisis (p.ej. muestra principal y previa) (5);
- El prensado del material de la muestra (6);
- La reserva de muestras parciales dosificadas para ensayos físicos (7);
- LA CALORIMETRÍA (8);
- El granulómetro Láser (9).

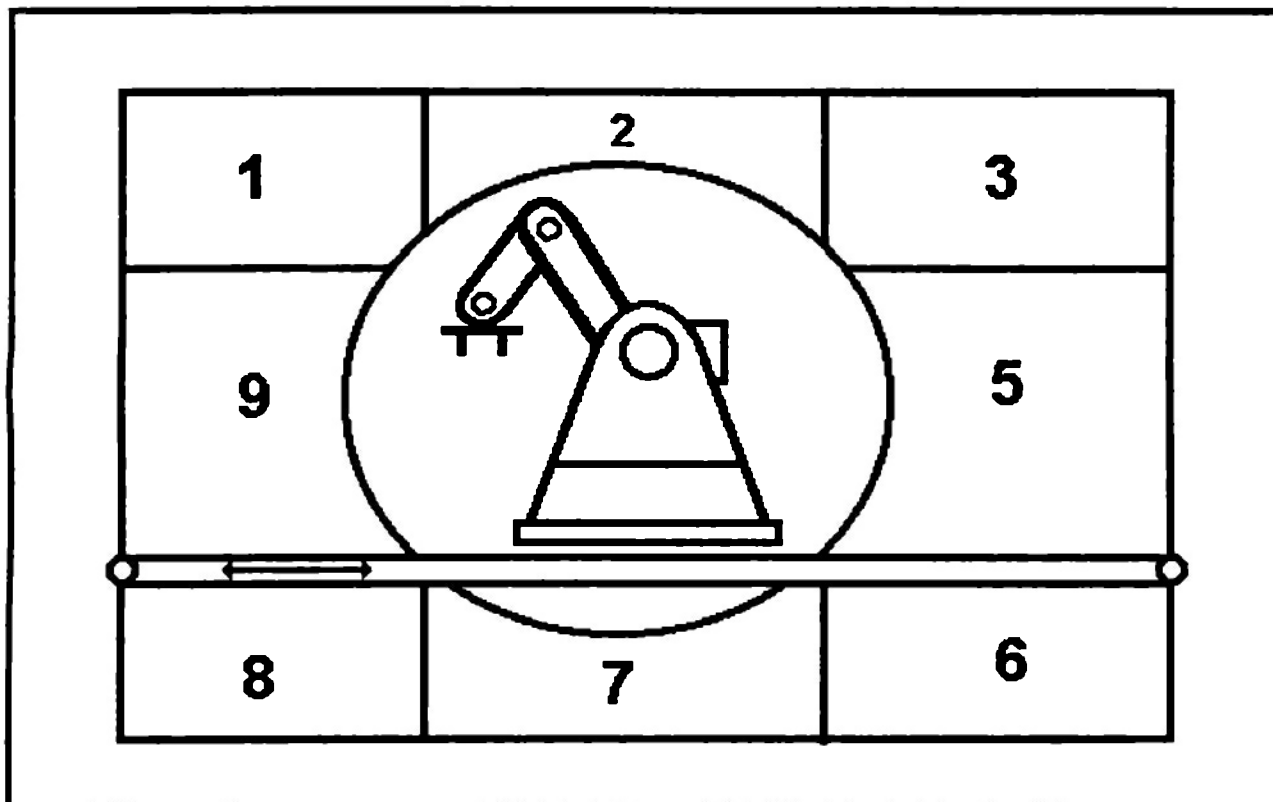


Figura 5.5

5. 3. 4 VALORACIÓN DEL RESULTADO

El sistema técnico suministrado por Polysius viene caracterizado, por un lado, por un alto volumen de muestras preparadas con una buena disponibilidad del sistema y, por el otro, por muy buenos valores de reproducibilidad en la manipulación de un amplio abanico de muestras. En la figura 5.6 se representan los valores alcanzados de reproducibilidad para 20 muestras de clínker (resultados de una instalación realizada). El buen resultado se alcanza, entre otras, por las siguientes peculiaridades constructivas:

- La molienda se realiza con una temperatura constante del recipiente del molino;
- La muestra de material es molida muy finamente con ayuda de coadyuvantes especiales de molienda;
- Una gran cantidad de ciclos de limpieza evitan la contaminación de las muestras.

