**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**
FACULTAD DE INGIENERIA INDUSTRIAL
UNIDAD DE POST GRADO

# El ahorro de energía en la industria cementera como estrategia de la excelencia operativa

TESIS para optar el Grado Académico de : MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

AUTOR
**Leoncio Rubén Gilvonio Alegría**
**ASESOR:** Ing. Jorge Luis Inche Mitma

**LIMA – PERÚ 2005**

**AGRADECIMIENTO**

*A mi familia que por ellos puedo ser lo que soy.*

*Al Ing. Jorge Inche por su invalorable apoyo.*

*A mis profesores y a todos aquellos que confían en mí y tienen siempre una palabra de aliento.*

# RESUMEN

En el presente trabajo se estudia las variables que permitirán lograr ahorros de energía en la fabricación de cemento, a fin de proponer una estrategia para lograr la excelencia operativa. Se analiza la problemática de los procesos productivos y de gestión en la fábrica de cemento, buscando lograr la competitividad basada en la gestión de la energía. Para ello, es necesario un diagnóstico energético en el proceso de fabricación, determinándose acciones a ejecutar sin y con inversión.

El estudio propone un modelo de gestión de la energía con ahorro económico aplicable a las diferentes operaciones de una empresa manufacturera. La aplicación del modelo se realizó en una empresa cementera, comprobándose la efectividad del mismo.

El modelo incluye las relaciones de la visión y misión de la organización con los objetivos estratégicos mostrando la importancia del enfoque global; también muestra como el objetivo del ahorro de energía contribuye a mayor competitividad y a lograr un mejor nivel de excelencia operativa.

De los resultados del estudio (Tabla 4,5), se determinaron pérdidas de calor en 1 247 GJ/día (74,46 Kcal/Kg), de electricidad 176,4 GJ/día (12,25 KWh/TM) y la pérdida global diaria de energía en 1 423 GJ. La aplicación de las propuestas

genera un ahorro económico de US$ 6 285 por día. Los ahorros de energía ejecutados reducen el costo unitario del cemento en US$ 3,29 por tonelada de cemento que representan el 10,0% del costo.

El estudio se centró en los dos procesos principales de la fabricación del cemento como son la clinkerización y la molienda del cemento, procesos que consumen el 96,35% de la energía; pudiendo ampliarse su cobertura a toda la organización, y lograrse un impacto positivo en el rendimiento de toda la organización.

# INTRODUCCIÓN

El ahorro de la energía, para las industrias de transformación como la del cemento es de vital importancia por su fuerte incidencia en los costos de fabricación que normalmente sobrepasan el 40% del costo unitario y por su incidencia en el medio ambiente al generar los gases de invernadero, en especial, el $CO_2$ por efecto de la combustión y por la descomposición de las materias primas.

La fabricación del cemento se basa en la extracción de las calizas de los yacimientos y reducirlos de tamaño hasta convertirlo en polvo, mezclándose con arcillas, óxido de fierro y mineral de sílice para que tenga una composición química definida, llamándosele harina cruda que procesado en horno rotativo a temperatura de 1 450$^oC$ se logra transformaciones mineralógicas hasta obtener el producto intermedio, el clinker. Luego pasa a la molienda conjuntamente con el yeso obteniéndose el cemento; estos procesos son los que requieren grandes cantidades de energía térmica y eléctrica. Esto hace que la fabricación de cemento, sea una actividad industrial muy intensiva en energía, en la que los costos energéticos representan una parte importante de sus costos de fabricación.

La gestión de la energía térmica y eléctrica, deben formar parte de la política de una empresa, ya que es un factor que determina la competitividad ante la agresiva competencia provocada por la globalización. Además, por la utilización de energía térmica a partir de combustibles, la empresa deberá asumir su responsabilidad social con el medio ambiente, al generar gases de invernadero.

Para que una organización enfrente favorablemente el consumo de energía, debe enfocarlo sistémicamente, incluyendo los componentes de la gestión de la energía y su interacción entre ellas.

El precio del cemento es el factor más importante en el nivel del flujo de caja que tienen las cementeras; los precios del cemento son bajos en relación a su peso, por lo que el área de influencia de cualquier planta raramente sobrepasa un radio de 300 Km., es sólo en estos límites donde existe competencia entre los productores; para el caso de la exportación del cemento, John Piecuch[1] de la Corporación Lafarge dice que los cargos por fletes han aumentado entre $3 y $5 por tonelada, debido a los mayores costos de energía. Se prevé para los años siguientes un déficit de potencia y energía eléctrica[2] en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) para el año 2013 llegaría el déficit a 9 622 Gwh.

[1] Piecuch John (2000), “A Conversation with Lafarge Corp.´s President and CEO John M. Piecuch”, Cement Ameritas Nov 2000.

[2] Campodónico H. (1998) “Las reformas energéticas y el uso eficiente de la energía en el Perú”, CEPAL, N$^{o}$ 12, Nov. 1998.

De acuerdo al Ministerio de Energía y Minas en su "Plan Referencial de Electricidad 2003-2012[3]" y "Evolución de Indicadores del Mercado Eléctrico[4]" de no realizarse nuevas obras de generación, en el año 2008 se presentaría déficit de electricidad. Consideran un crecimiento anual promedio de la demanda de 113,5 MW y 889,2 GWh.

En el proceso de fabricación para lograr las reacciones en la clinkerización es necesario llevar a la harina cruda a finezas de 28% de retenido en mallas 200 para favorecer las reacciones que se realizan a la temperatura de 1 450$^{o}$C y en el proceso de molienda del cemento, el clinker es llevado a retenidos de 1.0% en mallas 200 para facilitar sus reacciones de hidrólisis durante su utilización. Estas operaciones requieren altos consumos de energía eléctrica (varían de 28,39 a 58,25 KWh/TM). Ver Anexo V.

El calor de formación de los compuestos del clinker es de 428 Kcal/Kg de clinker y en las plantas de cemento el consumo real sobrepasa largamente las 700 Kcal/Kg de clinker teniéndose un gran potencial de ahorro de energía térmica, la diferencia es debido a las pérdidas por altas temperaturas de los gases de escape, pudiendo sobrepasar los 360$^{o}$C, una planta de cemento eficiente sus temperaturas están en el orden de las 255$^{o}$C, otra de las fuentes de oportunidad de ahorro de energía se encuentra en las pérdidas por convección y radiación del calor en el proceso de Clinkerización principalmente pérdidas a través de las superficies del horno y precalentador; en la molienda del cemento se tiene grandes consumos de energía eléctrica por la necesidad

[3] Ministerio de Energía y Minas, (2003) "Plan Referencial de Electricidad 2003-2012". Lima, Perú.

[4] Ministerio de Energía y Minas, "Evolución de Indicadores del Mercado Eléctrico, 1995-2004". Perú.

de reducir el tamaño de las partículas, el ahorro dependerá de los equipos a utilizar; siendo los molinos verticales y las prensas de rodillos más eficientes que los molinos de bolas. En la operación de las plantas de cemento se tienen fallas y paradas muchas veces repetitivas y con tiempos largos de interrupción, con una gestión apropiada se lograría ahorros de energía.

La gestión en la adquisición energética y el ahorro durante su utilización permite conseguir la máxima eficiencia en la industria. Se debe llevar a cabo un uso racional de la energía que permita reducir su consumo sin afectar la calidad del producto, la productividad y la calidad de los servicios. El ahorro de la energía y su gestión son las mejores alternativas en la industria del cemento para conseguir competitividad y excelencia operativa.

*"El analfabeto del siglo XXI no es aquel quien no sabe leer y escribir, el analfabeto es aquel que no sabe aprender, desaprender y volver a aprender"*
*Albin Toffler*

# CAPÍTULO I

# DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 EL PROBLEMA

Las empresas tienen en la actualidad un reto enorme ante la apertura de los mercados y por la reducción o eliminación de las barreras, esto significa tanto el incremento de las importaciones como la agudización de la competencia. Resultando, para las empresas de la industria cementera, una necesidad la mejora sustancial y sostenida de sus resultados operacionales para lograr un nivel de competitividad global y de excelencia operativa, lo que les permitirá resistir y crecer en un mercado ampliado o global. Actualmente la industria cementera tiende a salir lentamente de la recesión de los últimos años, en el anexo I se observan los niveles de ventas.

En la última década los mercados de cemento de América Latina se han consolidado, modernizado e integrado verticalmente; influidos por la presencia de grupos internacionales como Holcim, Lafarge y Cemex; generalmente son los que han decidido en los mercados en los cuales están presentes. Ver Anexo II sobre la participación de las empresas transnacionales en América.

Los mercados cementeros de América Latina están consolidados debido a las adquisiciones realizadas por las empresas transnacionales, con una importante capacidad de producción en el área, representan el 48% del mercado de América Latina, participación que ha venido en incremento.

En este proceso de globalización, el ingreso de competidores extranjeros constituye una amenaza para los productores locales, especialmente para los mercados relativamente cerrados como el mercado peruano, especialmente el de Lima.

Las empresas individuales o no consolidadas tienen ahora que competir tanto para mantener su posición en el mercado interno como para ganar nuevas posiciones en el mercado externo. Debiendo buscar nuevas y más eficientes técnicas y prácticas que le permitan sobrevivir y alcanzar la visión de la empresa.

Dentro de la estructura de costos en la industria cementera, la energía puede incidir en más del 40% del costo de fabricación, siendo indispensable su reducción y control. En el proceso de fabricación para la empresa base del estudio, el costo de la energía esta formada por el 72,0% de energía térmica y 28,0% de energía eléctrica.

En este contexto, la industria cementera realiza algunas acciones de ahorro de energía en forma aislada, desconociéndose algunas herramientas de la gestión de la energía que permitan la generación de ahorros económicos y tener indicadores de mejoramiento continuo. En este marco se plantea la siguiente interrogante:

***¿Es la implantación de un modelo de gestión de la energía en la industria cementera, una alternativa factible para lograr ahorros económicos en la empresa?***

## 1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia de la presente investigación en una empresa cementera radica en la propuesta de un modelo de gestión de la energía con ahorro económico, que puede extrapolarse a otras empresas manufactureras.

Además la investigación tendrá una aplicación práctica en la medida que se conozcan los detalles de cada una de las etapas del modelo de gestión, es decir, permitir al usuario identificar las fuentes de energía,

evaluarlas e inmediatamente tomar una decisión para la reducción del consumo de energía, comprobándose con el ahorro económico que ésta genera.

Finalmente, la investigación tiene una importancia para la protección del medio ambiente, pues se evalúan procesos térmicos que permiten reducir el consumo de energía y por tanto las emisiones del $CO_2$, causantes del efecto invernadero[1].

## 1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Al determinarse la cadena productiva de una empresa como una suma de las operaciones, existen muchas variables que influyen en cada etapa del proceso. En la presente investigación se analizarán las etapas críticas de alto consumo de energía presentes en las operaciones de clinkerización y molienda del cemento.

Las limitaciones que podrían encontrarse en la presente investigación estarían localizadas en la información sobre los procesos internos propios de la empresa. Las siguientes situaciones no están comprendidas en el estudio: pruebas de control y monitoreo de la energía que perturben el

[1] Gaebel R. (2000) "Empleo de combustibles sustitutos en la industria del cemento". En: Memorias de Refrakolloquium 2000. Berlín, Alemania.

proceso industrial, cambios de repuestos, mantenimiento, paradas de planta por fallas de mantenimiento, etc.

El modelo de gestión de la energía surge del diagnóstico energético en la empresa, a partir de la información recopilada se establecen indicadores confiables de mejoramiento continuo, los cuales permiten la aplicación del modelo en un periodo determinado. Este estudio podría validarse posteriormente con mediciones a través del tiempo.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo General

Proponer un modelo de gestión de la energía como herramienta para lograr ahorros económicos y excelencia operativa.

### 1.4.2 Objetivos específicos

a. Determinar las fuentes de energía.
b. Determinar el consumo global de energía.
c. Determinar los indicadores de gestión de la energía.
d. Definir la estrategia de ahorro de energía dentro de los objetivos de la empresa.
e. Determinar el ahorro económico del consumo de energía.

*"Si sigues haciendo como siempre lo has hecho, tendrás siempre los mismos resultados"*
*Anónimo*

# CAPÍTULO II

# MARCO TEÓRICO

## 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Según los resultados del documento "Servicios Energéticos basados en el Mercado"[2] elaborado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para el gobierno del Perú en Julio de 1998, en el cual se realizo el análisis y evaluación del mercado potencial de eficiencia energética en el sector industrial, estimando que podría reducirse el consumo de energía eléctrica entre el 5 al 15%. Las informaciones de auditorias realizadas por CENERGIA, durante el periodo de 1990 a 1994, en los sectores productivo y de servicios, estimaron que podía alcanzarse un ahorro del 5%, equivalente a 450 GWh/año para el año 2005, a partir

[2] Banco Interamericano de Desarrollo (1998). "Servicios Energéticos basados en el Mercado". Julio, Lima, Perú.

de la información de que el sector industrial y de servicios han consumido 9 834 GWh en 1998 y que esta cantidad se mantendrá en el tiempo. Las estimaciones de ahorro no se cumplieron, el consumo en los sectores industria y servicios se incremento en 709 GWh/año del año 1998 al 2004, representando un incremento del 43%. El consumo Gwh/hab/año aumento de 0,392 a 0,519 para el mismo periodo.

Dentro de los procesos de fabricación del cemento, la clinkerización es un proceso principal que ocurre a 1 450$^{o}$C, en el cual la materia prima se transforma en silicatos y aluminatos de calcio (clinker), es además uno de los procesos que mayor energía térmica consume y representa el 72,0% del costo total de energía, para la empresa base del estudio (Junio 2004 a Junio 2005), los costos unitarios de energía por tonelada de cemento son:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Carbón bituminoso | US$/TM | 8,86 | 64% |
| Petróleo R6 | US$/TM | 1,14 | 8% |
| Electricidad | US$/TM | 3,88 | 28% |

H. Lazo[3] muestra la importancia de la aptitud a la cocción de la materia prima, a través de su química, su conformación mineralógica, finura y

[3] Lazo, Hugo. (1999) "Investigación sobre la aptitud a la cochura de crudos en la fabricación de cemento". Coloquio de Química del Cemento. Lima, Perú.

nivel de uso de energía térmica. En este trabajo realizado en los laboratorios de la consultora peruana ARPL Tecnología Ind., muestra que se dificulta la clinkerización cuando la materia prima tiene valores superiores a 105 % en la Saturación de cal, también cuando aumenta el Módulo de Silicatos[4] y cuando aumenta el porcentaje de partículas gruesas en la harina cruda, llevando a mayor consumo de energía térmica.

Las exigencias del mercado hacen necesario fabricar cementos de elevada resistencia inicial, los cuales se obtienen como consecuencia de aumentar en gran medida su finura, implicando grandes consumos de energía eléctrica en los procesos de molienda, J. Álvarez[5] como alternativa muestra la fabricación de un clinker con potencial para desarrollar las resistencias requeridas y el mínimo de coste de energía. Para lograr esto, es necesario disponer y regular la composición química de diversas materias primas.

[4] Módulo de Silicatos: MS = $SO_3$ / ($Al_2O_3$+$Fe_2O_3$). Si es menor de 2 existe bajo consumo energético con cemento de baja resistencia. Al subir el modulo también sube la necesidad de calor.

[5] Álvarez, J. y La Torre M. (1994). "Caracterización de diversos índices de aptitud a la cocción de crudo para fabricación de clinker" Cemento-Hormigón, Marzo 1994, No 730, Pág. 251-269.

De acuerdo a Holcim[6] (llamado Holderbank hasta Mayo del 2001) las dos partes que influyen en los requerimientos de calidad para el cemento son el fabricante y el cliente, el primero por sus costos de producción y el segundo por las propiedades superiores a las mínimas y con menor variabilidad.

Los consumos energéticos estarán fuertemente influidos por las características de los procesos y estos están determinados por las especificaciones del producto a obtener así como del tipo de materias primas, pudiendo variar grandemente los consumos térmicos expresados como Kcal/Kg de clinker.

En los procesos de reducción de tamaño, el tipo de equipo es determinante para el consumo de la energía eléctrica y estos dependerán del tipo de materiales a tratar, cuyos consumos específicos pueden variar para el cemento desde 25 a 60 KWh/TM de cemento. A nivel de plantas de cemento los consumos de energía eléctrica están variando en promedio de 84 a 140 KWh/TM equivalente de cemento[7]. La dureza del material influye en la producción y consumo de energía de los molinos de bolas, la figura 2.1 muestra la dureza de la caliza de alimentación al

[6] Holderbank (1994) "Introducción a la tecnología de los materiales", Seminario de Cemento, Quito, Ecuador.

[7] El término "equivalente de cemento" significa que las toneladas de productos intermedios son expresados como toneladas de cemento, aplicándoseles factores de conversión. El Anexo IV muestra la determinación de los factores.

molino de bolas en función de la TM/h de producción. Las durezas de otros materiales se muestran en la figura 2.2.

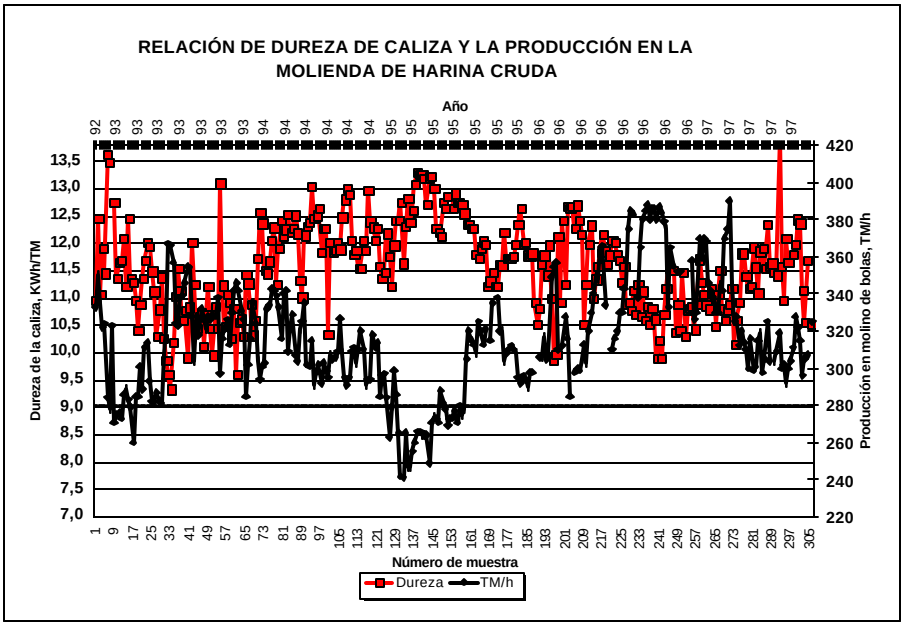



**Figura 2.1:** Relación de dureza de la caliza y la producción del molino

Fuente: Elaboración propia, ensayos realizados en la empresa base del estudio

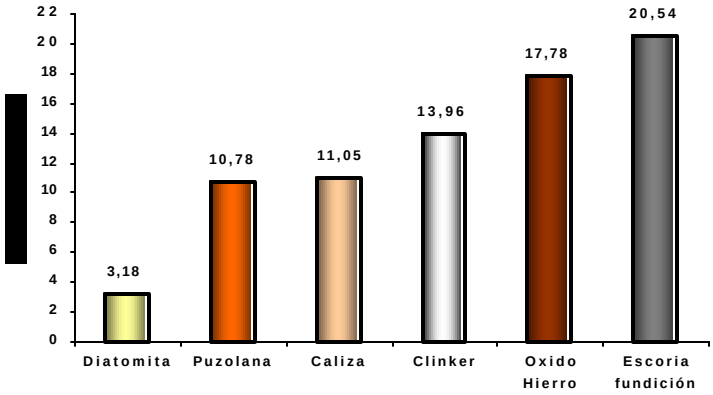



**Figura 2.2:** Dureza de materiales utilizados en plantas de cemento

Fuente: Elaboración propia

La mejora en la tecnología lleva a reducciones en el consumo de energía, al tenerse precalentadores con más etapas y por el uso de prensas de rodillos en lugar de molinos de bolas (Tabla 2.1). Ver en Anexo XIX Ahorros de energía térmica por cambio de tecnología.

**Tabla 2.1:** Variación del consumo de electricidad por cambio de tecnología

| Proceso | | Antes | Después | Variación |
|---|---|---|---|---|
| Trituración Primaria | KWh/TM | 0,35 | 0,40 | 14,3% |
| Trituración Secundaria | KWh/TM | 3,18 | 2,30 | -27,7% |
| Molienda Crudo | KWh/TM | 28,18 | 18,75 | -33,5% |
| Clinkerización | KWh/TM | 36,70 | 27,83 | -24,2% |
| Molienda Cemento | KWh/TM | 46,62 | 39,49 | -15,3% |
| Despacho de cemento | KWh/TM | 0,95 | 1,26 | 32,6% |
| Equipos Auxiliares | KWh/TM | 5,66 | 4,48 | -20,8% |
| KWh/TM equivalente Cemento | KWh/TM eq. | **121,6** | **94,5** | **-22,3%** |
| Precio electricidad, US$/KWh | $/KWh | 0,0510 | 0,0505 | -1,0% |
| US$/TM equivalente cemento | $/TM eq. | **6,20** | **4,77** | **-23,1%** |

**Fuente**: Mediciones y cálculos desarrollados por el autor a partir de la información de los procesos de la empresa base del estudio

En la tabla 2.2 muestra las etapas del proceso de fabricación del cemento, los equipos y tipo de energía utilizada...

**Tabla 2.2:** Flujo del proceso de fabricación del cemento en la empresa en estudio

| Paso | Extracción Materia Prima → | Trituración → | Molienda Crudo → | Horno Clinker → | Molienda Cemento → | Despacho |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Objetivo** | Obtener materiales con composición química requerida | Reducir tamaño de caliza, clasificar y Homogenizar | Reducir tamaño del crudo y regular composición química | Obtener Clinker con Ahorro de energía | Reducir tamaño, dosificar clinker, yeso y puzolana. Ahorro de energía | Entrega perfecta Ahorro de energía Reducir exceso de peso |
| **Etapas** | Exploración Perforación y voladura Carguio y acarreo | Chancado primario, secundario y Pre homogenización | Dosificación componentes, Molienda y homogenización | Pre calentador, Horno y Enfriador | Dosificación, molienda y clasificación | Balanzas, Ensacado, Balanzas |
| **Equipos** | Perforadoras rotativa, Tractores, cargadores frontales, palas y camiones | Chancadora primaria (1) tipo cono, 1 600 TM/h. Reduce de 1,5 m a 0,25 m. Chancadora secundaria (2) de martillos, reduce de 0,25 m a 0,019 m, 1 000 TM/h. Cancha pre homogenización | Molinos bolas (1) 350 TM/h, 30% RM200. Prensa Rodillos (3), 330 TM/h | Horno rotativo vía seca: Línea 1, long. 85 m, Ø5,2 m y 4 000 TM/día. Línea 2, long. 82 m, Ø5,25 m y 7500 TM/día de clinker. | Dosificadores, Molino bolas (2), long. 14,4 m, Ø 4,4 m y 110 TM/h. Prensa Rodillos (3), 115 TM/h | Máquinas rotativas automáticas (5), 2 400 bolsas/h |
| **Energía** | Petróleo Diesel 2 | Electricidad | Electricidad | Electricidad, carbón, Pet coque petróleo y gas | Electricidad | Electricidad |

Fuente: Elaboración propia

## 2.2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO ENERGÉTICO EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

La industria del cemento consume gran cantidad de energía, cada tonelada de cemento producido necesita de unos 73 a 130 kilos de petróleo o de combustible equivalente, según la variedad del cemento o el proceso de fabricación utilizado[8]. En la industria del cemento de Japón[9], aun cuando han bajado sus inversiones en nuevas plantas, la correspondiente inversión en conservación de energía se ha incrementado.

La industria del cemento es una industria de proceso costoso, es una de las industrias que requieren altas inversiones, el costo de una nueva planta es superior a los 150 millones de euros por millón de toneladas de capacidad anual[10], por lo que se encuentra plantas con diversos niveles tecnológicos, tanto por sus niveles de producción como por sus niveles de eficiencia.

---

[8] FLSmidth Institute, (2002). Proceso y Operación de los Sistemas de Hornos. Lima, Perú.

[9] Inversión en conservación de energía 1990 (2.6%), 1995 (4.2%), 1998 (12.3%), y disminuyeron sus consumos de combustible 1990 (105.5 kg/TM) a 1998 (104.2 kg/TM), Cement Ameritas Noviembre-Diciembre 2000.