	F.S.C.	MÓDULO Si	MÓDULO Al	CaO LIBRE
VALOR MEDIO	100.18	2.57	1.599	1.79
DESVIACIÓN STANDARD	0.12	0.01	0.00640	0.05

Figura 9. Valores alcanzables del sistema automático de preparación de muestras.

Los sistemas POLAB para la automatización de laboratorios y POLCID para el control del proceso han demostrado su utilidad a escala mundial, tanto en la transformación de fábricas existentes como en la instalación de nuevas. La estructura abierta de los sistemas permite el intercambio de datos con computadoras existentes. La estructura modular abierta hace que el usuario pueda adaptarse a los nuevos desarrollos técnicos y permite ampliaciones a posteriori [25].

5. 4 CONCLUSIÓN

Está fuera de toda duda la creciente importancia de la automatización y control de las instalaciones industriales. En los países industrializados la automatización y control es un medio de empujar el rendimiento en su sentido más amplio; en los países punteros la automatización de las instalaciones es una condición indispensable para el buen resultado de la explotación de cualquier industria.

Ello ha traído consigo un aumento de la capacidad de rendimiento y una mayor fiabilidad en los componentes de la automatización, consiguiéndose al mismo tiempo, debido al aumento de la producción, una reducción en los costos de fabricación.

Todos los productores de cemento invierten hoy, sin restricciones, en equipo avanzado de control y no hay lugar a duda que estos financiamientos son rentables si

el comprador del equipo cuenta con los medios necesarios para su mantenimiento. Evidentemente, las ventajas radican en reducción de personal y del riesgo de que se originen averías de máquinas, en incremento del factor de marcha y en mejora de la calidad del producto.

El desarrollo más reciente, en lo que respecta al control químico, va encaminado hacia el uso de computadoras y autómatas industriales para el control de análisis de materias primas mediante fluorescencia de rayos X, determinación de la cal libre por análisis de difracción de rayos X y análisis de granulometría por difracción láser.

Los valores de análisis controlan directamente la alimentación al molino de crudo y los análisis de cal libre y la determinación de la finura ingresan junto con otros parámetros de proceso directamente medidos en el Control Lógico Difuso del Horno, del enfriador y de los molinos. El concepto de la Lógica Difusa ha demostrado ser el modo más apropiado para programar una computadora a fin de que imite lo que el operador más diestro de la fábrica ejecuta.

Como conclusión, se podría mencionar el cambio que ha supuesto pasar de un sistema tradicional a esta nueva concepción de control.

Un sistema tradicional de control realiza normalmente la optimización a través de variables o parámetros medibles directamente, como puedan ser la producción o consumos energéticos. A su vez, trata de mantener la regularidad y estabilidad del sistema, traduciéndose en una mejora de la calidad.

La nueva concepción del control por calidad se basa en diseñar los modelos que permitan consignar aspectos de la calidad del producto.

De esta forma, el sistema de control, además de realizar acciones correctivas para alcanzar consignas de variables medidas, puede efectuar correcciones para conseguir las consignas de calidad.

La mejora de la calidad no sólo se producirá como consecuencia de una mayor regularidad y estabilidad del proceso sino como producto de acciones directas del sistema de control.

CONCLUSIONES

La estructura que presentará la fábrica de cemento del futuro dependerá en grado significativo de los requerimientos estipulados por los productores de cemento, y será entonces cuestión de los proveedores de equipo el idear nuevos procesos y nuevos sistemas aptos para cumplir con dichas demandas.

Ahora bien, si consideramos que el principal objetivo de todo empresario es la cuestión económica nos encontramos dentro del ramo cementero un conjunto de objetivos que tienden a satisfacer esta prioridad. Estos objetivos podemos resumirlos de la siguiente manera:

- 1) Disminución de elevadas inversiones financieras en maquinaria y equipo.
- 2) Reducción de costos en personal, energía y existencias de material a lo largo del proceso.
- 3) Costos de mantenimiento más bajos, repartida en:
 - consumo de piezas de repuestos
 - consumo de mano de obra.
- 4) Producto de mejor calidad, donde la calidad del producto es un parámetro de competencia.

Estos objetivos plantean al productor de cemento la necesidad de dar solución a un grupo de exigencias específicas, como son:

- Cumplimiento a nuevas exigencias ambientales.
- Necesidad de interrelación de las diferentes áreas de producción.
- Transparencia total de los datos manejados por laboratorio, producción y ventas.
- Minimización de tiempos de parada por incidencias.
- Alta calidad del producto final.

El análisis de estas exigencias conllevan a la necesidad de introducir dentro de la empresa cementera el concepto de automatización integral, siendo notable la tendencia actual, a la automatización del proceso productivo, como respuesta a la necesidad de sustituir las antiguas e ineficientes instalaciones de control que, todavía hoy, siguen funcionando en muchas plantas por soluciones modernas que ofrecen fundamentalmente la posibilidad de tener una instalación más fiable y más segura en beneficio de la producción.

Estas soluciones están basadas en equipos tecnológicamente muy avanzados que, si bien son notablemente más complejos que los sistemas tradicionales en su constitución interna, son, por otra parte, más sencillos desde el punto de vista de su operación y su mantenimiento, requiriendo generalmente menos personal en fábrica dedicado a estas actividades.

La introducción de los microprocesadores en el mundo industrial y su gran variedad de aplicaciones ha supuesto una verdadera revolución en el diseño de los sistemas de control. Los antiguos y voluminosos paneles de relees de lógica cableada, los reguladores analógicos independientes con sus incómodos ajustes, y los numerosos indicadores y paneles de instrumentos de la sala de control con su gran demanda de espacio y de cables, van dejando paso progresivamente a los sistemas estáticos basados en microprocesador, más fiables, más sencillos de instalar, y netamente superiores en cuanto al tipo de facilidades que ofrecen al usuario.

Los modernos proyectos de automatización de los procesos de fabricación del cemento incluyen sistemas con funciones de control y funciones de supervisión. Estos sistemas están constituidos por equipos modulares y programables, que permiten ampliaciones y modificaciones, incluso con la instalación en marcha.

Pantallas de video en color y teclados de muy fácil manejo aparecen ahora en las modernas salas de control, donde un solo operador tiene concentrada ante él más información del proceso de la que antes se extendía por grandes paneles y sinópticos a lo largo de la sala. Este hecho es de vital importancia si se pretende que el operador

detecte y corrija cualquier anomalía que se presente en el proceso en el menor tiempo posible.

Este avance tecnológico ha permitido asimismo desarrollar funciones de comunicación entre sistemas de la misma familia, apareciendo de este modo el nuevo concepto de control distribuido. Grandes cantidades de datos y órdenes fluyen a través de largas distancias y a grandes velocidades utilizando como medio un solo cable coaxial que enlaza los diferentes equipos entre sí a forma de red.

En definitiva, todo un mundo de nuevas posibilidades se encuentra ya abierto a todos aquellos fabricantes que han decidido a seguir el camino de la modernización de sus instalaciones como medio de hacer frente al reto de un mercado cada día más exigente.

En este trabajo se ha intentado caracterizar los principios básicos de la lógica difusa y mediante ejemplos se ilustra como la lógica difusa de una manera directa y pragmática hace posible aplicar la herencia operacional práctica en el control automatizado.

El propósito de coordinar las estrategias de control lógico está en asegurar el proceso de operación obteniéndose resultados en el equipo un largo tiempo de vida, mejorado producto de calidad, y economía operacional en general. La experiencia pasada en la aplicación de la lógica difusa en procesos industriales nos conduce para concluir que la lógica difusa hace una contribución valiosa en lograr este fin. Es la alternativa realista y factible a medios tradicionales de estrategias de automatización con base en modelos matemáticos. Estos modelos tienden a llegar a ser tan simples que ellos son irreales o tan complejos que llegan a ser impracticables.