[10] Thomas G. (2004) Latin America Cement Industry: Looking Ahed. Internatinal Finance Corporation, Washington DC, October.

Las plantas que tienen un mejor desempeño energético son las plantas de procesos en vía seca, dentro de éstas las que disponen de precalentador y calcinador tienen las mejores eficiencias en el uso de la energía. El número de etapas de los precalentadores, determinará que los gases de escape estén a menos temperatura. Al disponer de calcinador se logra mejor descomposición de la harina cruda en el precalentador y se recupera el exceso de calor del aire del enfriador. En la tabla 2.3 se muestra las plantas de cemento y los tipos de proceso como sus consumos energéticos. De acuerdo a ella Cementos Lima S.A. ubicada en Lima es la más eficiente en la utilización de la energía.

**Tabla 2.3:** Consumo de combustible y electricidad en plantas cementeras

| Fuente | Combustible* | | Energía Eléctrica | Tipo Proceso |
|---|---|---|---|---|
| | TM /TM clinker | Kcal/Kg clinker | KWh/TM equivalente de cemento | |
| **Cementos Lima (L2)** | 0,099 | 713 | 90 | Vía seca, Pc/C |
| **Cementos Lima (L1)** | 0,117 | 842 | 115 | Vía seca, Pc |
| **Cemento Pacasmayo** | 0,110 | 792 | 107 | Vía seca, Pc/C |
| **Cemento Selva**** | 0,175 | 1 260 | 118 | Vía semi seca |
| **Cemento Andino (L1)**[11] | 0,118 | 850 | 128 | Vía seca, Pc/C |
| **Cemento Andino (L2)** | 0,132 | 950 | 135 | Vía seca, Pc/C |
| **Cementos Sur** | 0,230 | 1 656 | 114 | Vía húmeda |
| **Cementos Yura** | 0,140 | 1 008 | 140 | Vía seca, Pc |

Pc: El horno tiene Precalentador (torre de ciclones)
C: El horno tiene Calcinador (inyección de combustible y aire terciario)
*Carbón con poder calorífico inferior de 7200 Kcal/Kg carbón
**Tiene horno vertical (baja capacidad y alto consumo de calor)
L1, L2: Líneas de fabricación de clinker
**Fuente:** Elaboración propia, 2003

[11] Cisneros V. (2003) IX Simposium de Tecnología en la Industria del Cemento. Lima, Perú.

En el proceso de formación del clinker, es conocida la estructura de consumo de energía térmica que muestra la Tabla 2.4, donde se requiere 428 Kcal/Kg de clinker, el consumo sobre este valor serían pérdidas de energía.

**Tabla 2.4:** Consumo de energía térmica en la clinkerización

| **Deshidratación y Descarbonatación** | | | |
|---|---|---|---|
| Deshidratación de la caolinita (15%) | | 16 | Kcal/Kg |
| Deshidratación de la caliza (67%) | | 506 | Kcal/Kg |
| Descarbonatación de la Magnesita (1.2%) | | 8 | Kcal/Kg |
| | Subtotal | 530 | Kcal/Kg |
| **Clinkerización**[12] | | | |
| $C_3S$ (58%) | | -65 | Kcal/Kg |
| $C_2S$ (22%) | | -35 | Kcal/Kg |
| $C_3A$ (11%) | | -1 | Kcal/Kg |
| $C_4AF$ (8%) | | -1 | Kcal/Kg |
| | Subtotal | -102 | Kcal/Kg |
| | **Total** | **428** | **Kcal/Kg** |

**Fuente:** FLSmidth Institute (2002). Seminario Proceso y Operación de Sistemas de Hornos

Los consumos energéticos dependen del sistema de horno, la tabla 2.5 muestra las principales características de estos sistemas. Las plantas de menor consumo de energía son las de vía seca que disponen de precalentador y calcinador.

[12] $C_3S$: Silicato Tricalcico, $C_2S$: Silicato dicalcico, $C_3A$: Aluminato tricalcico, $C_4AF$: Ferroaluminato tetracalcico. Habiéndose denominado a C: CaO, S: $SiO_2$, A: $Al_2O_3$, F: $Fe_2O_3$, $C_3S$: 3CaO. $SiO_2$

En el período de 1999 al 2001, China[13] por bajos niveles de producción y alto consumo de calor ha cerrado o eliminado un número considerable de hornos verticales que equivalen a una capacidad de 94,5 MT/año de una producción total de 620 MT/año en el 2001.

**Tabla 2.5:** Consumos energéticos en sistemas de hornos

| Sistemas de hornos | Largo vía húmeda | Largo vía seca | Lepol | Precalentador ciclones | Precalcinador |
|---|---|---|---|---|---|
| **rpm** | 1 | 1 | 1,5 | 2 | 4 |
| **TM. Día/m$^3$** | 0,45 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 3,5 |
| | 0,8 | 0,8 | 2,2 | 2,2 | 5 |
| **Longitud/ Diámetro, L/D** | 30 | 30 | 12 | 14 | 10 |
| | 35 | 35 | 15 | 16 | 14 |
| **Kcal/Kg de clinker** | 1 300 | 1 100 | 950 | 750 | 690 |
| | 1 650 | 1 300 | 1 200 | 900 | 850 |
| **KWh/TM de clinker** | 17 | 20 | 20 | 24 | 24 |
| | 25 | 30 | 25 | 25 | 28 |
| **Tiempo residencia, min.** | 180 | 180 | 30 | 30 | 20 |
| | 240 | 240 | 40 | 40 | 30 |
| **Temperatura de gases de escape, $^oC$** | 150 | 380 | 100 | 310 | 250 |
| | 230 | 400 | 120 | 360 | 360 |
| **Caída presión ÄP, mm $H_2O$** | 150 | 150 | 250 | 500 | 500 |
| | 180 | 200 | 400 | 700 | 700 |
| **Gases escape, Nm$^3$/Kg clinker** | 3,4 | 1,8 | 2,0 | 1,5 | 1,4 |

Fuente: Portland Cement Association (2004) " Innovations in Portland Cement Manufacturing"

## 2.3 EL AHORRO DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

Para Bertand Collomb[14] muchas empresas cementeras grandes y medianas que son globales, su objetivo no es el crecimiento o la

[13] Internacional Cement Review, Julio 2002

[14] Bertrand Collomb (2003) es Presidente del Directorio de la corporación cementera Lafarge de Francia. Extracto de la conferencia dada en Cemtech Internacional. Lafarge tiene presencia en Sudamérica en cementeras de Brasil, Chile,

globalización en si mismo, sino que ésta tiene sentido únicamente si el crecimiento que se consigue es creador de valor.

El mercado mundial de cemento está creciendo a una tasa promedio de 3,5%, valor que no cubre las expectativas de los accionistas y para lograr el crecimiento disponen de las alternativas siguientes:

a. Entrar en los mercados emergentes, donde la demanda crece al ritmo de 6 a 10% anual contra 1 a 2% en los países desarrollados.
b. La diversificación de los productos en diferentes tipos de cementos, a partir del desarrollo de nuevos materiales y agregados.
c. La adquisición de otras empresas cementeras.

Crecimiento y creación de valor, es lo que esperan los accionistas, además buscan un retorno de la inversión superior al costo de capital, siendo esto difícil de conseguir en una industria cíclica como la del cemento, donde uno de los métodos para crear valor consiste en incrementar el rendimiento. Pero para lograr esto se requieren personas y de un sistema o modelo, donde el esfuerzo comprometido y sistemático además de la experiencia capitalice en las mejores prácticas.

El incremento del rendimiento es posible si se considera lo siguiente:

---

Honduras, México, Venezuela, Las Antillas y Guyana francesa.

a. Bajar el consumo específico de combustible
b. Buscar alternativas de sustitución de combustibles.
c. Bajar los consumos específicos de electricidad.
d. Mantener la confiabilidad de los equipos, siendo significativa la diferencia de creación de valor de una planta que funciona a 55% de su capacidad nominal y otra que logra el 95%.
e. Reducir los costos de fabricación.
f. Innovar productos.

La estrategia para el ahorro de energía es principalmente importante para los sectores industriales como la del cemento que muestran un consumo intensivo de energía. Además el uso eficiente de la energía es una solución para la disminución de emisión de gases causantes del efecto invernadero[15].

En la industria del cemento existe una tendencia creciente e imparable hacia materiales sustitutos, tanto por necesidades industriales como por factores restrictivos de la sociedad. Según Bittner W. de Lafarge Center Technique Centrale GmbH[16], desde el punto de vista del uso del paisaje y de los recursos, no se puede continuar tirando en vertederos

[15] La fabricación de cemento tiene emisiones de 0,80 TM de $CO_2$ por TM de cemento Pórtland.

[16] Bittner W. (2000) "Tendencias en la industria del cemento". En: Memorias de Refrakolloquium 2000. Berlín, Alemania.

sustancias que son reciclables o reutilizable, sino que se debe encontrar un mejor equilibrio entre generación de residuos y reutilización. En la figura 2.3, se muestra las materias y combustibles secundarios que pueden actuar como sustitutos.

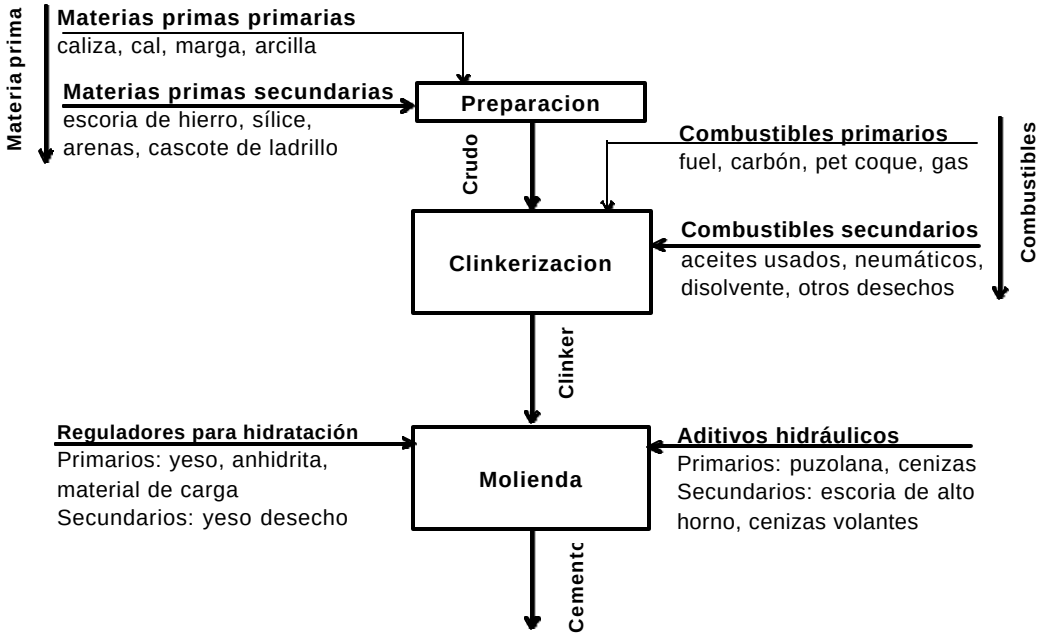



**Figura 2.3: Tendencias en el uso de combustibles y materiales**
Fuente: Bittner W. (2000) "Tendencias en la industria del cemento", Refrakolloquium 2000. Berlín, Alemania.

Además del desarrollo tecnológico en la industria del cemento, se tiene un conjunto de adaptaciones adicionales de ingeniería de procesos en los ámbitos del equipamiento para almacenaje y dosificación, quemadores, precalentadores y modificaciones en el calcinador para controlar y mejorar no solo el proceso de clinkerización, sino también en las emisiones.

## 2.4 GESTIÓN ENERGÉTICA EN UNA EMPRESA

La última década del siglo XX ha representado sin duda alguna una etapa de fuertes y acelerados cambios en el mundo. Las organizaciones actuales enfrentan una competencia donde sobreviven y progresan aquéllas que establecen y desarrollan las estrategias adecuadas para este medio cambiante. Para Olvera[17] en la industria moderna, el ahorro de energía es clave para reducir costos y poder competir en una economía cada vez mas globalizada.

En la gestión debe disponerse de sistemas donde los procedimientos estandarizados permitan rigurosidad y repetitividad siendo indispensable disponer de una metodología acorde con su medio. La gestión energética tiene como objetivo básico el mayor aprovechamiento o rendimiento posible de los diversos tipos de energía que se utiliza.

Según un estudio realizado entre empresas de diferentes ramas industriales Hermes[18], observó que los tipos de barreras y su nivel de importancia relativa varían según el tipo de actividad industrial, entre estas barreras se pueden distinguir cuatro grupos:

**a. Barreras de Organización e Información:**

Cuando se desconoce si el consumo de energía en la planta es alto o bajo por no contar con datos básicos de comparación.

[17] Olvera C, y otros (2000) "Ahorro de energía en sistemas frigoríficos" México. En: www.geocities.com/CapeCanaveral/Station/6035/Papers/Ener.htm. (Consultado: Agosto 2000)
[18] Hermes Dieter, (1998)."Eficiencia Energética", PAE, Ministerio de Energía y Minas, Lima Perú

Cuando entre los directivos de la empresa existen temores al cambio y si hay desconocimiento de nuevas o diferentes tecnologías más eficientes.

**b. Barreras Tecnológicas:**

Cuando en el proyecto se sobreestiman la demanda de energía, provocándose una ineficiente utilización de la energía en el futuro.

Cuando el tipo de infraestructura de la planta limita o imposibilita el cambio hacia otro tipo de tecnologías más eficientes en el uso de la energía.

**c. Barreras Financieras:**

Cuando los directivos establecen cortos periodos de retorno de la inversión, dificultando su implementación.

Cuando la Empresa no cuenta con capital o fuentes de financiamiento disponibles.

**d. Barreras Estructurales:**

Cuando la empresa tiene un perfil de gestión conservadora y por lo tanto es renuente a nuevas medidas e inversiones relacionadas a cambios en la producción.

## 2.5 ESTRATEGIAS DE COMPETITIVIDAD GLOBAL

La estrategia empresarial que brinda una proposición de valor a los clientes, necesita en sus procesos internos una integración de productos,

precio, servicio; así como el tipo de organización que le permita diferenciarse de la competencia. Según Treacy y Wiersema[19], las organizaciones para diferenciarse en el mercado, usan:

- **Estrategia de Liderazgo en el producto**, buscan el mejor producto, los altamente deseables por los mercados.
- **Estrategia de Excelencia Operativa**, buscan el menor costo. Las empresas buscan una combinación de calidad percibida por el cliente, precio competitivo, tiempos de espera y entrega puntual para las compras y facilidad de compra que nadie puede igualar.
- **Estrategia Intimidad con el cliente**, busca la mejor solución total. La empresa que aplica esta estrategia crea vínculos con los clientes, conoce los productos y servicios que necesitan.

Las empresas de éxito destacan en la aplicación de una de las tres estrategias[20] manteniendo requisitos mínimos en las otras dos estrategias. Las características de estas estrategias se muestran en tabla 2.6

[19] M. Treacy y F. Wiersema, (1995).“The Discipline of Market Leaders: Cose Your Customer, Narrow Your Focus, Dominate Your Market”, Addison-Wesley.

[20] R. Kaplan y D. Norton, 2001. “Como utilizar el Cuadro de Mando Integral”, Gestión 2000, España.

**Tabla 2.6:** Características de Estrategias de Diferenciación en el mercado

| ESTRATEGIA | INTIMIDAD CON EL CLIENTE<br>**Resuelve el problema mas amplio del cliente** | EXCELENCIA OPERATIVA<br>**La variedad mata la eficacia** | LIDERAZGO EN PRODUCTO<br>**Caníbal izar su propio éxito con productos aun mejores** |
|---|---|---|---|
| ***CULTURA*** | **E**mpleados con facultades para solucionar problemas del cliente tomando responsabilidades por los resultados<br>**O**rientación a concepto Alianza con el cliente.<br>**S**aber escuchar problemas del cliente. | **P**rocesos orientados al producto.<br>**E**mpleados actúan a base de procesos estandarizados, excelentes pero poco flexibles.<br>**T**rabajo en equipo disciplinado. | **C**oncepto orientado al futuro.<br>**E**xperimentación y mentalidad abierta.<br>**H**éroes individuales. |
| ***PROCESOS*** | **S**elección y capacitación de clientes.<br>**D**esarrollo de clientes.<br>**S**ervicio proactivo al cliente.<br>**É**nfasis en flexibilidad y respuesta. | **O**ptimización de la cadena de distribución de sus procesos.<br>**É**nfasis en eficiencia y confianza. | **É**nfasis en creatividad.<br>**C**omercialización y explotación de mercados. |
| ***HABILIDAD ORGANIZACIONAL*** | **E**quipos con orientación empresarial.<br>**A**lta capacidad de reacción.<br>**A**lto nivel de habilidades en áreas de contacto con clientes (consejo experto).<br>**A**pertura canales de comunicación con clientes. | **A**utoridad central. Bajo nivel de autorización.<br>**A**lto nivel de habilidades en la medula de la organización.<br>**F**ilosofía de mejora continúa. | **E**structura flexible y fluida.<br>**A**bundan altos niveles de habilidades en estructuras sueltas.<br>**É**nfasis en el reclutamiento de talentos. |
| ***SISTEMAS DE ADMINISTRACIÓN*** | **R**entabilidad de los clientes.<br>**G**erente trabaja en función del cliente. | **A**dministración basada en la calidad.<br>**G**erencia y sistemas de control. | **R**entabilidad del ciclo de vida del producto.<br>**P**remios a capacidades de innovación individual. |
| ***SISTEMAS DE INFORMACIÓN*** | **S**istemas de ventas y servicios en terreno.<br>**B**ase de datos de clientes enlazados con información interna y externa. | **A**lta automatización.<br>**I**ntegración de los sistemas transaccionales de bajo costo. | **S**istemas de comunicación de persona a persona.<br>**T**ecnología que permite la cooperación.<br>**S**oluciones puntuales, poca integración. |

**Fuente**: Gorriti José, (2000). "Balanced Scorecard y sus aplicaciones con TI", ESAN, Lima, Perú.

También E. Goldratt[21] dice que se puede ganar ventaja competitiva con, mejores productos, precios más bajos y con respuesta más rápida.

**Mejores productos:** Se puede ganar ventaja competitiva teniendo alta calidad y disponiendo de una excelente ingeniería, como dar nuevos o mejores atributos.

[21] E. Goldratt, (2002). "La Carrera", Ed. Castillo, México.

**Precios más bajos:** Disponer de márgenes más altos o tener costos más bajos, es disponer de mayor flexibilidad en sus precios y posibilidad de tener un punto de equilibrio mas bajo.

**Respuesta más rápida:** Se gana ventaja competitiva con el cumplimiento puntual de las entregas. También se logra cuando los tiempos de entrega cotizados son más cortos.

La figura 2.4 muestra la relación entre la estrategia global actual y la deseada.

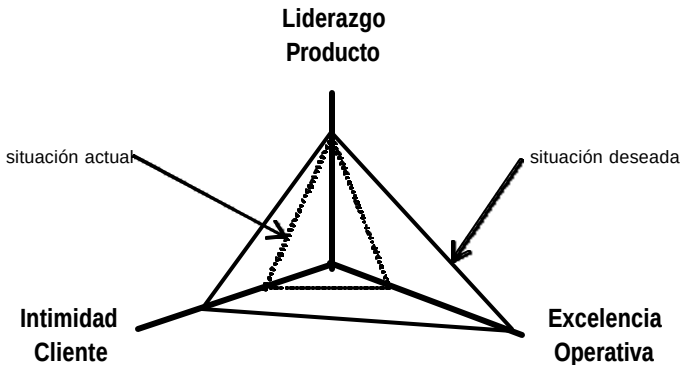



**Figura 2.4: Estrategia de competitividad global**
Fuente: Elaboración propia

Las estrategias de competitividad global que una organización usa para diferenciarse en el mercado deben estar de acuerdo a sus acciones internas[22].

[22] Treacy, M. & Wiersema, F. (1995). "The discipline of Market Leaders: Cose your customer, narrow your focus, dominate your market"Addison-Wesley.

De acuerdo a la estrategia de excelencia operativa, se tienen procesos orientados al producto y los empleados actúan en base a los procesos estandarizados, excelentes pero poco flexibles. También presentan autoridad central, filosofía de mejora continua, administración basada en la calidad y alta automatización[23].

La relación causa efecto de las perspectivas se muestra la figura 2.5, Estas relaciones permiten integrar las acciones con los objetivos de la organización.




**Figura 2.5:** Diagrama de Causa Efecto para perspectivas
Fuente: Hovarth & Partners (2003). "Dominar el Cuadro de Mando Integral". Gestión 2000. pp. 60.

[23] Kaplan, R. & Norton, D. (2001). "Cómo utilizar el Cuadro de Mando Integral", Gestión 2000, Barcelona.

En los mercados de cemento, cada vez se nota mayor influencia de los fabricantes internacionales por la apertura y desregulación de mercados. En la tabla 2.7 se muestra la composición del mercado en América Latina. Por el buen potencial de crecimiento del mercado peruano con 173 Kg. de cemento por habitante al año, es una invitación al ingreso de los fabricantes internacionales.

**Tabla 2.7:** Composición del Mercado en América Latina.

**MERCADO ESTIMADO DE CEMENTO EN AMÉRICA LATINA**

| Cementeras | Brasil | México | Colombia | Argentina | Venezuela | Perú | Chile | Ecuador |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Productores independientes** | | | | | | | | |
| **Votoratim** | 47% | | | | | | | |
| **Grupo Argos** | | | 54% | | | | | |
| **Cementos Lima** | | | | | | 39% | | |
| **Camargo Correa** | 10% | | | 43% | | | | |
| **independientes** | 16% | 19% | 0% | 17% | 9% | 42% | 11% | 33% |
| **Fabricantes de cemento internacionales** | | | | | | | | |
| **Holcim** | 10% | 23% | 10% | 40% | 21% | 19% | 35% | 47% |
| **Lafarge** | 8% | | | | 20% | | 42% | 20% |
| **Cimpor** | 9% | | | | | | | |
| **Cemex** | | 58% | 36% | | 50% | | 12 | |
| **Producción* total: MTM/año** | 34.20 | 33.70 | 8.12 | 6.05 | 5.47 | 4.60 | 3.74 | 4.11 |
| **Consumo per capita, Kg/hab/año** | 190 | 287 | 123 | 162 | 116 | 148 | 245 | 253 |

* Asociación productores de cemento del Perú, ASOCEM (2005), en "Estadísticas del mercado de cemento"

**Fuente**: Gepp Charles, 1998. "Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux". N$^{o}$ 6. Actualizado a Mayo 2005 de "Instituto Chileno del Cemento y Concreto" y de "Cemento-Hormigón".

Para Piercuch[24] la tendencia actual en la industria del cemento es la adquisición de compañías de cemento más pequeñas, cuyo valor

[24] Piecuch John, Presidente de la Corp. Lafarge hasta el 2002. En: "Cement Americas". Noviembre-Diciembre 2000.

depende del fin estratégico y las sinergias operacionales.

En la tabla 2.8 se muestra cómo las grandes corporaciones del cemento han venido adquiriendo plantas de cemento.

**Tabla 2.8:** Adquisiciones de Plantas Cementeras en América Latina

| Comprador | Fecha | Compañía | País | % adquirido | Inversión US $mill. | Capacidad MTM/año | Precio adquisición US $/TM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Holcim** | Jun-04 | Minetti | Argentina | Administra | | | |
| **Holcim** | Mar-97 | Caribe | Venezuela | 100% | 100 | 2,2 | 100 |
| **Holcim** | Jul-96 | Paraíso | Brasil | 100% | 200 | 2,2 | 184 |
| **Cimpor** | Ene-97 | Serrano | Brasil | 100% | 430 | 1,8 | 239 |
| **Lafarge** | Jul-97 | Matsulfur | Brasil | 100% | N/A | | N/A |
| **Lafarge** | Dic-04 | Selva Alegre | Ecuador | 99% | 130 | 0,7 | |
| **Cemex** | May-96 | Diamante | Colombia | 54% | 600 | 3,4 | 327 |
| **Cemex** | Dic-95 | Cementos Nacionales | Republica Dominicana | N/A | 110 | 0,8 | N/A |
| **Cemex** | Abr-94 | Vencemos | Venezuela | 68% | 320 | 4,3 | 109 |
| **Cemex** | Ago-94 | Bayano | Panamá | 95% | 60 | 0,4 | 143 |

Fuentes: Gepp Charles, 1998. "Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux". N$^{o}$ 6, Cemento – Hormigón (artículos Noviembre 2004, Enero y Febrero 2005)

En la tabla 2.9 muestra cómo se están reestructurando las empresas del cemento en América Latina. A fines del 2005 debe ingresar un nuevo fabricante de cemento al mercado peruano.