Nuestra experiencia se basa principalmente sobre la automatización de un horno de cemento. Sin embargo los principios de control difuso pueden aplicarse en general, y se considera la posibilidad de la introducción de la lógica difusa en la coordinación de controles individuales en otros procesos en la fabricación de cemento.

JFPHH

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L.A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process", IEEE Trans. Syst Man Cybern, Vol. smc-3, pp 28-44, 1973
- [2] Unidad de Desarrollo Cemex, "Programa Institucional de Inducción", Módulo 1, Inducción a Cemex, pp 4C04, 1991
- [3] G. Folgmann, "Automoción y Control Industrial", Revista Hormigón-Cemento, Agosto 1982, No. 585, pp 661-670
- [4] José Estrada Aguilar, "Ponencia sobre Automatización", Revista Hormigón-Cemento, Enero 1992, No 702, pp 48-55
- [5] Javier Gutiérrez Chamorro, "Sistemas Expertos Basados en Lógica Difusa", Revista Hormigón-Cemento, Abril 1992, No. 705, pp 522-528
- [6] Kevin Self, "Designing with Fuzzy Logic", IEEE Spectrum, Nov. 1990, No 105, pp 42-44
- [7] Nick Infelise, "A Clear Vision Of Fuzzy Logic". Control Engineering, July 1991.
- [8] Daniel G. Schwartz, George Klir, "Fuzzy Logic Flowers in Japan", IEEE Spectrum, pp. 32-35, July 1992.
- [9] Centro de Capacitación y Adiestramiento, Planta Atotonilco "Curso De Tecnología del Cemento", Enero 1991, pp 149-195, 245-292.
- [10] Torben Enkegaard, "La Fabrica de Cemento del Futuro", Revista Hormigón-Cemento, Marzo 1992, No. 704, pp 307-337.
- [11] Waltisberg, "La Medición Continua de NO_x", Holderbank News 10(1985) pp 11-17
- [12] Waltisberg, "Modelo Cinético-Químico de Reducción Térmica Selectiva, no Catalítica de Óxidos de Nitrógeno (Sistema SNCR)", Holderbank News 3(1989), pp 19-24
- [13] Waltisberg, "Ensayos de Fábrica sobre la Influencia de las Condiciones de las Llamas en la Formación de Óxidos Nítricos en el Horno Rotatorio de Cemento" , Holderbank News 12(1984), pp 21-25.
- [14] Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part Y", IEEE Trans. Syst. Man Cybern, Vol.20, No. 1, pp 419-435, Mar./Apr. 1990.
- [15] Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part Y", IEEE Trans. Syst. Man Cybern, Vol.20, No. 2, pp 419-435, Mar./Apr. 1990.

- [16] C. Rosa, E.A. Gutiérrez, J.R. Alique, "Microcomputer Based Servomotor Controller Applying Direct and Self Organizing Fuzzy Algorithms", Instituto de Automática Industrial, Madrid, España.
- [17] Adam L. Schwarts, "Comments on Fuzzy Logic for Control of Roll and Moment for a Flexible Wing Aircraft", Control Systems, pp 61-63, February 1992.
- [18] F. Li, C. C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Countr, Syst. Mag., Vol. 9, No. 3, pp. 65-72, 1989.
- [19] Kwok, P. Tam, C.K. Li, P. Wang, "Linguistic PID Controllers", Hon Kong Politecnic, 1990.
- [20] Baturi, V. Kasparian, "Adaptive Expert Control", Int. J. Control, 1991, Vol. 54, No. 4, pp 867- 881.
- [21] Josef Teutenberg, "Sistema de Control de Proceso Polcid" Revista Cemento-Hormigón Abril 1992, pp 477-483.
- [22] Carlos Mendoza Del Junco, "Impacto de los Sistemas de Control Computerizados" Revista Cemento-Hormigón Abril 1992
- [23] H.J.Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and its Applications", Second, Revised Edition, Kluner Academic Publishers 1991
- [24] José Ignacio Martínez Ynzenga, "Automatización de Laboratorio Mediante Robótica", Revista Hormigón-Cemento, Diciembre 1990, No. 687, pp 1377-1396
- [25] Klüsener, "Moderna Automatización para la Industria del Cemento", Revista Cemento, Revista Cemento-Hormigón, Marzo 1994, No. 730, pp 297-309.
- [26] Hapel, "Sistema Blue Circle de Control de Alto Nivel para Hornos", Revista Cemento-Hormigón, Mayo 1988, No. 654, pp 452-471
- [27] Patrick Bosc and Olivier Pivert, "An Approach for a Hierarchical Aggregation of Fuzzy Predicates" (IEEE)
- [28] Rafael Magallon, "CIM en el Cemento. Redes Locales y Buses de Automatización en Plantas Cementeras", Revista Cemento-Hormigón Abril 1992, pp 493-503.
- [29] José Amable González, "Problemática de la Automatización Industrial en Los 90's" Revista Cemento-Hormigón Abril 1992, pp 504-514.
- [30] Ismael S. Figueroa, "Mejoras Tecnológicas y Centralización de los Mandos en la Planta", Revista Cemento-Hormigón Abril 1992, pp 515-521.

- [31] Santiago González Díez , "Control SCAP para Plantas Productoras de Cemento" Revista Cemento-Hormigón Marzo De 1990 pp 236-245.
- [32] José María Santiago Puges, "Implantación de un Sistema de Control Distribuido ABB Master en las Instalaciones de Molienda de la Fábrica de Tudela-Veguín, S.A. en Aboño", Cemento-Hormigón Marzo De 1990, pp 246-252.
- [33] Uenoyama, "Sistema de Control de Calidad ((On Line)) Plenamente Automatizado en la Planta en Kamiiso de Nihon Cement", Revista Cemento-Hormigón Marzo de 1990, pp 253-272.
- [34] Kemmer, "Plant Control Options", International Cement Review May 1992, pp 53-59
- [35] Florence Osselin, "Kiln Control With The FCB Micro Process" World Cement August 1990, pp 330-333.
- [36] Dr. Gian Mario Cella, "Small Scale Limestone Calcining at Buccino" World Cement August 1990, pp 337-339.
- [37] Astorre Terruzi, "Converting Existing Vertical Lime Kilns", World Cement August 1990.
- [38] Carlos García Luna Gil, "A New Generation of Expert Kiln Control can Provide Extraordinary R.O.I. and Process Benefits" IEEE, May 1992.
- [39] Fernando Fominaya, "Modernización del Sistema de Control en Plantas de Cemento", Revista Cemento-Hormigón , 1993.
- [40] Welz, "Modernos Sistemas de Automación de Procesos para la Industria del Cemento, Revista Cemento-Hormigón, 1993.
- [41] Kobe Steel, "Sistema de Control Moderno e Ingeniería Asistida por Ordenador (Cae) de una Planta de Cemento", Revista Cemento-Hormigón, 1993.
- [42] José Ma. Santiago Puges, "La Solución del Control Distribuido en la Fabricación de Cemento", Revista Cemento-Hormigón
- [43] José Bastida Fenoy, "Adquisición de Datos y Control en Procesos Industriales. Aplicaciones. Control de Crudo en la Fabricación de Cemento" Revista Cemento-Hormigón.
- [44] Wolf-Diethard, "Sistema Pyroteol para Control del Proceso de Calcinación en Fábricas de Cemento", Revista Cemento-Hormigón.
- [45] Ray B. Bailey, "Componentes para un Control Eficaz por Ordenador de los Hornos Rotatorios", Revista Cemento-Hormigón.