**Tabla 2.9:** Reestructuración de las Plantas Cementeras en América Latina

| | 1994 | 1999 | 2004 | 2005 |
|---|---|---|---|---|
| **Argentina** | 5 empresas | 4 empresas consolidación de Minetti y Corcemar | 3 empresas, Minetti es parte de Holcim | 3 empresas |
| **Brasil** | 18 empresas | 12 empresas | 10 | 6 a 8 |
| **Chile** | 3 empresas | Estable | estable | estable |
| **Colombia** | 5 empresas | 3 empresas Argos absorbe Cementos Paz del Río | estable | estable |
| **México** | 5 empresas | Estable | estable | estable |
| **Perú** | 6 empresas | 5 empresas Pacasmayo incorporó Rioja | 4 empresas | 5 empresas, debe ingresar otro fabricante |
| **Venezuela** | 5 empresas | Estable | estable | estable |
| **Ecuador** | | | Lafarge adquiere 99% de Cementos Selva Alegre | |

Fuentes: Gepp Charles, 1998. "Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux".N$^{o}$ 6 y de Cemento – Hormigón (artículos Noviembre 2004, Enero y Febrero 2005).

## 2.6 Principales aspectos en el proceso de fabricación del cemento

**Circuito interno de volátiles**

Las variaciones del $SO_3$, $Na_2O$ y $K_2O$ que ingresan al sistema con la harina cruda, se volatilizan a los 1 200$^{o}$ C en el interior del horno y son arrastrados junto con los gases de combustión, condensándose a los 800$^{o}$C para depositarse en las paredes interiores de los ductos y sobre el material más frió que va del Precalentador hacia el Horno, formándose un ciclo interno que se incrementa continuamente. La condensación forma fuertes encostramientos en el interior de los ductos de ascenso de gases, ocasionando mermas en la producción, mayores consumo de energía y en muchos casos lleva a paralizar el proceso. Ver el Anexos XII y XXIII.

El incremento de la relación álcalis sulfato $SO_3/(0,5\ Na_2O + K_2O)$

denominada RAS, lleva a mayores encostramientos en los ductos de ascenso de gases. El rango recomendable para no tener encostramientos esta entre 0,8 a 1,1.

La figura 2.6, muestra un esquema del circuito de volátiles en el horno y precalentador.

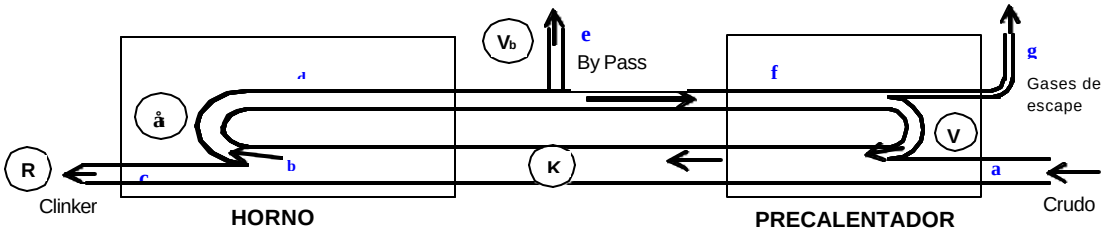



**Figura 2.6:** Esquema del circuito interno de volátiles
Fuente: FLSmidth Institute

å = d/b = (b - c)/b = 1 - (c/b)
**$V_b$** = e/d
**V** = g/f
**K** = b/a
**R** = c/a = (b - d)/a
**Balance:**
c + e + g = a
c/a + e/a + g/a =1
k (1-å) + kåVb + kå(1 - Vb) V = 1
**Factor de circulación:**
k = 1/( 1- å(1 - Vb) (1 - Vb) )
R = (1 - å) / (( 1 - å(1 - Vb) (1 - Vb) )

Para determinar el nivel de concentración que es perjudicial, se analiza la alimentación fresca, a entrada del horno y al clinker producido, determinándose las volatilidades de los álcalis y del azufre, los resultados se muestran en la Tabla 2.10.

**Tabla 2.10:** Valores medios de volatilidad del azufre, sodio y potasio

| Prueba | $K_2O$ | $Na_2O$ | Álcalis Totales | $SO_3$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,6405 | 0,1544 | 0,5758 | 0,9076 |
| 2 | 0,6244 | 0,1180 | 0,5289 | 0,8239 |
| 3 | 0,5878 | 0,1446 | 0,5314 | 0,9434 |
| 4 | 0,5989 | 0,1131 | 0,5072 | 0,9331 |
| 5 | 0,6250 | 0,1385 | 0,5498 | 0,9542 |
| 6 | 0,5742 | 0,1325 | 0,5103 | 0,8625 |
| Promedio | **0,6085** | **0,1335** | **0,5339** | **0,90412** |

Fuente: Elaboración propia

Los principales problemas causados por los elementos circulantes[25] son:

a) Dificultad en la operación del horno, bloqueo de los ciclones, flujo inestable de la harina cruda, circulación de polvo, corrosión de refractarios y carcasa.

b) Mayor consumo energético

Para tener el índice RAS debajo de 1,10, se dosifica otra caliza de mayor contenido de CaO y menos azufre. La adición de esta nueva caliza varía en función a su composición química. Ver Anexo XII.

El comportamiento de los elementos circulantes y su efecto negativo dependerá de la cantidad de ellos y del tipo de instalaciones que se dispone[26] principalmente si el RAS supera el valor de 1,10 % en el crudo de alimentación al horno. En la figura 2.7 se muestra la relación entre el

[25] Alsop Philip, (2001).“The Cement Plant Operations Handbook for Dry Process Plants”, Tradeship Publications Ltd, Third Edition, Houston

[26] Gilvonio, L. 1991 ”Evaluación de la operación del By Pass para la obtención del cemento bajo álcalis”, Cementos Lima.

valor del RAS[27] y el número de paradas del sistema por atoros en el pre calentador.

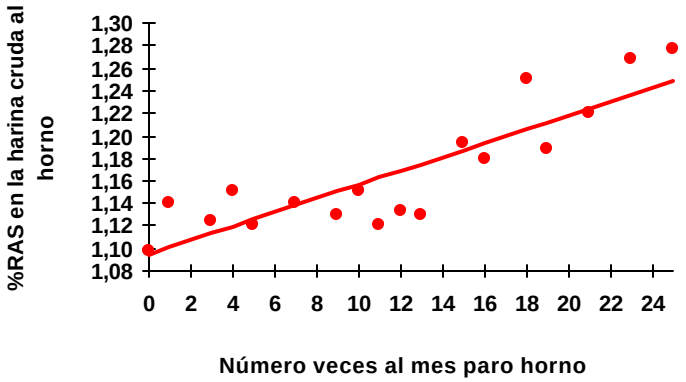



**Figura 2.7:** Relación número paradas del horno por atoro y RAS del crudo
Fuente: Elaboración propia

## Determinación del Cemento Equivalente

Es la cantidad de caliza, crudo, clinker y otros materiales que son necesarios para obtener 1 tonelada de cemento. Para cada proceso se determina un factor (ver detalles en anexo IV).

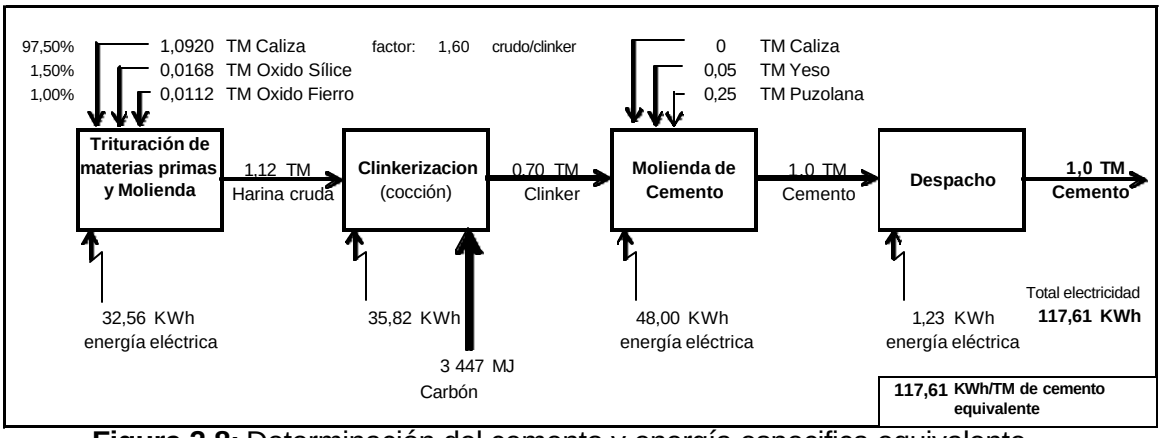



**Figura 2.8:** Determinación del cemento y energía especifica equivalente
Fuente: Elaboración propia

[27] RAS = $SO_3$ / ($K_2O$ + 0.5 $Na_2O$)

## Pérdidas de calor en el proceso de clinkerización

En el proceso de clinkerización suceden pérdidas de calor por altas temperaturas en los gases de escape por el precalentador y por el enfriador (58% de las pérdidas). La otra pérdida significativa de calor es a través de las paredes del horno, precalentador y enfriador (21,8%). Ver tabla 2.11

**Tabla 2.11:** Principales pérdidas de calor en el proceso de clinkerización

| Pérdidas de calor | Kcal/h | % |
|---|---|---|
| Humedad de materiales | 790 547 | 1,1% |
| Pérdidas a través de paredes | 15 476 106 | 21,8% |
| Aire falso | 6 304 556 | 8,9% |
| Gases escape en Precalentador | 31 820 029 | 44,7% |
| Gases escape en Enfriador | 9 718 858 | 13,7% |
| Clinker | 6 948 308 | 9,8% |
| Total | 71 148 401 | |

Fuente: Elaboración propia, de mediciones en la empresa base del estudio

*"Cuando se alinean alrededor de valores compartidos y se unen en una misión común, personas comunes y corrientes logran resultados extraordinarios"*
*Ken Blanchard*

# CAPÍTULO III

# METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

## 3.1 TIPO Y FASES DEL ESTUDIO

Por su naturaleza la investigación tiene un carácter descriptivo y comparativo. Consta de las siguientes etapas:

**Primera Fase: POSICIONAMIENTO ORGANIZACIONAL DE LA EMPRESA**

- Revisión de la visión y misión de la organización
- Despliegue de los objetivos estratégicos

**Segunda Fase: DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS PARA EL OBJETIVO AHORRO ENERGÉTICO**

- Estrategias para el ahorro de energía

**Tercera Fase: DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO**

- Caracterización de las fuentes de energía en la planta.
- Medición del consumo de energía.
- Determinación del consumo de energía por proceso.
- Evaluación técnico económico

**Cuarta Fase: DISEÑO DEL MODELO DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA**

- Determinación de la estructura del modelo.
- Determinación de los indicadores de la gestión de la energía.

**Quinta Fase: APLICACIÓN DEL MODELO DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA EN LA INDUSTRIA CEMENTERA**

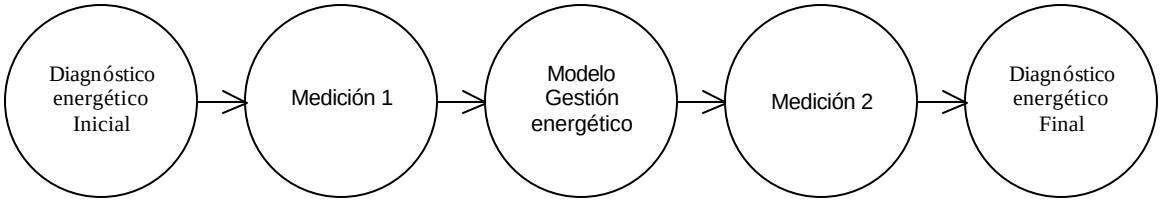
- Presentación de la secuencia de implantación del modelo en la empresa.
- Pautas de implantación.
- Propuesta de ahorro de energía

## 3.2 HIPÓTESIS

La hipótesis formulada es la siguiente: Un Modelo de Gestión de la Energía en la Industria Cementera, es económicamente factible con ahorros atractivos para la empresa.

## 3.3 COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis se comprueba mediante la comparación del ahorro energético y económico antes y después de la verificación del modelo.




Medición 1, 2: Ahorro económico
Comprobación: M2 – M1 = (incremento positivo)

**Figura 3.1:** Comparación del ahorro energético y económico
Fuente: Elaboración propia

## 3.4 DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

El diagnóstico energético consiste en la recolección de información sobre el suministro y consumo de todos los energéticos con el propósito de evaluar y cuantificar las posibilidades de ahorro de energía. Permite dar respuesta a las preguntas ¿Cómo, donde y cuanta energía es empleada o desperdiciada?

Diversa metodologías para el diagnostico energético han sido planteadas, entre ellas por La Comisión Nacional para el Ahorro de energía de México (CONAE)[28], por la Dirección Energética del Ministerio de

[28] CONAE: http://www.conae.gob

Economía y Planificación de Cuba[29] y la dada por el Proyecto para Ahorro de Energía (PAE) del Ministerio de Energía y Minas del Perú[30].

Con las 3 metodologías presentadas se ha desarrollado un análisis decisional, según la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1:** Matriz de Decisión sobre metodologías de ahorro energético

| **CRITERIOS DE DECISIÓN** | **ALTERNATIVAS** | | |
|---|---|---|---|
| **EFECTOS** | **A1** | **A2** | **A3** |
| Ayuda a cumplir con los objetivos de ahorro energético | 5 | 6 | 7 |
| Da una metodología detallada | 2 | 6 | 8 |
| Facilita el seguimiento de propuestas | 4 | 3 | 7 |
| Requiere poco personal | 7 | 4 | 3 |
| Evalúa económicamente alternativas | 7 | 4 | 7 |
| Facilita diagnostico preliminar | 7 | 6 | 7 |
| Identifica condiciones de trabajo | 6 | 5 | 5 |
| Valida los datos | 7 | 5 | 6 |
| Facilita la implementación | 4 | 3 | 8 |
| Busca participación del personal | 3 | 4 | 4 |
| Permite comparar con otras empresas | 0 | 0 | 0 |
| Promedio | 5,2 | 4,6 | 6,2 |
| Orden de Prioridad | **2** | **3** | **1** |

**Importancia**: Es el peso relativo del efecto considerado en cada alternativa y fluctúa entre 1 y 10
**Alternativas de metodología a elegir:** A1: CONAE, A2: CUBA, A3: PAE
Fuente: Elaboración propia

Del análisis de la matriz se obtiene como metodología base, la utilizada en el Proyecto PAE. La metodología elegida no permite la comparación con otras empresas del sector, en este sentido, se propone la etapa 10

[29] Dirección Energética del Ministerio de Economía y Planificación de Cuba, (2000) "situación energética de la industria del cemento", La Habana, Cuba

[30] PAE, 1999. "Uso Racional de la Energía en la Pequeña y Mediana Industria", Ministerio de Energía y Minas del Perú.

denominada “Determinación del nivel de Excelencia Operativa”, que incluye aspectos de seguridad, calidad y mantenimiento.

**Etapa 1: Recolección de información básica e inventario general de instalaciones**

- Identificación del proceso productivo y/o áreas principales.
- Identificación de las fuentes de energía.
- Identificación de los consumidores de energía, capacidad instalada y horas de operación.
- Información histórica de las facturas de los suministradores de energía

**Etapa 2: Elaborar balances de energía, con el objeto de conocer la distribución de energía en las diferentes fases del proceso productivo.**

- Toma de datos.
- Registros y mediciones puntuales.
- Las diferentes formas de energía que entran o salen del sistema deben estar referidas a un mismo período de tiempo y expresadas en las mismas unidades.
- Los balances deben regirse por el principio de que la energía que se aporta al sistema es idéntica a la que éste cede.

**Etapa 3: Determinar la incidencia del consumo de energía de cada equipo o grupo de equipos en el consumo total de energía.**

**Etapa 4: Obtener índices de consumo de energía, los cuales pueden ser usados para determinar la eficiencia energética.**

- Consumo específico de energía

**Etapa 5: Determinar los potenciales de ahorro de energía por equipos, áreas o centros de costos, mediante una evaluación técnica detallada.**

- Sistemas eléctricos: evaluación de la transformación y distribución, cargas eléctricas, sistema tarifaría, generación propia.
- Sistemas mecánicos: evaluación de sistemas de transporte, sistemas de bombeo, sistemas de manejo de aire, manejo y aprovechamiento de materiales sólidos.
- Sistemas térmicos: generación de vapor, sistemas de recuperación de calor residual, redes de distribución de fluidos térmicos, sistemas de intercambio de calor, aire acondicionado, hornos industriales, sistemas de quemadores, y uso de mineralizadores o catalizadores.

**Etapa 6: Identificar las medidas apropiadas de ahorro de energía.**

**Etapa 7: Evaluación de los ahorros de energía en términos de costos.**

- Llevar a cabo una evaluación económica que permite realizar un análisis en función de los desembolsos requeridos para poner en práctica las recomendaciones del diagnóstico y sus correspondientes beneficios.

**Etapa 8: Implementación de las propuestas de acuerdo a prioridades.**

- Preparar un Plan de Acción para las propuestas a implementar.

**Etapa 9: Contrastar resultados con las metas propuestas.**

- Los resultados del Programa de ahorro de energía contrastarlo con las metas de los objetivos estratégicos.

**Etapa 10: Determinar nivel de excelencia operativa.**

- Determinar la evolución del indicador de nivel de excelencia operativa.

La metodología propuesta se muestra en diagrama de flujo para el diagnóstico energético (ver Figura 3.2). Ver Anexo XXI, los detalles de medición del Nivel de Excelencia Operativa.

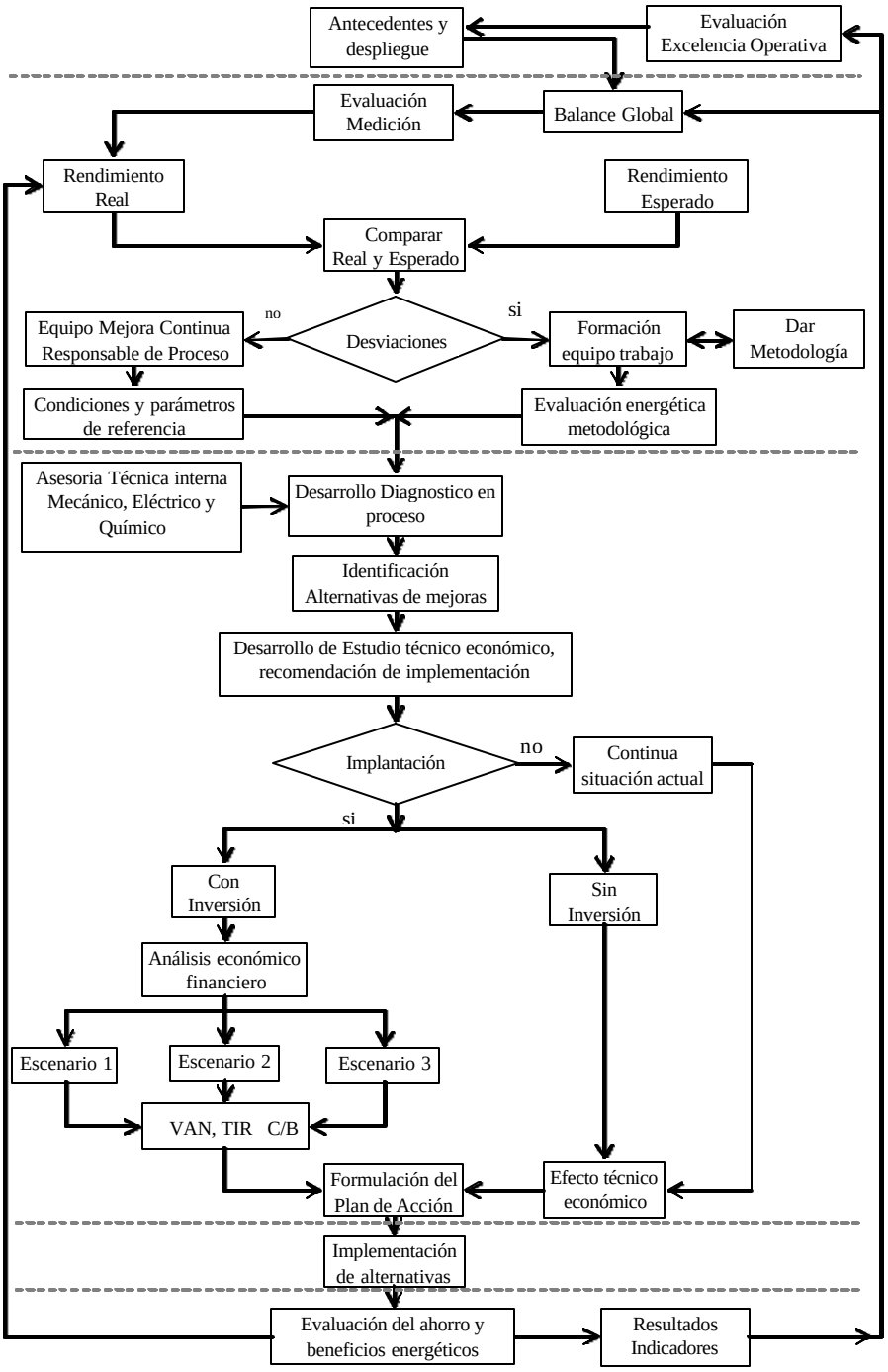



**Figura 3.2:** Metodología para el diagnóstico energético
Fuente: Elaboración propia

## 3.5 EVALUACIÓN DE CONSUMOS GLOBALES DE ENERGÍA

Para la determinación de los consumos globales de energía en la Planta, se toma en cuenta los pasos siguientes:

a. Se determina los consumos de cada una de las fuentes de energía para determinado periodo. En el anexo III se muestra los energéticos consumidos en un mes.

b. Se desarrolla una base datos de producciones expresadas en una unidad homogénea, con lo que se correlaciona los consumos de energía frente a las producciones. El Anexo V muestra los consumos de energía eléctrica y los consumos específicos de cada proceso en la fabricación del cemento.

c. Se determina los consumos nominales en función de los parámetros de diseño para las mismas producciones indicadas anteriormente, servirá para comparar estos consumos con los reales. En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los principales parámetros de diseño.

**Tabla 3.2:** Parámetros de diseño de hornos

| Parámetro | Horno 1 | Horno 2 |
|---|---|---|
| Producción, TM/día | 4 000 | 7 500 |
| Consumo calor, Kcal/Kg clinker | 830 | 710 |
| Consumo eléctrico, KWh/TM clinker | 26,0 | 28,0 |
| Cal libre en el clinker, % | 1,5 | 1,5 |
| Saturación de cal, % | 98 | 98 |
| Módulo Silicatos | 2,1 | 2,1 |

**Fuente**: Elaboración propia

**Tabla 3.3:** Parámetros de diseño de molienda cemento

| Parámetro | Prensa Rodillos | Molino Bolas | Prensa + Molino (Combi) |
|---|---|---|---|
| Producción, TM/h | 125 | 100 | 160 |
| Fineza Blaine, $cm^2/g$ | 3 100 | 3 100 | 3 100 |
| Retenido en Malla 325, % | 6,0 | 6,0 | 6,0 |
| Consumo eléctrico, KWh/TM | 30,0 | 48,0 | 35,0 |
| Dureza del clinker, KWh/TM | <14 | <14 | <14 |

**Fuente**: Elaboración propia

Los consumos de energía térmica están dados por los combustibles, utilizado principalmente en el proceso de clinkerización en los hornos y la energía eléctrica usada en el movimiento de todos los equipos mecánicos, sistemas automatizados de control, iluminación, y el aire acondicionado. El consumo anual de energía eléctrica y térmica se muestra en el Anexo XIV.

## 3.6 INDICADORES DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA

### 3.6.1 INDICADOR DE CONSUMO ENERGÉTICO

Se utilizan dos indicadores de rendimiento energético, uno para la energía térmica y otra para la energía eléctrica:

- Indicador energía térmica, esta dada por la relación del calor total aportado por el combustible en kcal, respecto de la producción total de clinker en kilogramos: $\frac{\sum Kcal}{Kg.de.clin\,\mathrm{ker}}$

- Indicador energía eléctrica, esta dada por la relación del total de la energía eléctrica consumida por el sistema respecto de las toneladas de cemento equivalente:

$$\frac{\sum KWh}{\sum TM.cemento.equivalente}$$

En las etapas intermedias también se utiliza los consumos específicos KWh/ TM del material procesado.

$$\frac{\sum KWh}{\sum TM.material.procesado}$$

En la figura 3.3 se muestra el esquema de evaluación del consumo de energía térmica por kilogramo de clinker producido, Kcal/Kg de clinker.

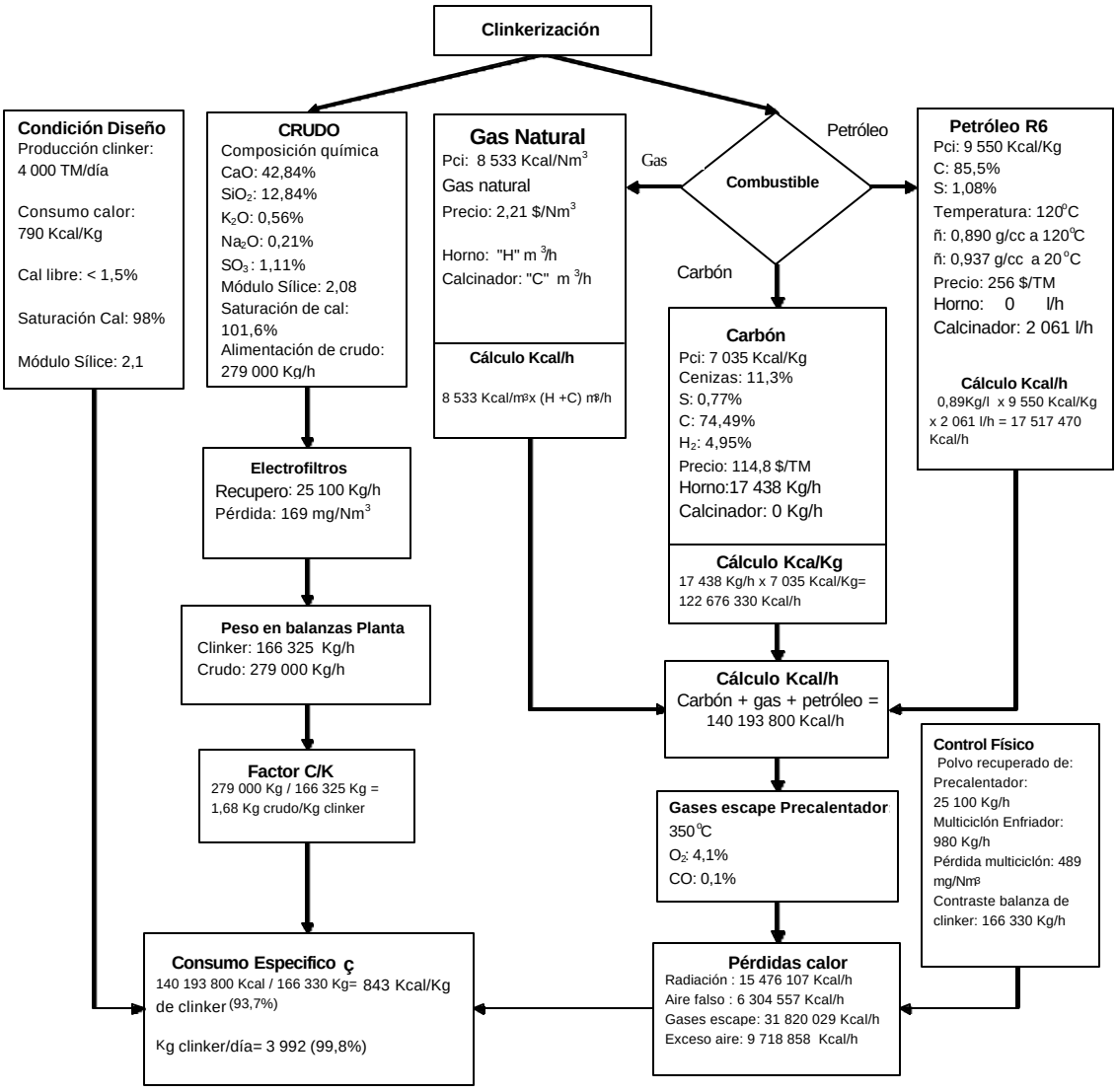



**Figura 3.3:** Evaluación analítica del consumo de energía en la clinkerización
Fuente: Adaptado de CONAE (2004)

Para evaluar el rendimiento de un sistema de horno, se utiliza:

Consumo especifico de electricidad CEE, KWh/TM de clinker, obtenido de la relación entre el consumo total (sumatoria del

consumo de energía KWh de todos los motores involucrados) y las toneladas de producción P.

$$CEE = \frac{\sum KWh}{P}$$

Consumo específico de calor CEC, Kcal/kg de clinker, se calcula como el consumo de combustible CC multiplicado por el poder calorífico neto $H_i$ y dividido por la producción P.

$$CEC = \frac{\sum CC.H_i}{P}$$

Para estimar los diferentes parámetros operacionales y evaluar su influencia en el consumo específico de energía, se ha utilizado la metodología de cálculo de FLS[31] (ver Anexo VII).

La base de estos cálculos son las ecuaciones de calor y de balance de masa, desarrolladas a partir de la termodinámica general, la cinética de reacción, la transferencia de calor y de masa, utilizándose datos operativos de diferentes plantas para estimar los parámetros relevantes.

Esta metodología de FLS permite calcular la influencia de los parámetros operativos sobre el consumo de calor y electricidad, la tabla 3.4 muestra los valores de referencia para los parámetros.

[31] FLSmidth Institute, 2000. "Proceso y operación de los sistemas de hornos". Lima, Perú.

**Tabla 3.4:** Valores de referencia de los parámetros operacionales del perfil de temperatura y consumo especifico de calor

| Descripción | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Temperatura del material de alimentación del horno | 60 | $^{o}C$ |
| Humedad libre en el material de alimentación del horno | 0,5 | % |
| Material combustible (carbón orgánico) en el material de alimentación del horno | 0,16 | % |
| Calor de reacción | 410 | Kcal/Kg Clinker |
| Tipo de combustible | Carbón | |
| Contenido de humedad del carbón | 2 | % |
| Calidad del carbón, poder calorífico neto | 6430 | Kcal/Kg carbón |
| Cantidad de aire primario | 0,15 | Kg/Kg $A_{min.}$ |
| Temperatura del aire primario | 30 | $^{o}C$ |
| Nivel de exceso de aire en el horno | 0,15 | |
| Aire falso en el sello de salida y en la caperuza del horno | 0,03 | Kg/Kg clinker |
| Aire falso en el sello de entrada y tubo ascendente | 0,07 | Kg/Kg clinker |
| Aire falso en los ciclones K1 | 0,03 | Kg/Kg clinker |
| K2 | 0,02 | Kg/Kg clinker |
| K3 | 0,02 | Kg/Kg clinker |
| K4 | 0,02 | Kg/Kg clinker |
| K5 | 0,02 | Kg/Kg clinker |
| Pérdida estándar del enfriador Coolax | 100 | Kcal/Kg Clinker |
| Pérdida por radiación en superficie del horno | 54,1 | Kcal/Kg Clinker |
| Pérdida de radiación de las etapas del ciclón K1 | 2,8 | Kcal/Kg Clinker |
| Pérdida de radiación de las etapas del ciclón K2 | 3,0 | Kcal/Kg Clinker |
| Pérdida de radiación de las etapas del ciclón K3 | 3,0 | Kcal/Kg Clinker |
| Pérdida de radiación de las etapas del ciclón K4 | 4,6 | Kcal/Kg Clinker |
| Pérdida de radiación de las etapas del ciclón K5 | 8,0 | Kcal/Kg Clinker |

Fuente: FLSmidth Institute (2002).

Se toma en consideración los estados de referencia (R) del sistema del horno mediante la variación de los parámetros operacionales dentro de un cierto rango, manteniendo el resto de las variables en el valor que define el estado de referencia. De esta forma fue registrada la sensibilidad de los datos de

rendimiento[32] importantes en función de los parámetros de control.

Los indicadores del estado de referencia son:

- Consumo específico de calor CEC, Kcal/Kg de clinker.
- Temperatura del gas de salida del precalentador TGS, $^{o}C$.
- Consumo especifico de electricidad CEE.
- Los KWh/TM del exhaustor del horno.
- Pérdida de presión total del sistema de horno PPTSH en mm CA (mm de columna de agua).

La sensibilidad de los indicadores de rendimiento con respecto a los parámetros operacionales P están dados por la diferencia entre un estado "1" y un estado de referencia "R":

$$\frac{CEC(1) - CEC(R)}{P(1) - P(R)} \qquad \left[\frac{Kcal / Kgclin\,\mathrm{ker}}{\Delta P}\right]$$

$$\frac{TGS(1) - TGS(R)}{P(1) - P(R)} \qquad \left[\frac{^{\circ}C}{\Delta P}\right]$$

[32] Ver Anexo VII: Parámetros operacionales de sistemas de hornos.

El efecto absoluto calculado de un determinado cambio se puede convertir en un efecto relativo $R_i$ dividiendo por CEC(R) y TGS(R), respectivamente. Puesto que el consumo específico de electricidad del exhaustor del horno y la pérdida total de presión depende de la maquinaria instalada y de la geometría del ciclón, estas siempre se expresan en relación con el estado de (R).

$$\frac{CEE(1)-CEE(R)}{\frac{\frac{CEE(R)}{P(1)-P(R)}}{1}x100\%} \quad \left[\frac{\%}{\Delta P}\right]$$

$$\frac{PPTSH(1)-PPTSH(R)}{\frac{PPTSH(R)}{P(1)-P(R)}x100\%} \quad \left[\frac{\%}{\Delta P}\right]$$

Índices: (1): Después (R): Referencia

Cambio relativo:

$$RH_i = \frac{CEC(i)-CEC(R)}{CEC(R)} \qquad RH_i = \frac{TGS(i)-TGS(R)}{TGS(R)}$$

Si se considera el efecto combinado de diferentes cambios simultáneos, primero es necesario calcular el efecto $R_i$ relativo para cada una de las modificaciones consideradas. Entonces el efecto combinado se calcula así:

$$CEC_{después} = CEC_{antes} \times (1-RH_1) \times (1-RH_2) \times \ldots (1-RH_N)$$

$$= CEC_{antes} \times \eth_i (1 - RH_i)$$

$$CEE_{después} = CEE_{antes} \times (1 - RP_1) \times (1 - RP_2) \times \ldots (1 - RP_N)$$

$$= CEE_{antes} \times \eth_i (1 - RP_i)$$

En el Anexo VII se presenta los resultados de los parámetros operacionales del sistema de hornos basado en la metodología de FLSmidth, esta facilita los cálculos de pérdidas en el sistema del horno.

### 3.6.2 INDICADOR DE GESTIÓN ENERGÉTICA

Para Álvarez de Nóvales[33] los indicadores deben estar relacionados con los objetivos de la empresa y con los factores claves. La gestión adecuada de la energía debe permitir reducir los consumos específicos de calor, electricidad y los costos de producción. Para ello, se asigna el indicador:

- Costo total (US$) /Producción de Cemento (TM).

Adicionalmente se considera a:

- Consumo de electricidad (KWh)/Producción de cemento equivalente (TM).
- Consumo de calor (Kcal)/Producción de clinker (TM).

[33] Álvarez de Nóvales J. (1998) “Acción Estratégica” .

Estos indicadores se integran con los indicadores de gestión para obtener un nuevo indicador denominado Nivel de Excelencia Operativa, cuyo nivel se logra sobre 10 puntos (Puntaje logrado/10)[34].

## 3.7 MATRIZ DE AHORRO DE ENERGÍA

En el diagnóstico energético, se inspecciona las instalaciones, se toman datos de los procesos y de las variables de diseño, se tabula la información y se realiza la ponderación.

En la Matriz de Decisión para el diagnóstico energético se debe responder a la pregunta, ¿Qué tanto favorece al logro de los objetivos?

| Peso | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Importancia | No favorece | Muy poco | Poco | Regular | Mucho |

Se valora cada uno de los criterios de acuerdo a la importancia para la organización.

En la matriz se han considerado los criterios:

a. Costo de implementarla

[34]Metodología de indicador único, tomado en: www.tablero-comando.com

b. Beneficios que se obtendría

c. Tiempo que dura la implementación

d. Dificultad técnica de implementarla

e. Alineamiento con objetivos estratégicos

f. Ambiente, efectos al medio ambiente

g. Cliente, efectos a los clientes.

*"Lo que llamamos casualidad no es ni puede ser sino la causa ignorada de un efecto desconocido".*

*François Marie Arouet*

# CAPÍTULO IV

# RESULTADOS

## 4.1 MODELO DE GESTIÓN DE AHORRO DE ENERGÍA

### 4.1.1 GÉNESIS DEL MODELO

En las organizaciones se encuentran esfuerzos de muchas personas y áreas funcionales por lograr objetivos, a veces se encuentran sesgados hacia los objetivos personales de quienes lo lideran y no están alineados al logro de los objetivos de la organización, aun cuando las empresas pueden tener estrategias y políticas definidas, la comunicación y el compromiso de todos sus miembros no esta garantizado[35]. Este tipo de falencias requiere de modelos que permitan describir, analizar y predecir

[35] Markides C. (2000) "En la estrategia esta el éxito". Pág. 147-152.

alternativas de solución a problemáticas como el ahorro de la energía. Para lograr un modelo que afronte este reto, se recurre a un proceso participativo donde las acciones individuales y de las áreas funcionales, sean la fuente del logro de objetivos y estén focalizados en la visión de la organización.

El modelo también surgió del análisis de los diferentes casos que se presentaron en la empresa en estudio, como las continuas paralizaciones del proceso de clinkerización por obstrucciones en los ductos del Precalentador, pérdidas de calor en gases de escape, altos consumos de electricidad en los procesos de reducción de tamaño, pérdidas de energía por entradas de aire falso y pérdidas de calor por radiación en el horno. La necesidad de ahorrar energía, el análisis bajo un criterio sistémico y de relación causa efecto llevo a desarrollar las varias etapas del modelo.

### 4.1.2 ESTRUCTURA DEL MODELO

La estructura del modelo propuesto para el ahorro de energía esta dada en la figura 4.1

El modelo propuesto considera las etapas siguientes:

1. Análisis de la declaración de la misión y visión de la organización, permite enfocarse dentro de los objetivos organizacionales.
2. Revisión de los objetivos estratégicos y despliegue; buscando el compromiso de todos los miembros a través del alineamiento de los objetivos individuales a los organizacionales.
3. Definición de las relaciones de causa y efecto de los objetivos en las diversas perspectivas.
4. Definición de los alcances del objetivo “Ahorro Energético”, sus metas, indicadores e iniciativas estratégicas.
5. Determinación de la estrategia del ahorro de energía
   - Determinar el estado tecnológico y organizacional.
   - Determinar las fuentes de energía
   - Determinar proyectos estratégicos
6. Ejecución del Diagnostico Energético.
   - Definir condiciones reales y de diseño de los equipos y procesos.
   - Evaluar las diferencias entre valores de diseño y los datos reales.
   - Realizar una evaluación detallada de los consumos de energía por equipos.

- Comparar resultados con los de diseño.
- Determinar causas de las diferencias.
- Plantear alternativas de solución.
- Evaluación técnico económica.

7. Implementación de alternativas.
8. Evaluación y control de logros.
   - Comparar resultados con metas de objetivo estratégico.
9. Determinar el logro de Excelencia Operativa al cumplir los objetivos estratégicos y tener menores costos de fabricación.
   - Medición del nivel de excelencia operativa.

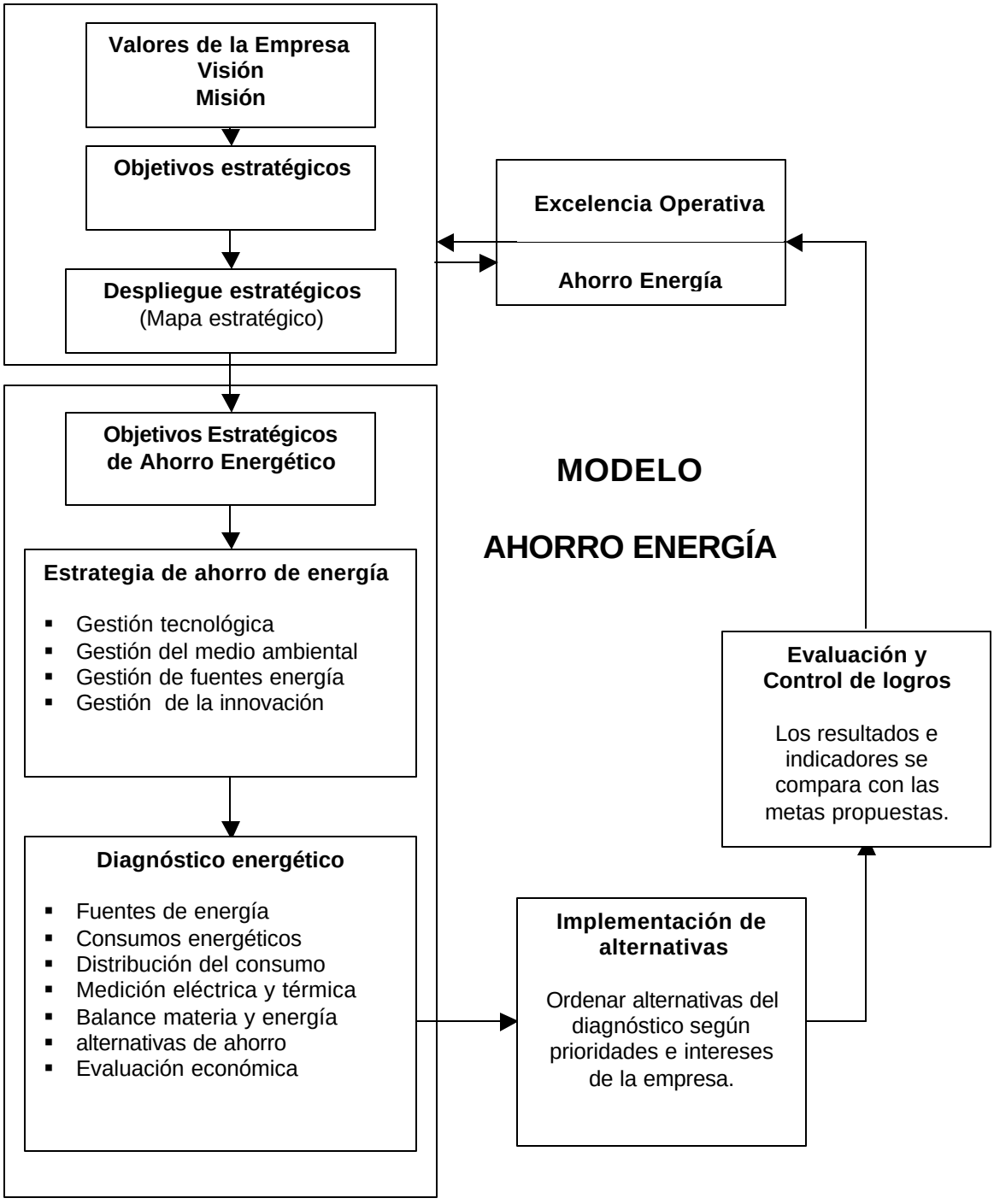



**Figura 4.1:** Modelo para el Ahorro de energía
Fuente: Elaboración propia

### 4.1.3 APLICACIÓN DEL MODELO EN LA INDUSTRIA CEMENTERA

**a. Valores de la Empresa**

Para lograr visualizar las interrelaciones de los objetivos organizacionales con los objetivos en los diversos niveles, se desarrolló el diagrama de la figura 4.2, al desplegar e informar los objetivos a los miembros de la organización, se busca el compromiso y puedan comprobar que sus esfuerzos se traducen en logros concretos, favoreciendo la cultura de ahorro de energía. De la misión y visión se desprende los objetivos estratégicos, como el caso de la empresa en estudio:

***Misión***

*Satisfacer a nuestros clientes suministrando productos y servicios de alta calidad y precios competitivos, protegiendo nuestros derechos empresariales dentro del marco legal y creando valor para nuestros accionistas, nuestros trabajadores y la sociedad en general.*

***Visión***

*Ser siempre una organización líder en el mercado nacional y alcanzar una posición competitiva a nivel mundial.*

**b. Objetivos estratégicos**

De la misión, valores y estrategias de la organización se despliega las relaciones causa efecto para los objetivos estratégicos.

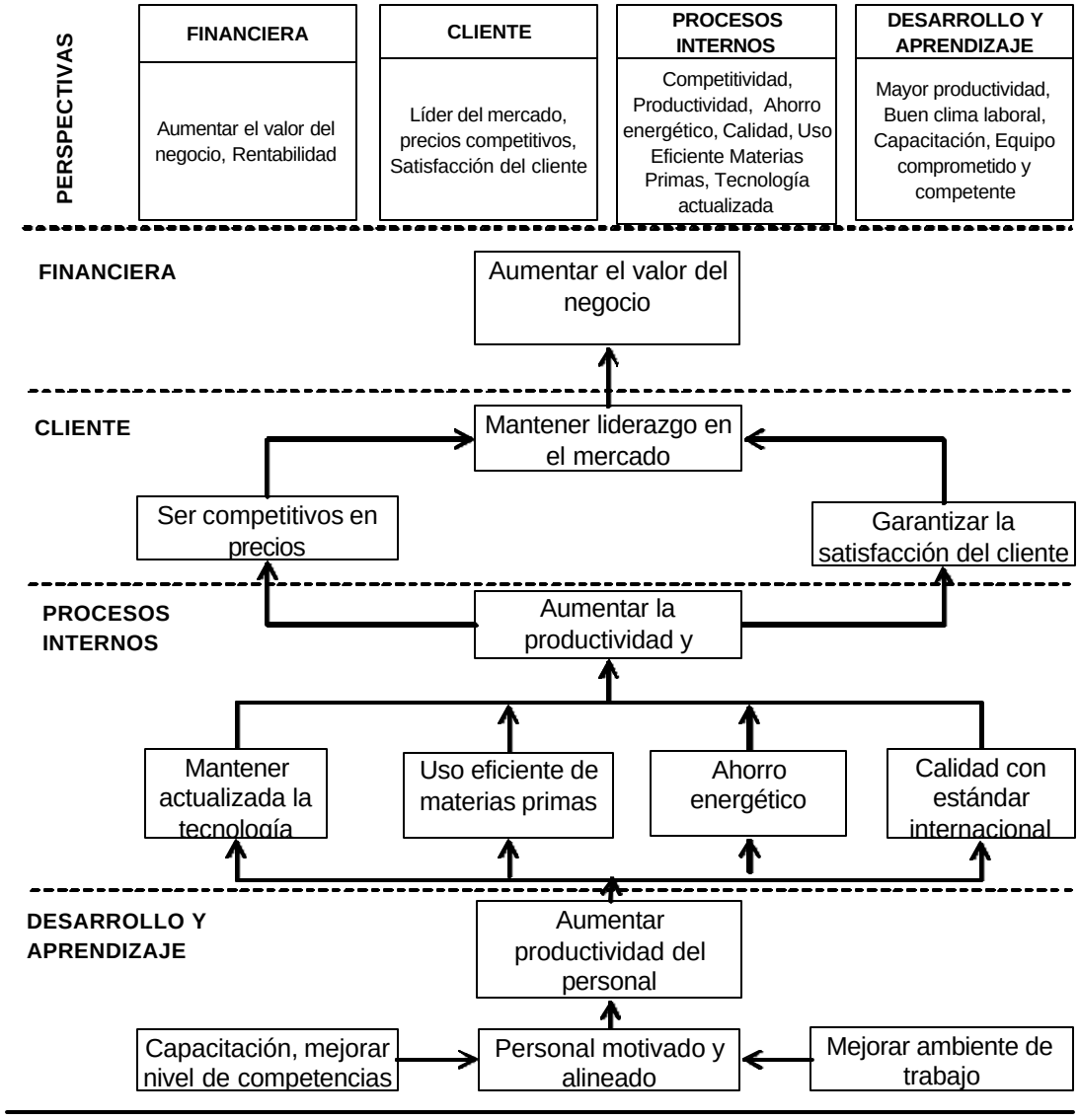



**Figura 4.2:** Diagrama Causa Efecto del despliegue de objetivos
Fuente: Elaboración propia

### c. Despliegue estratégico

El diagrama de causa efecto que despliega los objetivos a un nivel menor se muestra en la figura 4.3.