- [46] Walter H. Duda, "Manual Tecnológico del Cemento", Editores Técnicos Asociados, S.A.
- [47] Taylor, "La Química de los Cementos", Enciclopedia de la Química Industrial, Volumen 1, Urmo, S.A. De Ediciones.
- [48] Michio Sugeno, "Industrial Applications of Fuzzy Control", North-Holland.
- [49] David A. White, "Handbook Of Intelligent Control", Van Nostrand Reinhold
- [50] Zeigler, "Model-Based Architecture For High Autonomy Systems"
- [51] Sanja Vranes, "Expert System Shell Flexibility: Best Case Study"
- [52] Sanz, "Intelligent Process Control: The Conex Architecture"
- [53] Gorez, "Fuzzy Internal Model Control"
- [54] Jager, "Rule-Based Controller Using Fuzzy Logic"
- [55] Piero P. Bonissone, "Fuzzy Logic Hierarchical Controller for a Recuperative Turbohaft Engine: From Mode Selection to Mode Melding"
- [56] Lotfi A. Zadeh, "If/Then Rules"
- [57] Earl Cox, "Solving Problems With Fuzzy Logic"
- [58] Mohammad Jamshidi, "Fuzzy Logic and Control", Prentice Hall
- [59] Peray, Edward Arnold, "The Rotary Cement Kiln", Second Edition.
- [60] Jens Voldbaek, "Control automático de hornos por Fuzzy Logic", Revista Cemento-Hormigón, Enero 1985, No. 614, pp 29-38.
- [61] Coromina, "La técnica Fuzzy Logic de F.L.Smidth optimiza la molienda de cemento de la fábrica de "La Auxiliar de la Construcción, S.A.", Revista Cemento-Hormigón, Junio 1989, No. 668, pp 669-672.
- [62] Klaus Gadeberg, "Puesta en marcha automática del horno por medio del control Fuzzy", Revista Cemento-Hormigón, pp 83-91.
- [63] Fernando Bescos del Castillo, "Control de las emisiones de NO_x en una planta de cemento, utilizando sistemas expertos basados en lógica difusa", Revista Cemento-Hormigón, Septiembre 1993, No. 723, pp 1042-1047.
- [64] Jens-Jørgen Østergaard, "Fuzzy II la nueva generación para control automático de alto nivel", Revista Cemento-Hormigón, No. 710, pp 1195-1201.

- [65] Carmen Edo, "Incorporación de la difracción de Rayos-X como técnica de control en continuo de parámetros de calidad en hornos y molinos de cemento", Revista Cemento-Hormigón, No. 710, pp 1202-1219.
- [66] Erik Andersen "ROBOLAB -Automatización de Laboratorios", Revista Cemento-Hormigón, Diciembre 1991, No. 701, pp 1482-1489.
- [67] Joachim Dietze, "Automatización de laboratorio en la industria del cemento. Nuevos caminos para el control de calidad del crudo", Revista Cemento-Hormigón, Octubre 1989, No. 672, pp. 987-1006.
- [68] Percy B. R. Castillo Neyra, "El control de factores operacionales durante el proceso de clinkerización", Revista Cemento-Hormigón, Abril 1985, No. 617, pp 319-335.
- [69] Sprung, "Influencia de la tecnología del proceso sobre las propiedades del cemento", Revista Cemento-Hormigón, Marzo 1986, No. 628, pp 211-232.
- [70] Jeffrey P Kemmerer, "Automating the kiln process - updates on Fuzzy Logic and shell scanners", World Cement , July 1991, pp 4-9
- [71] Ivan Bertrand, "Automatic control of kilns and mills by expert systems", World Cement, July 1991, pp 20-24.
- [72] Masanoir Tomochika, "Automation in Onada's cement plants", Onada Cement Co., Ltd, Tokyo, Japan.
- [73] Takemi Aizawa, "Control Strategy for automation in Onada's cement plants", IEEE, May 1992.
- [74] Business Week "La lógica confusa derrota el pensamiento"
- [75] Dr. José de Jesús Rodríguez Ortiz, "Desarrollo de estrategias de control fuzzy para un horno de fabricación de cemento"
- [76] Jens-Jørgen Østergaard, "Fuzzy Logic Control: Operator experience applied in automatic process control", Zement-Kalk-Gips