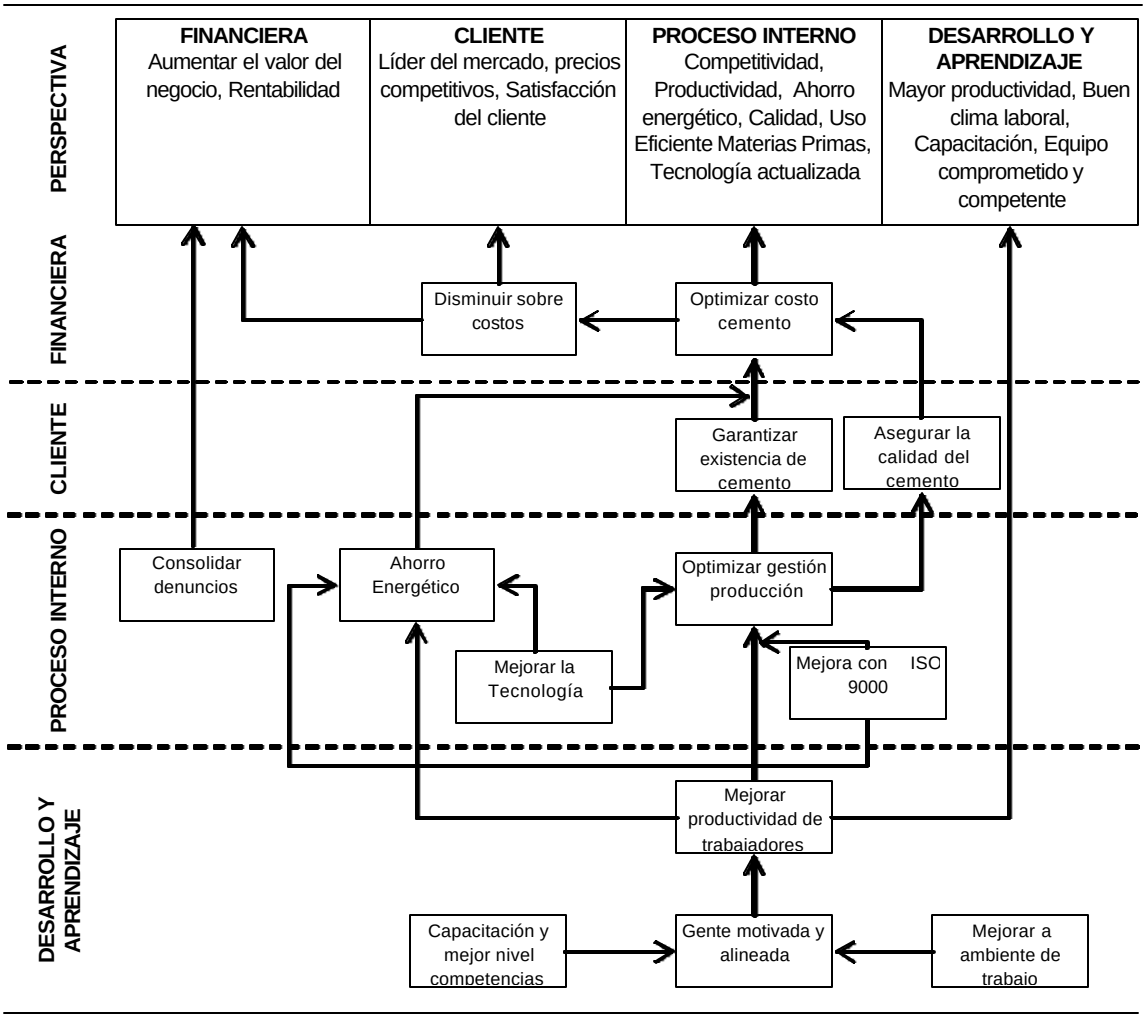



**Figura 4.3**: Diagrama Causa Efecto de objetivos estratégicos de Producción
Fuente: Elaboración propia

### d. Objetivo estratégico de ahorro energético

Para el objetivo de Ahorro de Energía, la gerencia de la empresa base del estudio propuso objetivos y metas que debían lograrse, en la tabla 4.1 se encuentra sus indicadores, metas e iniciativas necesarias para el logro de los objetivos.

**Tabla 4.1:** Metas del objetivo Ahorro de Energía

| Objetivos Estratégicos | Objetivo | Indicador | Meta | Iniciativa |
|---|---|---|---|---|
| Crecimiento económico<br>Líder en mercado<br>Satisfacción en el cliente<br>Ser competitivos<br>Productividad<br>Calidad | | | | |
| **Ahorro energético** | **Ahorro energético** | | | |
| | Reducir en Horno 1 | Kcal/Kg clinker | 810 Kcal/Kg | Auditoria energética y Programa monitoreo continuo. Revisar programas y contrato de tarifas eléctricas. Mejorar gestión mantenimiento. |
| | Reducir en Planta | kWh/TM equivalente | 105 KWh/TM equivalente | |
| | Reducir costo cemento | US$/TM cemento | -5% costo unitario | |
| | Reducir en molienda cemento | KWh/TM cemento | 30 KWh/TM | |
| | Cemento con adiciones | Cantidad/año | 1 | Capacitación |
| Empleados motivados y comprometido<br>Capacitación<br>Buen ambiente de trabajo | | | | |

Fuente: Elaboración propia

## e. Estrategias de Ahorro de Energía

**Tabla 4.2:** Iniciativas estratégicas en el proceso de fabricación del cemento

| Paso | Extracción Materia Prima | Trituración | Molienda Crudo | Horno Clinker | Molienda Cemento | Despacho | Cliente |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Objetivo | Obtener composición química requerida | Reducir tamaño de caliza y clasificarlo | Reducir tamaño del crudo y regular composición química | Obtener Clinker con Ahorro de energía | Reducir tamaño del clinker y adición yeso. Ahorro de energía | Pedido perfecto Ahorro de energía Reducir exceso de peso | Satisfacción del cliente |
| Indicador | %SO3<br>%Álcalis<br>%CaO<br>TM/día | Tamaño %<br>CaO<br>%SO3<br>KWh/TM | %RM200<br>Modulo Si<br>KWh/TM | Kcal/kg<br>KWh/TM<br>%cal libre TM<br>clink/día | Blaine, $cm^2/g$<br>$\%SO_3$<br>KWh/TM | NoConformes<br>KWh/TM<br>% exceso peso | Encuestas<br>Nuevos productos |
| Metas | <1,20%<br><0,90%<br>42,80%<br>18500 TM/día | <7,5cm<br>42,8%<1,5%<br>-5%KWh/TM | <30.0%<br>2,1%<br>-5%KWh/TM | 810 Kcal/Kg<br>-5%Kwh/TM<br><1,5%<br>4000 TM/día | 3100 $cm^2/g$<br>2,90% $SO_3$<br>-5%KWh/TM | -20% NC<br>-5%KWh/TM<br>-0,1% | 10%<br>1 |
| Inductor | Desarrollo de yacimientos | Dosificación, inspección | Procedimiento de molienda | Control de procesos | Control de procesos | Programa de coordinación de procesos | Programa post venta I&D |
| Iniciativa estratégica | Adquisición denuncios | Mejorar sistema muestreo | Plan de entrenamiento | Programa monitoreo continuo | Programa monitoreo continuo | Plan de coordinación | Servicio Post Venta Innovación |

Fuente: Elaboración propia

## f. Diagnóstico energético

Para la realización del Diagnóstico Energético, se revisó los diagramas de flujo, datos de diseño, los tipos de combustibles que son adquiridos, se revisó el proceso de fabricación en el Control Central y se realizaron mediciones e inspecciones de los equipos de planta. El diagnóstico se realizó en los procesos de clinkerización y molienda de cemento por ser los consumidores del 96,3% de la energía, los otros procesos como la trituración, molienda de crudo, despacho y equipos auxiliares representan solo el 3,7% de la energía (Anexo XIV). De este diagnóstico se desarrollaron las matrices de decisión, dadas en la tabla 4.3. En los anexos del VI al XXI se muestran los principales cálculos y resultados del diagnóstico.

**Tabla 4.3:** Matriz de Decisión de Diagnóstico Energético para Clinkerización, Molienda, Gestión y Productos

**DIAGNÓSTICO EN CLINKERIZACIÓN**

| | | | Criterios | 1. Costo | 2. Beneficio | 3. Tiempo ejecución | 4. Dificultad implantación | 5. Alineamiento con estrategia | 6. Ambiente | 7. Cliente | Total puntos alternativa | Total puntos alternativas |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Tipo mejora** | | **Observaciones** | **Alternativas de mejora** | **25%** | **10%** | **15%** | **15%** | **10%** | **10%** | **15%** | | **100%** |
| Sin inversión | | Llama inestable poco potente, temperatura de sinterización variable | Regular aire primario, axial y radial | 5 | 3 | 5 | 4 | 5 | 4 | 3 | 29 | 4,25 |
| | | Variaciones en el exceso aire, en entrada a horno | Regular exceso de aire, relación aire - combustible | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 31 | 4,50 |
| | | Temperatura de gases mayor al promedio anual y de diseño | Regular temperatura gases escape con ajuste operativo | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 29 | 4,20 |
| | | Variaciones temperatura aire secundario y en aire a salida enfriador | Ajuste operativo del enfriador | 5 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 27 | 3,95 |
| | | Entrada de aire falso por ventanas del pre calentador | Cerrar ventanas inspección y repararlas | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 29 | 4,15 |
| | | Presencia de CO en gases escape | Regular fineza del carbón | 5 | 3 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 27 | 4,00 |
| | | Alto consumo de calor y muchas variables fuera de parámetros | Mejorar supervisión | 5 | 3 | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 28 | 4,15 |
| | | Fajas trabajando sin llevar material | Adaptar programa PLC evitar trabajos en vació | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 28 | 4,15 |
| Con Inversión | Baja | Temperaturas altas en superficie de carcasa de horno | Mejorar refractarios de horno | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 29 | 4,10 |
| | Baja | Alta participación de energía térmica en costos de fabricación | Usar pet coque | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 28 | 4,10 |
| | Baja | Entrada de aire falso por sello deficiente a entrada del horno | Cambiar sello entrada horno | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 | 27 | 3,80 |
| | Baja | Entrada de aire falso por sello deficiente en salida de horno | Cambiar sello salida horno | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 | 27 | 3,80 |
| | Baja | Diferencia en composición química del material en Pre Homogenización y del crudo | Instalar muestreador automático para caliza, reducir variaciones en composición | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 3 | 24 | 3,50 |
| | Baja | Durante inspección, limpieza y descostres en el precalentador, entra aire falso | Descostre del precalentador, bomba agua alta presión | 3 | 2 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 25 | 3,55 |
| | Baja | Existencia de desechos, bolsas rotas, maderas, aceites usados, fajas, mangas, filtros | Uso combustibles alternos | 4 | 2 | 3 | 3 | 5 | 4 | 3 | 24 | 3,45 |
| | Medio | Múltiples paradas por atoros y variación de la succión en horno y precalentador. | Regular RAS en crudo | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 32 | 4,45 |
| | Medio | Entrada de aire de dos compresoras con crudo de alimentación | Instalar elevador por transporte neumático de crudo | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 3 | 28 | 3,95 |
| | Medio | Paradas imprevistas por deterioro de refractarios y atoros del enfriador | Instalar scanner para control temperatura del casco de horno | 3 | 2 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 25 | 3,55 |
| | Medio | Paradas prolongadas del horno por descostre, desenladrillado y cambio refractario | Adquirir equipo descostre automático, reducir paradas | 5 | 2 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 27 | 4,05 |
| | Medio | Presencia de CO y exceso de aire | Cambiar quemador principal | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 3 | 23 | 3,10 |
| | Medio | Excesivo consumo electricidad y bajos consumos de aire de ventiladores enfriador. | Instalar variadores velocidad a ventiladores enfriador | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 27 | 3,85 |
| | Medio | Ciclón 39 sin ducto de inmersión, grado descarbonatacion diferente a parámetro | Ducto de inmersión ciclón 39, pérdida eficiencia precalentador | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 3 | 3 | 27 | 3,85 |
| | Alta | Diseño de ciclón 37 para mezcla y no como ción para separación e intercambio calor | Nuevo diseño ciclón 37 | 2 | 4 | 2 | 4 | 5 | 3 | 3 | 23 | 3,05 |
| | Alta | Muchas interrupciones de Electrofiltro por variación de CO. Alto consumo de electricidad | Filtro de mangas por electrofiltro | 1 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 21 | 2,65 |

**DIAGNÓSTICO DEL PRODUCTO**

| | | | Criterios | 1. Costo | 2. Beneficio | 3. Tiempo ejecución | 4. Dificultad implantación | 5. Alineamiento con estrategia | 6. Ambiente | 7. Cliente | Total puntos alternativa | Total puntos alternativas |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Tipo de mejora** | | **Observaciones** | **Alternativa de mejora** | **25%** | **10%** | **15%** | **15%** | **10%** | **10%** | **15%** | | **100%** |
| Con inversión | Baja | Resistencia del cemento muy encima de parámetros | Aumentar la calidad de productos | 2 | 2 | 3 | 3 | 5 | 3 | 3 | 21 | 2,85 |
| | Alta | Solo dos tipos cemento al mercado | Aumentar variedad de tipos de cemento | 2 | 2 | 2 | 3 | 5 | 3 | 3 | 20 | 2,70 |
| | Alta | Alto contenido clinker en cemento, mucha energía | Sustituir el clinker en el cemento | 3 | 4 | 2 | 3 | 5 | 5 | 3 | 25 | 3,35 |
| Sin Inversión | | Trabajo en vació diversos auxiliares | Programar PLC parar fajas, elevadores al para molienda | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 27 | 3,90 |
| | | Variaciones en finezas y rendimientos | Programar calibración balanzas, aplicar control estadístico | 4 | 2 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 27 | 3,95 |

**DIAGNÓSTICO EN LA GESTIÓN**

| | | | Criterios | 1.Costo | 2.Beneficio | 3. Tiempo ejecución | 4. Dificultad implantación | 5. Alineamiento con estrategia | 6. Ambiente | 7. Cliente | Total puntos alternativa | Total puntos alternativas |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tipo de mejora | | Observaciones | Alternativa de mejora | 25% | 10% | 15% | 15% | 10% | 10% | 15% | | 100% |
| Sin inversión | | Redundancia en motivos de paradas | Adiestramiento, reducir tiempos de paradas | 4 | 3 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 27 | 3,85 |
| | | Poco conocimiento de los objetivos | Alinear objetivos estratégicos | 4 | 4 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 | 27 | 3,80 |
| | | Ruido, calor, gases y polvo en el ambiente | Concienciar control medio ambiente | 3 | 2 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 24 | 3,30 |
| | | Exceso de capacidad de equipos y trabajan en Horas Punta | Programar trabajos fuera hora punta | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 27 | 3,85 |
| | | Cliente tarifa libre | Buscar mejora de tarifa SICN | 5 | 3 | 3 | 2 | 5 | 3 | 3 | 24 | 3,55 |
| | | Hay equipos que trabajan en horas punta | Mejor programa de utilización GEA y de producción | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 3 | 24 | 3,35 |
| Con inversión | Baja | Muchas paradas previsibles y demoras en solucionar problemas | TPM, reducir numero de paradas | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 | 27 | 3,80 |
| | Media | Procedimiento e información de incidentes sin acceso a todos | Mejor acceso a la información | 3 | 2 | 4 | 3 | 5 | 3 | 3 | 23 | 3,25 |
| | Media | Diversos contratistas, hacen de todo y no conocen objetivos de la organización | Desarrollar a los proveedores | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 3 | 23 | 3,25 |
| | Media | Muchas paradas previsibles, personal con poco nivel técnico | Fortalecer el mejoramiento continuo | 3 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 23 | 3,15 |
| | Media | Los consumos de electricidad poco conocidos, estiman nivel de consumo | Medidores de electricidad | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 3 | 23 | 3,20 |

**DIAGNÓSTICO EN MOLIENDA CEMENTO**

| | | | Criterios | 1.Costo | 2.Beneficio | 3. Tiempo ejecución | 4. Dificultad implantación | 5. Alineamiento con estrategia | 6. Ambiente | 7. Cliente | Total puntos alternativa | Total puntos alternativas |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tipo de mejora | | Observaciones | Alternativa de mejora | 25% | 10% | 15% | 15% | 10% | 10% | 15% | | 100% |
| Con Inversión | Baja | Tiempo de respuesta a cambios en variables de molienda muy largo, más de 30 min. | Granulómetro láser en línea, regulación oportuna de finezas | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 25 | 3,50 |
| | Media | Observación de clientes, cemento aglomerado | Aditivo de molienda y empaque | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 22 | 3,05 |
| | Media | Poca reducción de tamaño en primera cámara | Diafragma intermedio de molino | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 21 | 2,90 |
| | Media | Reducción continua de succión en molino | Mangas de colectores | 3 | 2 | 2 | 4 | 5 | 4 | 3 | 23 | 3,20 |
| | Alta | Poca reducción de tamaño en primera cámara | Cambio de corazas de cámara 1 de molino bolas | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 3 | 19 | 2,60 |
| | Alta | Reducción continua de succión en molino | Colectores de aire reverso | 3 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 23 | 3,15 |
| | Alta | Variación de granulometría de materiales y rendimiento de equipos de molienda | Trituradora de materiales | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 21 | 2,85 |
| Sin Inversión | | Aumento consumo específico de electricidad | Diseño cuerpos moledores | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 3 | 3 | 25 | 3,60 |
| | | Alto consumo energía en molino bolas a mayor finezas | Molienda combi, bolas y prensa de acuerdo a tipo cemento | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 29 | 4,15 |
| | | Variaciones no explicadas en finezas del cemento | Control estadístico de proceso | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 27 | 3,90 |

**Fuente**: Elaboración propia

**Tabla 4.4:** Matriz de priorización del Diagnóstico Energético para Clinkerización, Molienda, Gestión y Productos.

**DIAGNÓSTICO EN CLINKERIZACIÓN**

| Tipo mejora | | Observaciones | Alternativas de mejora | Puntaje |
|---|---|---|---|---|
| Sin inversión | | Variaciones en el exceso aire, en entrada a horno | Regular exceso de aire, relación aire - combustible | **4,50** |
| | | Combustión irregular, llama variable | Mantener temperatura del petróleo | **4,30** |
| | | Llama inestable poco potente, temperatura de sinterización variable | Regular aire primario, axial y radial | **4,25** |
| | | Temperatura de gases mayor al promedio anual y de diseño | Regular temperatura gases escape con ajuste operativo | **4,20** |
| | | Fajas trabajando sin llevar material | Adaptar programa PLC evitar trabajos en vació | **4,15** |
| | | Entrada de aire falso por ventanas del pre calentador | Cerrar ventanas inspección y repararlas | **4,15** |
| | | Alto consumo de calor y muchas variables fuera de parámetros | Mejorar supervisión | **4,15** |
| | | Presencia de CO en gases escape | Regular fineza de carbón y mantener en 120$^{o}$C temp. del petróleo. | **4,00** |
| | | Variaciones temperatura aire secundario y en aire a salida enfriador | Ajuste operativo del enfriador | **3,95** |
| | | Bajo grado descarbonatación | Ajustar fineza del crudo | **3,55** |
| Con Inversión | Medio | Múltiples paradas por atoros y variación de la succión en horno y precalentador. | Regular RAS en crudo | **4,45** |
| | Baja | Alta participación de energía térmica en costos de fabricación | Usar pet coque | **4,10** |
| | Baja | Temperaturas altas en superficie de carcasa de horno | Mejorar refractarios de horno | **4,10** |
| | Medio | Paradas prolongadas del horno por descostre, desenladrillado y cambio refractario | Adquirir equipo descostre automático, reducir paradas | **4,05** |
| | Medio | Entrada de aire de dos compresoras con crudo de alimentación | Instalar elevador por transporte neumático de crudo | **3,95** |
| | Medio | Excesivo consumo electricidad y bajos consumos de aire de ventiladores enfriador. | Instalar variadores velocidad a ventiladores enfriador | **3,85** |
| | Medio | Ciclón 39 sin ducto de inmersión, grado descarbonatación diferente a parámetro | Ducto de inmersión ciclón 39, pérdida eficiencia precalentador | **3,85** |
| | Baja | Entrada de aire falso por sello deficiente a entrada del horno | Cambiar sello entrada horno | **3,80** |
| | Baja | Entrada de aire falso por sello deficiente en salida de horno | Cambiar sello salida horno | **3,80** |
| | Baja | Durante inspección, limpieza y descostres en el precalentador, entra aire falso | Descostre del precalentador, bomba agua alta presión | **3,55** |
| | Medio | Paradas imprevistas por deterioro de refractarios y atoros del enfriador | Instalar scanner para control temperatura del casco de horno | **3,55** |
| | Baja | Diferencia en composición química del material en Pre Homogenización y del crudo | Instalar muestreador automático, reducir variaciones en composición | **3,50** |
| | Baja | Existencia de residuos, bolsas rotas, maderas, aceites usados, fajas, mangas, filtros | Uso combustibles alternos | **3,45** |
| | Medio | Presencia de CO y exceso de aire | Cambiar quemador principal | **3,10** |
| | Alta | Diseño de ciclón 37 para mezcla y no como ciclón para separación e intercambio calor | Nuevo diseño ciclón 37 | **3,05** |
| | Alta | Muchas interrupciones de Electrofiltro por variación de CO. Alto consumo de electricidad | Filtro de mangas por electrofiltro | **2,65** |

**DIAGNÓSTICO EN MOLIENDA CEMENTO**

| Tipo de mejora | | Observaciones | Alternativa de mejora | Puntaje |
|---|---|---|---|---|
| Con Inversión | Alta | Varia rendimientos y finezas | Automatizar lazos de control de molienda | **3,75** |
| | Baja | Lenta respuesta para cambios en variables de molienda, más de 30 minutos | Granulómetro láser en línea, regulación oportuna de finezas | **3,50** |
| | Media | Reducción continua de succión en molino | Mangas de colectores | **3,20** |
| | Alta | Reducción continua de succión en molino | Colectores de aire reverso | **3,15** |
| | Media | Observación de clientes, cemento aglomerado | Aditivo de molienda y empaque | **3,05** |
| | Media | Poca reducción de tamaño en primera cámara | Diafragma intermedio de molino | **2,90** |
| | Alta | Variación de granulometría de materiales y rendimiento de equipos de molienda | Trituradora de materiales | **2,85** |
| | Alta | Poca reducción de tamaño en primera cámara | Cambio de corazas de cámara 1 de molino bolas | **2,60** |
| | Alta | Varia rendimientos y finezas | Sistema experto de molienda | **2,80** |
| Sin Inversión | | Alto consumo energía en molino bolas a mayor finezas | Molienda combi, bolas y prensa de acuerdo a tipo cemento | **4,15** |
| | | Variaciones no explicadas en finezas del cemento | Control estadístico de proceso | **3,90** |
| | | Aumento consumo específico de electricidad | Diseño cuerpos moledores | **3,60** |

**DIAGNÓSTICO EN LA GESTIÓN**

| Tipo de mejora | | Observaciones | Alternativa de mejora | Puntaje |
|---|---|---|---|---|
| Sin inversión | | Exceso de capacidad de equipos y trabajan en Horas Punta | Programar trabajos fuera hora punta | **3,85** |
| | | Redundancia en motivos de paradas | Adiestramiento, reducir tiempos de paradas | **3,85** |
| | | Poco conocimiento de los objetivos | Alinear objetivos estratégicos | **3,80** |
| | | Cliente tarifa libre | Buscar mejora de tarifa SICN | **3,55** |
| | | Hay equipos que trabajan en horas punta | Mejor programa de utilización GEA y de producción | **3,35** |
| | | Ruido, calor, gases y polvo en el ambiente | Concienciar control medio ambiente | **3,30** |
| Con inversión | Baja | Muchas paradas previsibles y demoras en solucionar problemas | TPM, reducir numero de paradas | **3,80** |
| | Media | Procedimiento e información de incidentes sin acceso a todos | Mejor acceso a la información | **3,25** |
| | Media | Diversos contratistas, hacen de todo y no conocen objetivos de la organización | Desarrollar a los proveedores | **3,25** |
| | Media | Los consumos de electricidad poco conocidos, estiman nivel de consumo | Medidores de electricidad | **3,20** |
| | Media | Muchas paradas previsibles, personal con poco nivel técnico | Fortalecer el mejoramiento continuo | **3,15** |

**DIAGNÓSTICO DEL PRODUCTO**

| Tipo de mejora | | Observaciones | Alternativa de mejora | |
|---|---|---|---|---|
| Con inversión | Alta | Alto contenido clinker en cemento, mucha energía | Sustituir el clinker en el cemento | **3,35** |
| | Baja | Resistencia del cemento muy encima de parámetros | Aumentar la calidad de productos | **2,85** |
| | Alta | Solo dos tipos cemento al mercado | Aumentar variedad de tipos de cemento | **2,70** |
| Sin Inversión | | Variaciones en finezas y rendimientos | Programar calibración balanzas, aplicar control estadístico | **3,95** |
| | | Paradas de equipos por motivos redundantes | TPM reducir paradas imprevistas | **3,85** |
| | | Trabajo en vació diversos auxiliares | Programar PLC parar fajas, elevadores al para molienda | **3,90** |

**Fuente**: Elaboración propia

Según el diagnóstico efectuado, la influencia del mantenimiento es una condición crítica por la redundancia en motivos de paradas indicadas en el diagnóstico de la gestión con un puntaje mayor de 3,85. Esto se representa en la figura 4.4.

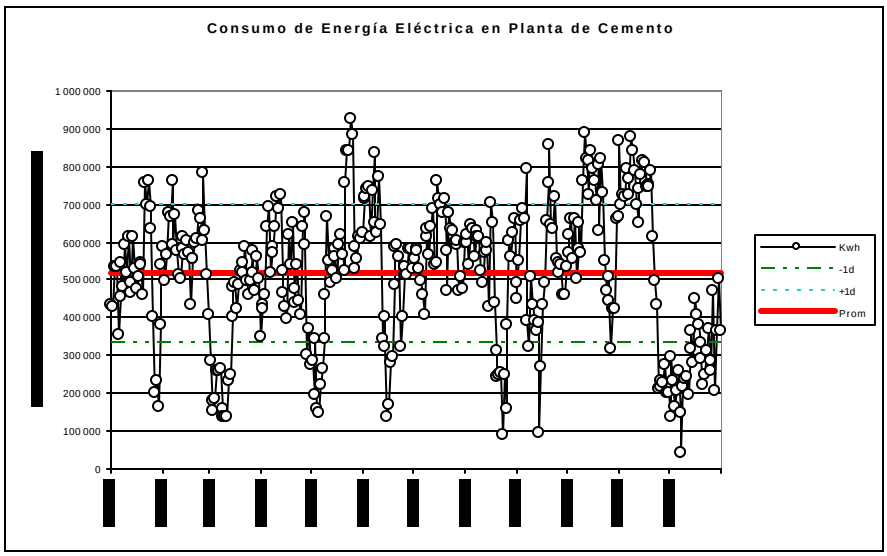



**Figura 4.4**: Consumo total energía Eléctrica en planta de cemento, 2003
Fuente: Elaboración propia

El modelo que se plantea integra las actividades de todas las operaciones de la empresa en estudio. En la adquisición de los combustibles y durante su utilización se realiza el control de sus características físicas y químicas. La energía eléctrica es medida en la acometida de las líneas de la empresa distribuidora, además los principales equipos disponen de medidores, realizándose mediciones diarias.

Se efectuó balances de materia y energía al proceso de clinkerización y se comparó con los datos de diseño, los resultados de las brechas surgidas entre el valor real y nominal, permitieron un análisis para determinar sus causas y recomendar alternativas de solución.

**g. Implementación de alternativas**

Las alternativas fueron escogidas de la matriz de decisión para luego evaluarse económicamente.

La alternativa de cambio de tipo de refractario en el horno, se llevó a la práctica, coordinándose con el fabricante

Refractechnik[36] para disponer de un refractario en base a magnesita y espinela y con aire como aislante (ver anexo IX).

La alternativa de modificación de la harina cruda, se efectuó regulando la relación álcalis sulfatos, denominado como RAS (ver anexo XII).

La tabla 4.5 muestra los resultados del análisis de ahorro de energía en la clinkerización y molienda, también muestra la inversión requerida y los ahorros económicos a lograr. Ver detalles de cálculos en los anexos.

[36] REFRATECHNIK, fabricante de materiales refractarios, principalmente dedicado a la industria del cemento, actualmente Refratechnik es Holding GMBH en Munich, Alemania.

**Tabla 4.5:** Ahorro de energía en la clinkerización y molienda de cemento

| MODIFICACIONES | Pérdidas de calor | | Pérdidas de electricidad | | Ahorros | Inversión implementar |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Kcal/Kg | $/día | KWh/TM | $/día | $/año | $ |
| **Aire falso en el sello de salida del horno** | 6,03 | 288 | 0,18 | 40 | **59 009** | 76 500 |
| **Aire falso con la alimentación de crudo** | 1,17 | 56 | 0,72 | 159 | **64 623** | 318 000 |
| **Aire falso por ventanas mal cerradas o deterioradas** | 0,96 | 46 | 0,12 | 27 | **22 007** | 7 500 |
| **Aire falso en el sello a entrada del horno** | 15,44 | 737 | 1,97 | 439 | **211 548** | 134 000 |
| **Ciclón 39, caída del ducto de inmersión** | 3,60 | 172 | 0,35 | 77 | **82 483** | 218 000 |
| **Aire primario, cambio a nuevo diseño de quemador** | 5,83 | 278 | 0,17 | 37 | **94 744** | 299 000 |
| **Enfriador, cambio a nuevo sistemas de placas en primer cuerpo** | 13,89 | 663 | 0,42 | 93 | **226 623** | 495 000 |
| **Calor por radiación en superficie horno, cambio refractario** | 12,62 | 573 | | | **172 040** | 8 673 |
| **CO en electrofiltro, mejora en control combustión, bajar 0,25%** | 12,14 | 956 | | | **286 720** | 0 |
| **Temperatura gases escape, reducción de 5$^{o}$C** | 2,77 | 132 | | | **39 651** | 0 |
| **Reducción del RAS en el crudo** | | | | | **3 353 112** | 2 450 736 |
| **Ahorro por mejor programa de uso de energía eléctrica en Horas Punta** | | | | | **42 027** | 0 |
| **Molienda Combi y nuevo diseño bolas en el molino** | | | 8,32 | 693 | **132 917** | 3 442 |
| **Ahorros US$** | | **3 901** | | **1 566** | **4 787 503** | **4 010 851** |
| **Pérdidas de Energía** | 74,46 | | 12,25 | | | |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.6:** Evaluación económica del cambio de refractario al horno 1

**Flujo de caja económico: proyección de ingresos y gastos**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Datos Básicos** | | | | | |
| Inversión | 16 373 | $ | | | |
| Valor residual | 0,0% | | | | |
| Costo mantenimiento | 800 | $ | | | |
| Costo instalación refractario | 7 700 | $ | | | |
| Costo capital | 12,0% | | | | |
| | | | | | |
| Ahorro | 172 040 | $ | | | |
| Costo puesta en marcha | 399 200 | $ | | | |
| Producción día | 3 992 | TM/d | | | |
| Tiempo puesta en marcha | 5 | d | | | |
| Precio del clinker | 20 | $/TM | 6,195 | TM/ml | |
| Precio refractario | 1 150 | $/TM | 86,73 | TM/ml | |
| Instalación refractario | 550 | $/ml | | | |
| Longitud en horno, cambio refractario | 14 | m | | | |

**Evaluación**

| **Año** | **2001** | **2002** | **2003** | **2004** | **2005** |
|---|---|---|---|---|---|
| Inversión | -16 373 | | | | |
| Ahorro | | 172 040 | 172 040 | 172 040 | 172 040 |
| Costo fijo | | -8 500 | -800 | -800 | -800 |
| Puesta en marcha | | -399 200 | | | |
| Valor residual | | | | | 0 |
| **Flujo caja** | -16 373 | -235 660 | 171 240 | 171 240 | 171 240 |
| **Flujo acumulado** | -16 373 | -252 033 | -80 793 | 90 447 | 261 687 |

| | | |
|---|---|---|
| **TIR** | **44%** | |
| **PAY - BACK** | **2,3** | años |
| **C/B** | **8,6** | |
| **VNA** | **$ 140 439** | |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.7:** Evaluación económica del utilizar otra caliza para regular el RAS

**Flujo de caja económico: proyección de ingresos y gastos**

## Datos Básicos

| | | |
|---|---|---|
| Inversión | 2 450 736 | $ |
| Valor residual | 0,0% | |
| Costo fijo | 2 450 736 | $ |
| Costo capital | 12,0% | |
| | | |
| Ahorro | 3 353 112 | $ |
| Costo puesta en marcha | 0 | $ |
| Producción día | 3 992 | TM/d |
| Tiempo puesta en marcha | 0 | d |
| Precio clinker | 20 | $/TM |

## Evaluación

| Año | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Inversión | -2 450 736 | | | | | | | | | | |
| Ahorro | | 3 353 112 | 3 353 112 | 3 353 112 | 3 353 112 | 3 353 112 | 3 353 112 | 3 353 112 | 3 353 112 | 3 353 112 | 3 353 112 |
| Costo fijo | | -2 450 736 | -2 450 736 | -2 450 736 | -2 450 736 | -2 450 736 | -2 450 736 | -2 450 736 | -2 450 736 | -2 450 736 | -2 450 736 |
| Puesta en marcha | | 0 | | | | | | | | | |
| Valor residual | | | | | | | | | | | 0 |
| **Flujo caja** | -2 450 736 | 902 376 | 902 376 | 902 376 | 902 376 | 902 376 | 902 376 | 902 376 | 902 376 | 902 376 | 902 376 |
| **Flujo acum.** | -2 450 736 | -1 548 360 | -645 984 | 256 392 | 1 158 768 | 2 061 144 | 2 963 520 | 3 865 896 | 4 768 272 | 5 670 648 | 6 573 024 |

| | | |
|---|---|---|
| **TIR** | **35%** | |
| **PAY - BACK** | **2,2** | años |
| **C/B** | **1,1** | |
| **VNA** | **$ 2 647 890** | |

Fuente: Elaboración propia

Un resumen gráfico de la tasa de retorno de inversión para las alternativas encontradas en el diagnóstico energético se muestra en la figura 4.5.

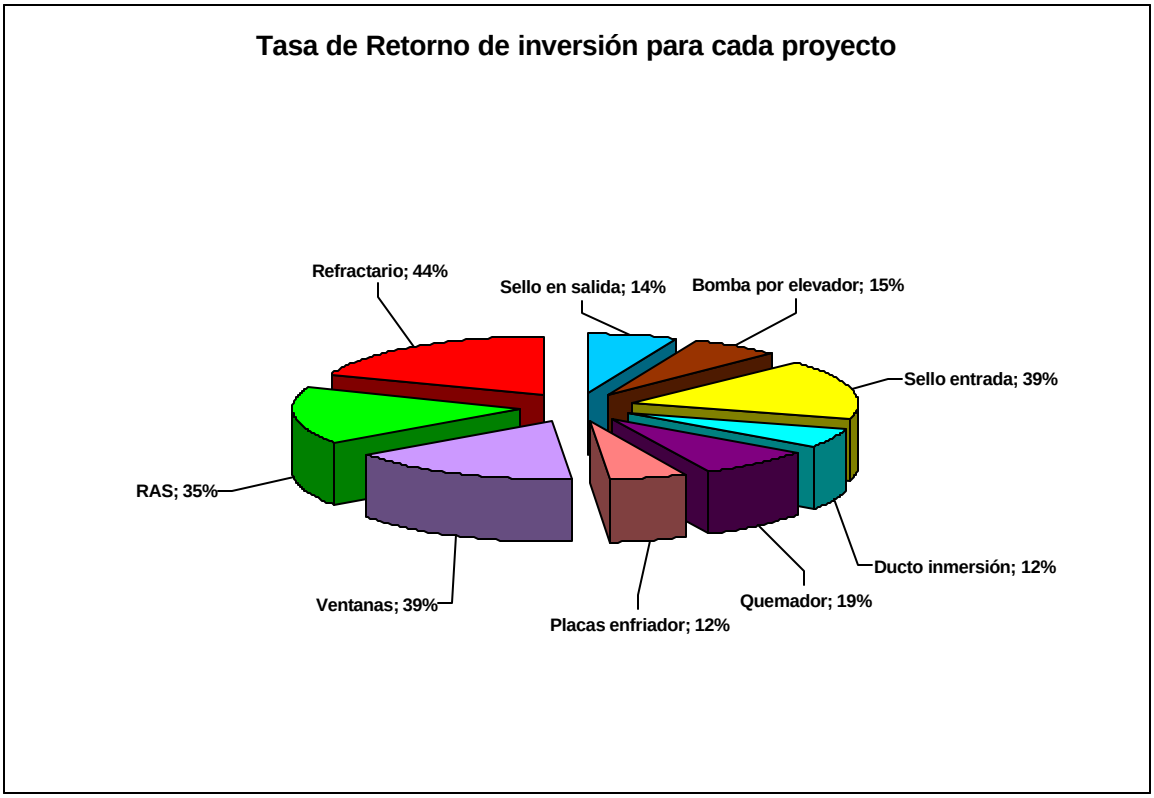



**Figura 4.5**: Tasa de retorno de inversión de las alternativas
Fuente: Elaboración propia

De la evaluación técnico económico de las alternativas de inversión, en la tabla 4.8 esta resumido los resultados del ahorro de energía de las alternativas propuestas. El resultado económico si todos los proyectos se ejecutan:

TIR: 43%

VNA: US$ 6 829 417

**Tabla 4.8:** Resultado del Ahorro de Energía

| MODIFICACIONES | Ahorro US$/año | Ahorro US$/TM | Inversión US$ |
|---|---|---|---|
| Reducción del RAS en la harina cruda de alimentación | 3 353 112 | 3,13 | 2 450 736 |
| CO en gases a electrofiltro, mejora en la combustión, bajar 0,25% | 286 720 | 0,27 | 0 |
| Enfriador, cambio a nuevo sistemas de placas en primer cuerpo | 226 623 | 0,21 | 495 000 |
| Aire falso en el sello a entrada del horno | 211 548 | 0,20 | 134 000 |
| Calor por radiación en superficie horno, cambio a nuevo refractario | 172 040 | 0,16 | 8 673 |
| Molienda Combinada y nuevo diseño bolas en el molino | 132 917 | 0,12 | 3 442 |
| Aire primario, cambio a nuevo diseño de quemador | 94 744 | 0,09 | 299 000 |
| Ciclón 39, caída del ducto de inmersión, reinstalar | 82 483 | 0,08 | 218 000 |
| Aire falso, ingreso con la alimentación de la harina cruda | 64 623 | 0,06 | 318 000 |
| Aire falso, ingreso por el sello de salida del horno | 59 009 | 0,06 | 76 500 |
| Ahorro por mejor programa de uso energía eléctrica en Horas Punta | 42 027 | 0,04 | 0 |
| Temperatura gases escape, reducción en 5 $^{o}$C | 39 651 | 0,04 | 0 |
| Aire falso por ventanas mal cerradas o deterioradas | 22 007 | 0,02 | 7 500 |
| **Ahorros en el año, US$** | **4 787 503** | 4,47 | 3 692 851 |
| **Clinker TM/año** | **1 018 500** | | |
| **Cemento TM/año** | **1 072 105** | | |
| **Ahorro US$/TM de cemento** | **4,47** | | |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.9:** Costo de fabricación del cemento

| | US$/TM | % |
|---|---|---|
| **Costo variable** | 25,63 | 78,1 |
| **Costo fijo** | 7,20 | 21,9 |
| **Costo total** | **32,83** | **100,0** |

Fuente: Elaboración propia

## h. Evaluación y control de logros

Con la implementación de las propuestas, mostradas en la tabla 4.8 Resultados de Ahorro de Energía, se obtendría 4,47 US$/TM de ahorro, que representa el 13,6% de reducción del costo unitario de fabricación del cemento.

La comprobación de lograr ahorros económicos con el Modelo de Ahorro Energético se da en la tabla 4.10.

**Tabla 4.10:** Comprobación de ahorros

| Condición | Inicial | Final | Mejora |
|---|---|---|---|
| **Costo variable, US$/TM** | 25,63 | 21,16 | **4,47** |
| **Costo fijo, US$/TM** | 7,20 | 7,20 | **0,00** |
| **Costo total, US$/TM** | **32,83** | **28,36** | **4,47** |

Fuente: Elaboración propia

La implementación de las propuestas de regular el RAS y utilizar refractarios con aislante de aire para la reducción de las pérdidas de calor por radiación en el horno fue de US$3,29 por tonelada de cemento, teniéndose 10,0% de reducción en el costo unitario del cemento.

### i. Excelencia operativa

Para determinar el nivel de excelencia operativa se desarrolló el índice "Nivel de Excelencia Operativa" que considera el efecto de la calidad de los materiales, nivel de mantenimiento, seguridad, costo de fabricación y consumos específicos de calor y electricidad. La tabla 4.11 muestra los indicadores y factores para la obtención del nivel de excelencia operativa. Estos indicadores, actualmente forman parte del cuadro de control de la empresa base del estudio.

**Tabla 4.11**: Indicador de Excelencia Operativa con ahorro energético

| INDICADOR | Meta | Logro | Peso Relativo | variación | Factores | | | | Puntos | Valor ponderado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | LP | AP | L% | R | | |
| **Kcal/kg clinker tipo I** | 693 | **773** | 15,0 | 90 | 7 | 10 | 80 | 20 | 8,45 | 1,27 |
| **Trituración Primaria, KWh/TM** | 0,30 | **0,31** | 0,5 | 97 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,52 | 0,05 |
| **Trituración Secundaria, KWh/TM** | 2,10 | **2,01** | 1,0 | 104 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,67 | 0,11 |
| **Molienda Crudo, KWh/TM** | 17,80 | **18,53** | 2,5 | 96 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,41 | 0,24 |
| **Clinkerización, KWh/TM** | 35,50 | **31,40** | 5,0 | 113 | 10 | 13 | 100 | 20 | 11,96 | 0,60 |
| **Molienda Cemento, KWh/TM** | 35,00 | **37,37** | 7,0 | 94 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,05 | 0,63 |
| **Despacho Cemento, KWh/TM** | 0,95 | **1,05** | 3 | 90 | 7 | 10 | 80 | 20 | 8,57 | 0,26 |
| **Auxiliares, KWh/TM** | 5,00 | **4,78** | 4 | 105 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,69 | 0,43 |
| **Despacho, exceso peso bolsa, Kg** | 0,25 | **0,21** | 1 | 119 | 10 | 13 | 100 | 20 | 12,86 | 0,13 |
| **Calidad** | 10,00 | **9,74** | 8 | 97 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,62 | 0,77 |
| **Mantenimiento** | 10,00 | **11,21** | 9 | 112 | 10 | 13 | 100 | 20 | 11,81 | 1,06 |
| **Seguridad** | 1,00 | **20,50** | 4 | 5 | 0 | 1 | 0 | 20 | 0,24 | 0,01 |
| **Costo unitario, US$/TM cemento** | 27,00 | **31,10** | 40 | 87 | 7 | 10 | 80 | 20 | 8,02 | 3,21 |
| **PUNTAJE DE EXCELENCIA OPERATIVA Y GESTIÓN DE AHORRO ENERGÍA:** | | | | | | | | | | **8,75** |

Fuente: Adaptación del indicador único de M. Vogel[37]

[37] Vogel M. (2003) "Tablero de comando: Indicadores no Financieros", Abril, Lima, Perú.

El cálculo del puntaje de excelencia operativa y gestión de ahorro de energía esta basado en la determinación de la variación existente entre lo logrado y la meta para cada indicador; se asigna puntos de acuerdo a la tabla 2 (Tabla de referencia) del anexo XXI y se pondera de acuerdo al peso relativo que la empresa da a cada uno de los indicadores.

La tabla de referencia tiene como objetivo dar 10 puntos cuando se logra el 100% de la meta. Se otorga para cada 1% en el intervalo de 0 a 20% un peso de 0,05 (1/20), para el intervalo de 21 a 40% se da un peso de 0,10 y para valores mayores a 81% se otorga un peso de 0,15, se incrementa a 3 puntos como premio por lograr la meta.

Los cálculos detallados se muestran en el Anexo XXI.

Los cambios en el nivel excelencia operativa lograda desde el año 1994 a Febrero 2005 se muestra en la figura 4.6.

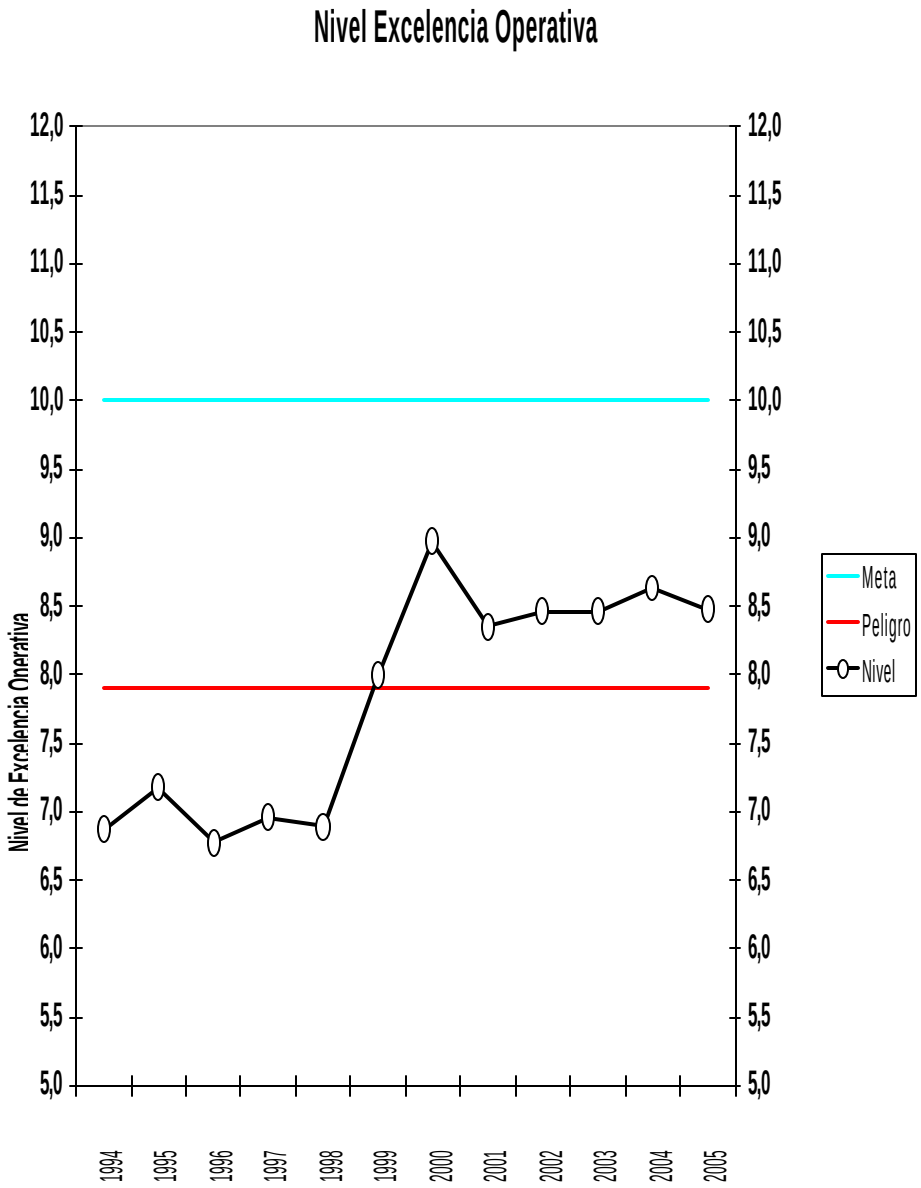



**Figura 4.6:** Cambios en el Nivel de Excelencia Operativa

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 PAUTAS PARA LA IMPLANTACIÓN DEL MODELO

Para lograr la implantación del modelo se debe partir de la visión, misión y valores organizacionales, desde allí estarán definidos los objetivos estratégicos, lo que permitirá desdoblar los objetivos para los procesos donde se implementara el modelo. Debe seguirse los pasos siguientes:

1. Analizar la visión y misión, así como los objetivos estratégicos y principales políticas y buscar el apoyo de la alta gerencia.
2. Realizar el despliegue de los objetivos estratégicos de la organización hasta llegar a los objetivos de las unidades operativas. Hacer uso de las relaciones causa - efecto.
3. Formar un equipo responsable para la gestión energética que reporte a la gerencia representante de la administración. Deberá estar compuesto por representantes de producción, mantenimiento, logística y de ingeniería.
4. Este equipo determinara requerimientos adicionales de capacitación y de asesorías internas y externas.
5. Definir los alcances del sistema que entrara en el diagnostico energético.
6. Realizar la difusión de los objetivos y la información necesaria a todos los involucrados.
7. Determinar metas, indicadores e iniciativas estratégicas necesarias.

8. Llevar a cabo el diagnostico energético.
9. Desarrollar la estrategia a seguir para lograr el ahorro de energía.
10. Efectuar el análisis técnico económico de las alternativas escogidas.
11. Ejecutar la implementación de las alternativas.
12. Monitorear y evaluar las alternativas.
13. Comparar los resultados obtenidos con las metas e indicadores del objetivo estratégico.

*“El progreso del hombre debe ser continua e interminable así la carrera por la ventaja competitiva no debe tener una línea final de meta”*

*E. Goldratt*

# CAPÍTULO V

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1 CONCLUSIONES

1. El ahorro de energía a través de un modelo de gestión permite lograr ahorros económicos significativos de 4,47US$/TM, representando el 13,6% del costo unitario del cemento. Los resultados obtenidos con un enfoque sistémico permite se sostenga en el tiempo y lleve a la excelencia operativa.

2. El uso del modelo permite visualizar nuevas alternativas de ahorro energético y define mejor las interrelaciones entre las diversas funciones de la organización. Como la implementación a nivel industrial del uso de mineralizadores en el proceso de clinkerización

para reducir en más de 100$^{o}$C la temperatura de formación del clinker, llevará a lograr significativo ahorro de energía.

3. El uso del modelo de ahorro de energía como estrategia para lograr competitividad y mejores niveles de excelencia operativa, facilitó se logre ahorros económicos de US$ 3,29 por tonelada de cemento a través del uso de nuevo tipo de refractario y la utilización de la relación sulfatos a álcalis (RAS) en el control del proceso de clinkerización.

4. Para tener mejores resultados en el ahorro de energía es necesario seguir procedimientos e instrucciones consistentes con las políticas de la organización los que deben formar parte del sistema de normas de la empresa (sistema ISO 9000), esto permitirá su sostenimiento en el tiempo.

5. La sustitución parcial del clinker por materiales calizos en el cemento permite reducir el consumo de energía y la emisión de gases de invernadero, manteniendo sus propiedades físico químicas. Permite reducir el costo de fabricación.

## 5.2 RECOMENDACIONES

1. Implementar las alternativas de ahorro, obtenidas en el diagnóstico energético, de acuerdo a las prioridades y políticas de la empresa, como el cambio del sello de entrada al horno, evitándose el ingreso de aire falso con pérdidas de energía eléctrica y térmica.
2. Implementar programa de Auditorías energéticas para lograr mayores ahorros energéticos y mejorar la competitividad de la empresa. En la gestión debe disponerse de procedimientos estandarizados que permitirán rigurosidad y repetitividad, las herramientas de posible aplicación son ISO 9000, Six Sigma y Cuadro de mando.
3. Producir nuevos cementos con adiciones que permitan reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de invernadero, al reemplazar parte del clinker con materiales de adición.
4. Implementar el uso del mineral Fluorita como mineralizador para reducir el consumo de energía térmica en la formación del clinker.
5. Profundizar el enfoque de objetivos y el alineamiento de los objetivos individuales a través del desarrollo de proyectos y trabajo en equipo.

## BIBLIOGRAFÍA


1. Alsop, Philip, (2001). “The Cement Plant Operations Handbook for Dry Process Plants”, 3a Ed. Tradeship Publications Ltd, Houston, USA.

2. Ballve, A. (2002). “Cuadro de Mando, organizando información para crear valor”, Ed. Gestión 2000.com, Barcelona, España.

3. Barcenas, L. (2001) “Estrategias para implementar sistemas de administración de energía exitosa”, Innovación Tecnológica. De: http://www.ase.org/uploaded_files/mexico/Innovacion_Tecnologica.ppt. (Consulta: Agosto 2002)

4. Bittner Werner (2000) “Tendencias en la industria del cemento”, Refrakolloquium 2000, Berlín, Alemania.

5. Campodonico H. (1998). “Las Reformas Energéticas y el Uso Eficiente de la Energía en el Perú”, ONU, Santiago de Chile, Chile.

6. Campodonico H. (1999). “Privatización y conflictos regulatorios: El caso de los mercados de electricidad y combustibles en el Perú”, CEPAL, Serie 8, Santiago de Chile, Chile.

7. Carniglia S. Y Barma G. (1992) “Handbook of Industrial Refractories Technology”, Noyes Publications, New Jersey, USA.

8. Cardim de Carvalho A. (2001) “Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del

ciclo de vida del cemento", tesis doctoral en Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cataluña, Julio 2001, Barcelona, España.

9. CENERGIA, Centro de Conservación de energía. (1993) "I Curso Latinoamericano de Eficiencia Energética y Medio Ambiente" Lima, Perú

10. Cisneros V. (2003) "Resultados Operativos de la Modernización de los Hornos II y III de Cemento Andino S.A.", IX Simposium de Tecnología en la Industria del Cemento, Lima, Perú.

11. CONAE, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, (2004). Casos Exitosos en México. De: http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=1497. (Consulta: Febrero de 2004)

12. CONAE, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, (2004). Pasos para el Ahorro de Energía. De: http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=2788 . (Consulta: Febrero de 2004)

13. Diagnostico energético en fábricas de cemento en Cuba. (2000). De: http://www.energia.onf.cu/iee-mep/Document/Cemento.pdf. (Consulta: Febrero de 2004)

14. Duda W. (1988) "Cement Data Book", Volume 3: Raw Materials, 3rd Ed Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Germany.

15. ECC, The Energy Conservation Center, (1994) "Seminar on Energy Conservation in Cement Industry", Ministry of International Trade and

Industry, Japan. De: http://www.unido.org/userfiles/puffk/cement.pdf. (Consulta: Febrero de 2003)

16. Fernández Rafael, (2004) “Retos de futuro de la industria cementera española”, en: presentación el 13 de Enero en Oficemen, Agrupación de Fabricantes de cemento de España, Madrid, España.

17. FLSmidth Institute, (2002). Seminario “Proceso y Operación de sistemas de hornos”, Lima, Perú.

18. Gaebel Rainer (2000) “Empleo de combustibles sustitutos en la industria del cemento”, Refrakolloquium 2000, Berlín, Alemania.

19. Gepp, Ch. (1998) “Impacto de la globalización de los mercados de cemento en América”, Cements, Betons, Platres, Chaus, N$^{o}$ 6.

20. Goldratt E. (2002). “La Carrera”, Ed. Castillo, México.

21. Guzmán F. (2001) “Planeación Estratégica aplicada en la Comisión Federal de Electricidad, Dirección de Operaciones, Subdirección de Transmisión, Transformación y Control”, Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas, Instituto Politécnico Nacional, México.

22. Holderbank, (1994). Seminario de Cemento, Quito, Ecuador.

23. Holst A. (1997) “Conversión a combustión al 100% de cok de petróleo, de alto contenido en sulfuro, mediante la utilización optima de materias primas de alto contenido en sulfatos”, Cemento – Hormigón, N$^{o}$ 777, Noviembre, Pág. 1 387-1 417.

24. Huaroto C. (1992). “El ahorro de energía eléctrica como alternativa”, CENERGIA, Junio 1992, Pág. 3.

25. Jaber D. (2002) “Oportunidades para Ahorrar Energía y Dinero en los Sistemas de Generación y Distribución de Vapor en Hoteles Mexicanos”. De: http://www.ase.org/programs/international/mexico/steam.htm. (Consulta: Julio de 2003)

26. JCA, Japan Cement Association (2001) “Cement in Japan 2001”, Julio, Japan.

27. Kaplan R. y Norton D. (2001) “Como utilizar el Cuadro de Mando Integral”, Ed. Gestión 2000, Barcelona, España.

28. Lutz W. (2001) “Reformas del sector energético, desafíos regulatorios y desarrollo sustentable en Europa y América Latina”, CEPAL, Serie Recursos naturales e infraestructura 26, Santiago de Chile, Chile.

29. Lutz, W. (1996). “Propuesta de una Estrategia para la elaboración y la Aplicación de Normas de Eficiencia Energéticas en el Grupo Andino”, PAI, Programa Andino de Integración Energética, Marzo 1996, Lima, Perú.

30. Montoya A. (1995) “La Auditoria Energética como aporte a la Gestión del área de Mantenimiento”, Revista de Mantenimiento. De: http://www.mantencion.com/articulos/rev20.html/rev20art1.html. (Consulta: Octubre de 2001)

31. Olvera C. y otros (2000) “Ahorro de energía en sistemas frigoríficos”. De:

http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Station/6035/Papers/Ener. (Consulta: Agosto de 2000)

32. Piecuch J. (2000) “A conversation with Lafarge Corp’.s president and CEO John M. Piecuch”, Cement Americas, November-December.

33. Portland Cement Association (2004) “Innovation in Portland Cement Manufacturing”, PCA, Illinois, USA.

34. Refratechnik, (2000) “Refrakolloquium 2000”, Junio, Berlín, Alemania.

35. Suesta V. Y Tornero J. (1999) “Descripción de distintas metodologías de Diagnostico Empresarial”, Universidad Politécnica de valencia. De: http://www.unizar.es/aeipro/finder/metodologiadeproyectos/ab02.htm. (Consulta: Octubre de 2001)

36. Treacy M. y Wiersema F. (1995). “The Discipline of Market Leaders: Cose Your Customer, Narrow Your Focus, Dominate Your Market” Addison-Wesley.

37. UPME, Unidad de Planeación Minero Energética (2001) “Determinación de Eficiencia Energética del Subsector Industrial de Ladrillo, Vidrio y Cerámica” Ministerio de Minas y Energía de Colombia. De: http://www.upme.gov.co/si3ea/documentacion/ure/estudios/EstudiosEficiencia_LadrilloVidrioCeramica.pdf .(Consulta: Noviembre de 2001)

38. Vogel M. (2003) “Tablero de comando: Indicadores no Financieros”, Abril, Lima, Perú.

## Lista de Tablas

Tabla 2.1: Variación en el consumo de electricidad por cambio de tecnología 11
Tabla 2.2: Flujo del proceso de fabricación del cemento 12
Tabla 2.3: Consumo de combustible y electricidad en plantas cementeras 14
Tabla 2.4: Consumo de energía térmica en la clinkerización 15
Tabla 2.5: Consumos energéticos en sistemas de hornos 16
Tabla 2.6: Características de las estrategias de diferenciación en el mercado 23
Tabla 2.7: Composición del mercado en América Latina 26
Tabla 2.8: Adquisiciones de plantas cementeras en América Latina 27
Tabla 2.9: Reestructuración de las plantas cementeras en América Latina 28
Tabla 2.10: Valores medios de volatilidad del azufre, sodio y potasio 30
Tabla 2.11: Principales pérdidas de calor en el proceso de clinkerización 32
Tabla 3.1: Matriz de decisión sobre metodología de ahorro energético 36
Tabla 3.2: Parámetros de diseño de hornos 41
Tabla 3.3: Parámetros de diseño molienda de cemento 42
Tabla 3.4: Valores de referencia de parámetros operacionales 46
Tabla 4.1: Metas del objetivo ahorro de energía 60
Tabla 4.2: Iniciativas estratégicas en el proceso de fabricación del cemento 61
Tabla 4.3: Matriz de decisión de diagnóstico energético para clinkerización, molienda, gestión y productos 63
Tabla 4.4: Matriz de priorización del diagnóstico energético 65
Tabla 4.5: Ahorro de energía en la clinkerización y molienda de cemento 70
Tabla 4.6: Evaluación económica del cambio de refractario al horno 1 71
Tabla 4.7: Evaluación económica de utilizar otra caliza para regular el RAS 72
Tabla 4.8: Resultados del Ahorro de energía 74
Tabla 4.9: Costo de fabricación del cemento 74
Tabla 4.10: Comprobación de los ahorros 75
Tabla 4.11: Indicador de Excelencia Operativa con Ahorro energético 76

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Relación de dureza de la caliza y la producción del molino 10

Figura 2.2: Dureza de materiales utilizados en plantas de cemento 10

Figura 2.3: Tendencias en el uso de los combustibles y materiales 19

Figura 2.4: Estrategias de competitividad global 24

Figura 2.5: Diagrama causa efecto para perspectivas 25

Figura 2.6: Esquema del circuito interno de volátiles 29

Figura 2.7: Relación número de paradas del horno por atoros 31

Figura 2.8: Determinación del cemento y energía especifica equivalente 31

Figura 3.1: Comparación para el ahorro energético y económico 35

Figura 3.2: Metodología para el diagnóstico energético 40

Figura 3.3: Evaluación analítica del consumo de energía en la clinkerización 44

Figura 4.1: Modelo para el ahorro de energía 56

Figura 4.2: Diagrama causa efecto del despliegue de objetivos 58

Figura 4.3: Diagrama causa efecto de objetivos estratégicos de producción 59

Figura 4.4: Consumo total de energía eléctrica en planta de cemento 67

Figura 4.5: Tasa de retorno de inversión de las alternativas 73

Figura 4.6: Cambios en el nivel de excelencia operativa 78

## LISTA DE ANEXOS

Anexo I: Venta nacional de cemento por fabricante 93

Anexo II: Participación de empresas transnacionales en América 94

Anexo III: Consumo mensual de energía 95

Anexo IV: Cálculo de las toneladas equivalente de cemento 96

Anexo V: Consumo mensual de energía eléctrica en la fabricación del cemento 97

Anexo VI: Mediciones y Cálculos detallados en el horno 98

Anexo VII: Parámetros Operacionales para cálculo de eficiencia energética 102

Anexo VIII: Pérdida de calor en superficie del horno 103

Anexo IX: Determinación de perdidas de calor en refractarios 104

Anexo X: Perfil de temperaturas al exterior del horno en prueba 106

Anexo XI: Ahorro de energía por cambio de placas en el enfriador 107

Anexo XII: Paradas del horno por atoros del precalentador 108

Anexo XIII: Comparación del consumo de electricidad por tipo de equipo de molienda 111

Anexo XIV: Consumo anual de energía eléctrica y térmica 114

Anexo XV: Ahorro de energía eléctrica por programación de consumos fuera de horas punta 115

Anexo XVI: Diagrama de flujo de energía en la planta de cemento 116

Anexo XVII: Balance de Materia y Energía en el horno 117

Anexo XVIII: Alternativas de ahorro de energía 118

a. Ahorros por cambio de tipo de bomba para el carbón 118

b. Ahorros por reducción de CO en humos de escape 119

c. Ahorros por uso de adiciones 120

d. Uso de la Fluorita como mineralizador 121

Anexo XIX: Ahorros de energía térmica por cambio de tecnología 122

Anexo XX: Costo para implementar el modelo de ahorro de energía 123

Anexo XXI: Medición del Nivel de Excelencia Operativa 124

Anexo XXII: Vistas de plantas de cemento 127

Anexo XXIII: Formación de costras en ductos del Precalentador 128

Anexo XXIV: Vistas del interior y exterior del horno 129

Anexo XXV: Vistas de falla en sello de entrada y salida del horno 130

# ANEXOS

## ANEXO I: Venta Nacional de cemento por fabricante, toneladas

| AÑO | Cemento Andino | Cemento Lima | Cemento Pacasmayo | Cemento Sur | Cemento Yura | Cemento Selva | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 976 | 443 665 | 976 206 | 329 126 | 89 250 | 172 868 | | 2 011 115 |
| 1 977 | 453 712 | 916 480 | 351 860 | 90 464 | 170 590 | | 1 983 106 |
| 1 978 | 395 616 | 943 042 | 436 663 | 113 663 | 182 276 | | 2 071 260 |
| 1 979 | 455 018 | 936 489 | 735 636 | 99 939 | 225 672 | | 2 452 754 |
| 1 980 | 443 776 | 1 219 084 | 891 151 | 102 139 | 218 380 | | 2 874 530 |
| 1 981 | 406 432 | 1 171 200 | 512 050 | 89 739 | 306 847 | | 2 486 268 |
| 1 982 | 506 405 | 1 124 870 | 494 139 | 96 209 | 236 542 | | 2 458 165 |
| 1 983 | 432 170 | 833 339 | 419 776 | 94 467 | 189 132 | | 1 968 884 |
| 1 984 | 398 742 | 828 393 | 407 446 | 95 768 | 205 770 | | 1 936 119 |
| 1 985 | 407 194 | 741 630 | 347 664 | 90 365 | 150 478 | | 1 737 331 |
| 1 986 | 424 812 | 985 236 | 502 945 | 102 697 | 205 014 | | 2 220 704 |
| 1 987 | 380 859 | 1 267 285 | 599 477 | 99 114 | 266 157 | | 2 612 892 |
| 1 988 | 337 916 | 1 166 248 | 643 295 | 75 650 | 275 750 | | 2 498 859 |
| 1 989 | 433 137 | 879 567 | 528 213 | 56 213 | 256 493 | | 2 153 623 |
| 1 990 | 444 984 | 771 668 | 530 342 | 49 090 | 422 733 | | 2 218 817 |
| 1 991 | 475 806 | 840 367 | 443 053 | 69 253 | 227 143 | | 2 055 622 |
| 1 992 | 490 665 | 905 027 | 457 010 | 89 235 | 240 526 | | 2 182 463 |
| 1 993 | 494 943 | 1 020 766 | 520 685 | 118 837 | 292 226 | | 2 447 457 |
| 1 994 | 700 478 | 1 271 568 | 683 340 | 141 675 | 384 428 | | 3 181 489 |
| 1 995 | 703 181 | 1 561 709 | 827 960 | 126 918 | 456 980 | | 3 676 748 |
| 1 996 | 760 952 | 1 611 251 | 785 990 | 130 006 | 550 077 | | 3 838 276 |
| 1 997 | 759 555 | 1 854 704 | 908 895 | 150 808 | 615 033 | | 4 288 995 |
| 1 998 | 793 259 | 1 915 592 | 779 362 | 152 233 | 650 777 | | 4 291 223 |
| 1 999 | 725 056 | 1 624 524 | 688 733 | 166 738 | 515 928 | 55 064 | 3 776 043 |
| 2 000 | 717 221 | 1 567 627 | 699 311 | 162 254 | 414 791 | 59 676 | 3 620 880 |
| 2 001 | 648 843 | 1 598 956 | 659 374 | 168 062 | 422 528 | 55 601 | 3 553 364 |
| 2 002 | 577 470 | 1 470 372 | 593 437 | 147 895 | 362 952 | 50 597 | 3 202 722 |
| 2 003 | 865 612 | 1 507 651 | 686 737 | 145 647 | 494 029 | 110 934 | 3 810 610 |
| 2 004 | 903 483 | 1 574 990 | 728 643 | 136 594 | 498 649 | 128 791 | 3 971 150 |
| 2 005 | 939 204 | 1 751 481 | 793 680 | 109 695 | 642 310 | 113 756 | 4 350 127 |

**Fuente:** Asociación de Productores de Cemento (ASOCEM), al 31 de Diciembre

## ANEXO II: Participación de empresas transnacionales en América

| EMPRESAS | | VENTAS millones de US$ | CEMENTO CAPACIDAD INSTALADA, MTM |
|---|---|---|---|
| **HOLCIM** | Latino América | 2,923 | 37.5 |
| | Norte América | 2,468 | 19.3 |
| | Total Mundial | 10,947 | **109.0** |
| **LAFARGE** | Latino América | 705 | 10.3 |
| | Norte América | 3,763 | 15.4 |
| | Total Mundial | 14,390 | **92.0** |
| **CEMEX** | México | 2,702 | 27.2 |
| | USA | 2,350 | 13.7 |
| | Venezuela | 505 | 4.6 |
| | Colombia | 206 | 4.8 |
| | Centro América y Caribe | 436 | 3.4 |
| | Total Mundial | 12,198 | **97.8** |
| **HEILDELBERGER** | Norte América | 2,329 | 10.1 |
| | Total Mundial | 8,294 | **79.4** |
| **ITALCEMENTI** | Norte América | 675 | 6.9 |
| | Total Mundial | 5,516 | **48.1** |
| **CIMPOR** | Brasil | 335 | 4.8 |
| | Total Mundial | 1,663 | **23.9** |
| **BUZZI UNICEM** | Norte América | 1,117 | 10.2 |
| | México | 408 | 4.0 |
| | Total Mundial | 3,376 | **40.5** |

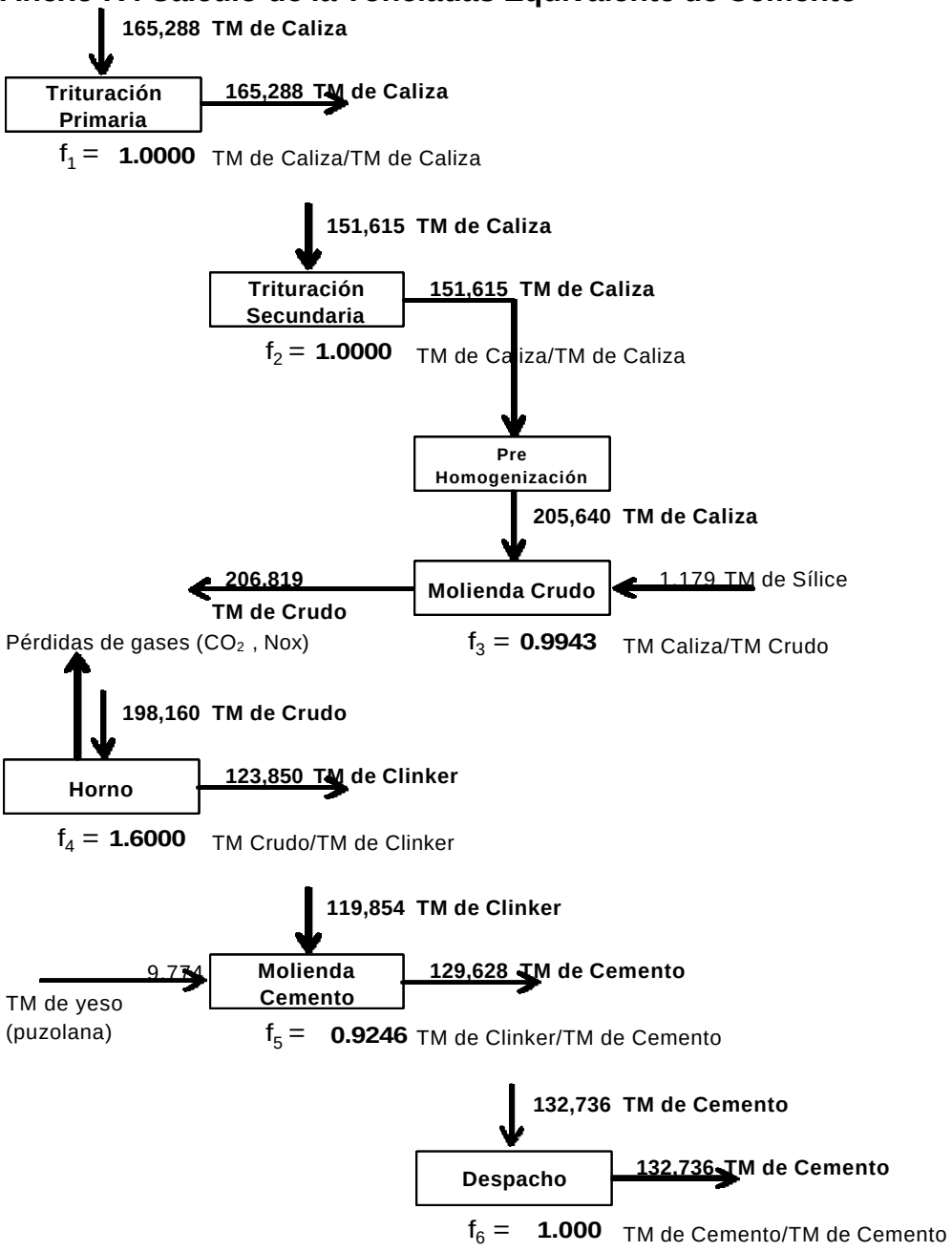
Fuente: International Cement Review, Mar 2005, Cement Internacional, No 5/2004 y reportes a Julio 2005 de las empresas Cemex, Buzzi Unicem, Lafarge y Holcim.

## ANEXO III: Consumo mensual de energía

| Fuente de energía | | Consumo mes | Factor de conversión | Cantidad equivalente GJ/mes | Factura US$ | US$/GJ | % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *1* | *3* | *4=1 x 3* | *5* | *6=5/4* | |
| Petróleo R6 | TM/mes | 1 241 | 39,78 | 49 363 | 317 108 | **6,42** | 9,53% |
| Petróleo 500 | TM/mes | 0 | 40,79 | | | | |
| Petróleo Diesel 2 | gal/mes | 2 705 | 0,147 | 399 | 4 453 | **11,17** | 0,08% |
| Carbón Bituminoso | TM/mes | 13 887 | 29,46 | 409 049 | 1 167 897 | **2,86** | 78,94% |
| Carbón Antracita | TM/mes | 0 | 21,77 | | | | |
| Electricidad | KWh/mes | 16 490 922 | 0,0036 | 59 367 | 204 979 | **3,45** | 11,46% |
| | | | | **518 178** | **1 694 437** | **3,27** | 100,0% |
| Clinker producido: | TM | **205 000** | | **2,5277** | GJ/TM clinker | | |
| Industria de Cuba (mejor año 1989) | | | | 4,2035 | GJ/TM clinker | | |
| Estándar vía seca 4 etapas | | | | 3,0500 | GJ/TM clinker | | |
| USA (Seattle)* | | | | 2,9000 | GJ/TM clinker | | |
| Taiwan (Hualien)* | | | | 2,9200 | GJ/TM clinker | | |
| Cementos Lima S.A. ** | | | | 2,5277 | GJ/TM clinker | | |

*Promedio de año 2001 y **año 2004
Fuente: Elaboración propia

## Anexo IV: Cálculo de la Toneladas Equivalente de Cemento




| Relación | Factor |
|---|---|
| TM Caliza/TM Caliza | 1.0000 |
| TM Caliza/TM Crudo | 0.9943 |
| TM Crudo/TM Clinker | 1.6000 |
| TM Clinker/TM Cemento | 0.9246 |
| TM Cemento/TM Cemento | 1.0000 |

Ejm.: Caliza en trituración primaria

**165,288 TM de caliza**

multiplicar por

$$\frac{TM.crudo}{0,9943\,TM.caliza} \times \frac{TM.clinker}{1,6000\,TM.crudo} \times \frac{TM.cemento}{0,9246\,TM.clinker} =$$

= **112,370 TM de cemento equivalente**

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO V: Consumo mensual de energía eléctrica en la fabricación del cemento

| Procesos | KWh | TM | KWh/TM | TM equivalente cemento | KWh/TM equivalente cemento |
|---|---|---|---|---|---|
| **TRITURACIÓN** | **572 681** | 632 905 | **0,90** | 428 601 | **2,65** |
| **Primaria** | 114 012 | 312 450 | 0,36 | 211 590 | 0,54 |
| **Secundaria** | 458 669 | 320 455 | 1,43 | 217 011 | 2,11 |
| **MOLIENDA DE CRUDO** | **4 813 214** | 318 682 | **15,10** | 212 703 | **22,63** |
| **CLINKERIZACIÓN** | **7 011 720** | 201 344 | **34,82** | 212 545 | **32,99** |
| **Horno 1** | 4 367 111 | 108 744 | 40,16 | 114 794 | 38,04 |
| **Horno 2** | 2 644 609 | 92 600 | 28,56 | 97 752 | 27,05 |
| **MOLIENDA CEMENTO** | **5 346 362** | 149 316 | **35,81** | 149 316 | **35,81** |
| **Molino 1** | | | | | |
| **Molino 2** | 1 859 314 | 41 276 | 45,05 | 41 276 | 45,05 |
| **Molino 3** | 793 262 | 13 618 | 58,25 | 13 618 | 58,25 |
| **Prensa 1** | 1 187 624 | 41 830 | 28,39 | 41 830 | 28,39 |
| **Prensa 2** | 1 506 162 | 52 592 | 28,64 | 52 592 | 28,64 |
| **Prensa 3** | | | | | |
| **DESPACHO** | **177 213** | 144 151 | **1,23** | 144 151 | **1,23** |
| **AUXILIARES** | **837 168** | 191 212 | **4,38** | 191 212 | **4,38** |
| **Iluminación y otros** | **46 901** | 191 212 | **0,25** | 191 212 | **0,25** |
| **TOTAL** | | | **KWh/TM equivalente de cemento:** | | **99,93** |

Fuente: Elaboración propia, promedio del año 2 004

**Factores de conversión a cemento equivalente**

| Caliza Arrastre a Crudo de Molienda | Crudo de Horno a Clinker de Horno | Clinker de Molienda a Cemento |
|---|---|---|
| **0,9856** | **1,5816** | **0,9473** |

## ANEXO VI: Mediciones y Cálculos detallados en el horno

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Longitud, Horno 1 | m | | 84,0 | |
| Diámetro del horno | m | | 5,20 | |
| Capacidad nominal, clinker | TM/d | | 4 000 | |
| Enfriador | | Claudius Peters, 3 parrillas | | |
| Precalentador | | Dopol 4 etapas de ciclones | | |
| **Combustible** | | | | |
| Carbón bituminoso | | | | |
| Humedad | % | | 1,10% | |
| Poder calorífico inferior del carbón | Kca/Kg | | 7 035 | |
| Compresor aire transporte de carbón | $m^3$/min | | 52 | |
| Precio del carbón molido en planta | US$/TM | | 84,1 | |
| Quemador principal del horno | | Tipo de 3 canales | | |
| **Alimentación Harina cruda** | | Transporte neumático | | |
| Compresor aire, transporte harina cruda | $m^3$/min | | 150 | en la entrada |
| Aire, Peso específico a 20°C | $Kg/m^3$ | | 1,205 | |
| precio electricidad | US$/KWh | | 0,0557 | |
| **Medición de la Producción de clinker** | | | **Medición** | **Calculado** |
| Tiempo duración de prueba | h | | 8 | |
| Alimentación Harina cruda | TM | | 2 232 | |
| Alimentación Harina cruda | TM/h | | | 279 |
| Peso Clinker, en camiones en 8 horas | TM | | 1 331 | |
| | TM/h | | | 166,33 |
| | TM/d | | | **3 992** |
| Polvo recuperado de electrofiltro | TM/h | | 33 | |
| Carbón utilizado | TM | | 139,50 | |
| Petróleo utilizado en precalentador | TM | | 14,67 | |
| Carbón, Poder calorífico inferior | kca/kg | | 7 035 | |
| Cenizas del carbón | % | | 11,30 | |
| Petróleo, peso especifico | kg/l | | 0,89 | |
| Petróleo, poder calorífico inferior | kcal/kg | | 9 550 | |
| Cenizas de carbón | TM | | | 15,76 |
| Clinker obtenido de harina cruda | TM | | | 1 315 |
| **Harina cruda** | | | | |
| Harina cruda, Pérdida fuego (P.F.) | % | | 33,55 | |
| Polvo electrofiltro recuperado, en prueba | TM | | | 264 |
| | TM/h | | | 33 |
| Polvo como % de alimentación | | | 11,83 | 11,83 |
| Factor, harina cruda/clinker | | | | 1,68 |
| **Consumo de calor** | Kca/kg clink | | | **843** |
| Del Carbón | Kca/kg | | | 738 |
| Del Petróleo | Kcal/kg | | | 105 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Alimentación harina cruda (set point) | TM/h | | 280 |
| Factor real, crudo/clinker | | | 1,68 |
| Clinker a obtenerse | TM/d | | 4 006 |
| Factor normalmente usado | | | 1,63 |
| corresponde a clinker | TM/d | | 4 123 |
| Corresponde calor | Kcal/Kg | | 816 |

| | | |
|---|---|---|
| Aire primario Axial | m/s | 132 |
| Aire primario Radial | m/s | 109 |
| total aire primario en quemador | Kg/h | 8 731 |

| **Análisis de gases, Orsat** | | **$O_2$** | **$CO_2$** |
|---|---|---|---|
| En la entrada del horno | % | 1,70 | 26,6 |
| En el tubo ascendente | % | 3,60 | 24,0 |
| En la salida del precalentador | % | 4,90 | 28,5 |
| Exceso aire ducto ascenso gases | % | 23,01 | |
| Exceso aire entrada al horno | % | 9,79 | |
| **Pérdida al fuego** | | | |
| Crudo alimentación | % | 33,55 | |
| Crudo a entrada horno | % | 20,00 | |

| **Temperatura y presión del precalentador** | | **Temperatura de salida** | **Presión tras ciclón** |
|---|---|---|---|
| | | $^oC$ | mm CA |
| Salida Ciclón 1 | | 382 | 693 |
| Salida Ciclón 2 | | 591 | 553 |
| Salida Ciclón 3 | | 737 | 440 |
| Salida Ciclón 4 | | 830 | 278 |

| | | |
|---|---|---|
| Gases escape del precalentador | $Nm^3/h$ | 272 078 |
| Consumo electricidad exhaustor | KW | 1 663 |
| | KWh/TM clinker | 10,00 |

| | | **m/s** | **$m^3/h$** |
|---|---|---|---|
| Aire falso a salida horno | m/s | 34 | 15 373 |
| Aire falso a entrada horno | m/s | 42 | 28 486 |
| Aire falso ventana ciclón | m/s | 43 | 4 861 |

## Cálculo del aire falso que ingresa al sistema

**Ventanas en Precalentador**

$$A_{falso} = A.\sqrt{2.\Delta P / \boldsymbol{r}}$$

| | | |
|---|---|---|
| | m3/s | 0,201 |
| | m3/h | 724,9 |
| | Kg/h | **937** |
| $Q_{20}^{830} = A_{falso}.C_{esp}.(830-20) =$ | Kcal/h | 235 348 |
| Consumo de carbón | TM/día | 0,80 |
| Pérdida por entrada aire falso | US$/día | **67,5** |
| | US$/año | **20 257** |
| Abertura en ventana, mal sellado | m | 0,01 |
| Altura ventana | m | 0,25 |
| Número ventanas para limpieza | c/u | 11 |
| Área abertura ventanas | $m^2$ | 0,0275 |
| Ventana inspección | $m^2$ | 0,0225 |
| Presión atmosférica | mCA | 10,33 |
| Presión interior ( promedio zona rampa) | mCA | 0,561 |
| Diferencia de presión, ÄP | mCA | 9,769 |
| Densidad del aire, ñ | $Kg/Nm^3$ | 1,293 |
| ñ, a 20°C | $kg/m^3$ | 1,205 |
| Calor específico del aire | $Kcal/Nm^3 °C$ | 0,31 |

**Sello a la salida del horno**

$$A_{falso} = A.\sqrt{2.\Delta P / \boldsymbol{r}}$$

| | | |
|---|---|---|
| | $m^3/s$ | 1,44 |
| | $m^3/h$ | 5 201 |
| | Kg/h | **6 266** |
| $Q_{20}^{2120} = A_{falso}.C_{esp}.(2120-20) =$ | Kcal/h | 4 078 941 |
| Consumo de carbón | TM/d | 13,92 |
| Pérdida por entrada aire falso | US$/d | **1 170** |
| | US$/año | **351 085** |
| abertura de sello | m | 0,04 |
| Longitud (Perímetro horno) entra aire | m | 8,17 |
| Número sellos | | 1 |
| Área abertura ventanas | $m^2$ | 0,327 |
| Ventana inspección en cabezal horno | $m^2$ | 0,0225 |
| Presión atmosférica | mCA | 10,33 |
| Presión interior | mCA | 0,0204 |
| Diferencia de presión, ÄP | mCA | 10,3096 |
| Densidad del aire, ñ | $Kg/Nm^3$ | 1,293 |
| ñ, a 20°C | $Kg/m^3$ | 1,205 |
| Calor específico del aire | $Kcal/Nm^3 °C$ | 0,31 |

**Sello a entrada del horno**

$$A_{falso} = A.\sqrt{2.\Delta P / r}$$

| | | |
|---|---|---|
| | $m^3/s$ | 3,2892 |
| | $m^3/h$ | 11 841 |
| | kg/h | **14 265** |
| $Q_{20}^{1020} = A_{falso}.C_{esp}.(1020-20) =$ | Kcal/h | 4 422 294 |
| Consumo de carbón por aire falso | TM/d | 15,09 |
| Pérdida por entrada aire falso | US$/d | **1 269** |
| | US$/año | **380 638** |
| Abertura | m | 0,05 |
| Longitud (Perímetro horno) entra aire falso | m | 16,34 |
| Cantidad | | 1 |
| Área abertura ventanas | $m^2$ | 0,817 |
| Ventana inspección | $m^2$ | |
| Presión atmosférica | mCA | 10,33 |
| Presión interior | mCA | 0,561 |
| Diferencia de presión, ÄP | mCA | 9,769 |
| Densidad del aire, ñ | $Kg/Nm^3$ | 1,293 |
| ñ, a 20°C | $Kg/m^3$ | 1,205 |
| Calor específico del aire | $Kcal/Nm^3 °C$ | 0,31 |

## ANEXO VII: Parámetros Operacionales para el cálculo de eficiencia energética

| | Un cambio en: | Por | Unidad | Resulta en un cambio en: | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Calor | Temperatura | Presión | Ventilador |
| | | | | Kcal/Kg | °C | % | % |
| I | **Calidad y propiedades de la harina cruda** | | | | | | |
| I.1 | Temperatura material de alimentación | 10 | °C | -0,53 | 5,70 | 0,16 | 1,10 |
| I.2 | Humedad libre | 1 | % | 1,40 | -16,00 | 0,00 | -1,50 |
| I.3 | Agua de hidratación | 1 | % | 4,80 | -22,00 | -1,40 | -4,10 |
| I.4 | Carbón en la harina cruda | 1 | % | -71,00 | 81,00 | -4,50 | 2,70 |
| I.5 | Calor de reacción | 1 | Kcal/Kg clinker | 1,10 | 0,35 | 0,16 | 0,32 |
| I.6 | Polvo de horno | 0,1 | Kcal/Kg clinker | 0,75 | 1,30 | 0,45 | 0,81 |
| II | **Combustible, calidad y propiedades** | | | | | | |
| II.1 | Valor calórico neto, aceite | 100 | Kcal/Kg oil | -0,04 | -1,10 | -0,47 | -1,00 |
| II.2 | Valor calórico neto, gas | 100 | Kcal/Kg gas | -0,10 | -0,05 | -0,01 | -0,03 |
| II.3 | Humedad en carbón | 1 | % | 0,45 | 1,00 | 0,40 | 0,72 |
| II.4 | Valor calórico, carbón | 100 | Kcal/Kg carbón | -0,24 | -0,45 | 0,01 | -0,07 |
| III | **Proporción de combustión secundaria** | | | | | | |
| III.1 | Combustión en el tubo ascendente | 1 | % | -0,03 | 0,40 | 0,07 | 0,14 |
| IV | **Distribución de la combustión y exceso de aire** | | | | | | |
| IV.1 | Cantidad de aire primario | 1 | % | 1,70 | 0,60 | 0,24 | 0,49 |
| IV.2 | Temperatura de aire primario | 10 | °C | -0,43 | -0,17 | 0,32 | -0,12 |
| IV.3 | Exceso de aire en el horno | 1 | % | 0,12 | 1,60 | 0,92 | 1,80 |
| V | **Entrada de aire falso** | | | | | | |
| V.1 | Caperuza del horno | 0,1 | Kg/Kg clinker | 16,0 | 5,7 | 2,4 | 4,8 |
| V.2 | Sello de entrada | 0,1 | Kg/Kg clinker | 18,0 | 21,0 | 12,0 | 23,0 |
| V.3 | Ciclón 1 | 0,1 | Kg/Kg clinker | 1,0 | -10,0 | 1,4 | 5,6 |
| V.4 | Ciclón 2 | 0,1 | Kg/Kg clinker | 3,0 | -6,3 | 2,7 | 7,6 |
| V.5 | Ciclón 3 | 0,1 | Kg/Kg clinker | 6,1 | 0,0 | 4,8 | 11,0 |
| V.6 | Ciclón 4 | 0,1 | Kg/Kg clinker | 11,0 | 8,8 | 7,5 | 16,0 |
| V.7 | Ciclón 5 | 0,1 | Kg/Kg clinker | 18,0 | 21,0 | 12,0 | 23,0 |
| V.8 | Ciclón 6 | 0,1 | Kg/Kg clinker | 24,0 | 29,0 | 18,0 | 30,0 |
| V.9 | Harina cruda | 0,1 | Kg/Kg clinker | 0,9 | -10,0 | 1,4 | 5,5 |
| VI | **Pérdida de Enfriador** | | | | | | |
| VI.1 | Pérdida estándar del enfriador | 1 | Kg/Kg clinker | 1,10 | 0,33 | 0,17 | 0,33 |
| VII | **Pérdida de calor por radiación** | | | | | | |
| VII.1 | Horno | 1 | Kg/Kg clinker | 1,10 | 0,34 | 0,16 | 0,32 |
| VII.2 | Ciclón 1 | 1 | Kg/Kg clinker | 0,14 | -1,40 | -0,07 | -0,38 |
| VII.3 | Ciclón 2 | 1 | Kg/Kg clinker | 0,31 | -1,10 | -0,07 | -0,23 |
| VII.4 | Ciclón 3 | 1 | Kg/Kg clinker | 0,53 | -0,71 | -0,03 | -0,10 |
| VII.5 | Ciclón 4 | 1 | Kg/Kg clinker | 0,78 | -0,19 | 0,04 | 0,08 |
| VII.6 | Ciclón 5 | 1 | Kg/Kg clinker | 1,10 | 0,33 | 0,16 | 0,31 |
| VII.7 | Ciclón 6 | 1 | Kg/Kg clinker | 1,40 | 0,67 | 0,23 | 0,52 |
| VIII | **Eficiencia de los ciclones** | | | | | | |
| VIII.1 | Ciclón 1 | 1 | % | -0,80 | 1,8 | 0,00 | -0,70 |
| VIII.2 | Ciclón 2 | 1 | % | -0,22 | -0,2 | -0,10 | -0,26 |
| VIII.3 | Ciclón 3 | 1 | % | -0,28 | -0,6 | -0,14 | -0,26 |
| VIII.4 | Ciclón 4 | 1 | % | -0,30 | -0,6 | -0,19 | -0,32 |
| VIII.5 | Ciclón 5 | 1 | % | -0,60 | -1,2 | -0,34 | -0,58 |
| VIII.6 | Ciclón 6 | 1 | % | -1,00 | -1,8 | -0,49 | -0,74 |
| IX | **Relaciones químicas en el precalentador** | | | | | | |
| IX.1 | Recarbonatación | 1 | % | 0,23 | 0,43 | 0,09 | 0,18 |
| X | **Derivación de los gases del horno** | | | | | | |
| X.1 | Derivación | 1 | % | 3,8 | -2,2 | -0,78 | -1,4 |
| XI | **Número de ciclones** | | | | | | |
| XI.1 | De 4 a 5 | | | -20,2 | -45,0 | 12,4 | 4,2 |
| XI.2 | De 5 a 6 | | | -8,6 | -23,0 | 17,0 | 9,8 |

Fuente: FLSmidth Institute

## ANEXO VIII: Pérdida de calor en superficie del horno

**PÉRDIDA DE CALOR SUPERFICIE HORNO**

**Planta:** Atocongo **Horno N°** 1 **Fecha:** 09/07/01

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Diámetro horno: d =** | 5,20 | m | **Producción: P=** | 3 992 | TM/d |
| **Longitud horno: L =** | 84,00 | m | **Factor: f =** | 1,08 | |
| **Área superficial: F=** | 1 385 | $m^2$ | **Superf. esp.** | 0,347 | $m^2$/TM/d |

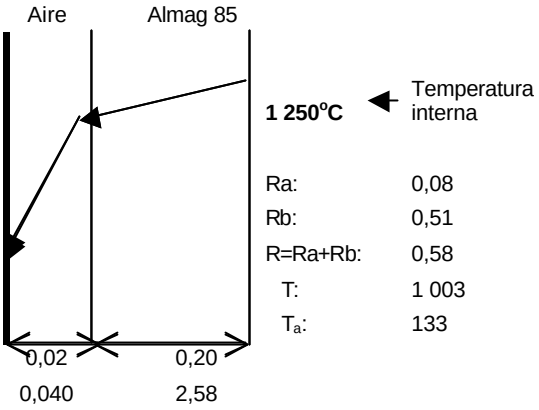
| Distancia de salida, m | Área superficial, $m^2$ | Temperatura ambiente, °C | Temperatura superficie, °C | Radiación | | Velocidad del viento, m/s |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Kcal/$m^2$.h | Kcal/h | |
| 2 | 32,99 | 20 | 267 | 4 697 | 154 931 | |
| 4 | 32,99 | 20 | 272 | 4 861 | 160 340 | |
| 6 | 32,99 | 20 | 278 | 5 062 | 166 987 | |
| 8 | 32,99 | 20 | 282 | 5 199 | 171 514 | |
| 10 | 32,99 | 20 | 273 | 4 894 | 161 436 | |
| 12 | 32,99 | 20 | 278 | 5 062 | 166 987 | |
| 14 | 32,99 | 20 | 281 | 5 165 | 170 375 | |
| 16 | 32,99 | 20 | 290 | 5 481 | 180 802 | |
| 18 | 32,99 | 20 | 275 | 4 961 | 163 642 | |
| 20 | 32,99 | 20 | 268 | 4 729 | 156 004 | |
| 22 | 32,99 | 20 | 271 | 4 828 | 159 249 | |
| 24 | 32,99 | 20 | 280 | 5 131 | 169 240 | |
| 26 | 32,99 | 20 | 291 | 5 517 | 181 985 | |
| 28 | 32,99 | 20 | 297 | 5 735 | 189 192 | |
| 30 | 32,99 | 20 | 320 | 6 626 | 218 563 | |
| 32 | 32,99 | 20 | 309 | 6 189 | 204 164 | |
| 34 | 32,99 | 20 | 315 | 6 425 | 211 936 | |
| 36 | 32,99 | 20 | 321 | 6 666 | 219 905 | |
| 38 | 32,99 | 20 | 307 | 6 112 | 201 616 | |
| 40 | 32,99 | 20 | 313 | 6 346 | 209 324 | |
| 42 | 32,99 | 20 | 300 | 5 847 | 192 865 | |
| 44 | 32,99 | 20 | 280 | 5 131 | 169 240 | |
| 46 | 32,99 | 20 | 267 | 4 697 | 154 931 | |
| 48 | 32,99 | 20 | 300 | 5 847 | 192 865 | |
| 50 | 32,99 | 20 | 248 | 4 105 | 135 413 | |
| 55 | 82,47 | 20 | 238 | 3 813 | 314 432 | |
| 60 | 82,47 | 20 | 238 | 3 813 | 314 432 | |
| 65 | 82,47 | 20 | 228 | 3 533 | 291 374 | |
| 70 | 82,47 | 20 | 234 | 3 699 | 305 086 | |
| 75 | 82,47 | 20 | 230 | 3 588 | 295 904 | |
| 80 | 82,47 | 20 | 212 | 3 111 | 256 554 | |
| | | | | | 6 241 287 | Kcal/h |
| Radiación: (kcal/h . 24 / P .1000) . f = | | | | | **41** | Kcal/Kg |
| Radiación específica: (kcal/h . f . 1000) / F = | | | | | **4 865** | Kcal/h.$m^2$ |

Fuente: elaboración propia

# ANEXO IX: Determinación de pérdidas de calor en refractarios

**UTILIZACIÓN DE REFRACTARIO CON AISLANTE DE AIRE**

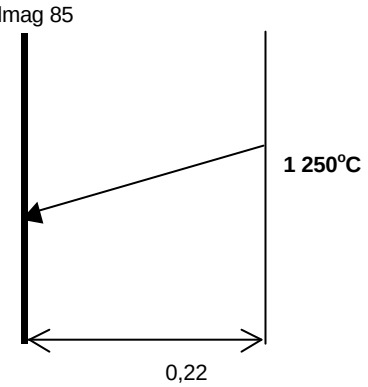
Tipo de material refractario: 2 capas




| | |
|---|---|
| Temperatura ambiente, °C | 20°C |
| Pérdida de calor a través del refractario, Kcal/h m$^2$ | **1 722** |
| Temperatura exterior al shell del horno, °C | **247°C** |
| espesor del refractario, m | |
| conductividad térmica, kcal/h. m$^2$ | |

**UTILIZACIÓN DE REFRACTARIO**

Tipo de material refractario: 1 capa




| | |
|---|---|
| Temperatura ambiente, °C | 20°C |
| Pérdida de calor a través del refractario, kcal/h m$^2$ | **10 906** |
| Temperatura exterior al shell del horno, °C | **320°C** |
| espesor del refractario, m | |
| conductividad térmica, Kcal/h.m$^2$ | |

| | | |
|---|---|---|
| Diámetro interior horno sin refractario | m | 5,20 |
| Producción de clinker | TM/día | 3 992 |
| Área del refractario en el horno | m$^2$ | 228,6 |
| Precio del carbón bituminoso | $/TM | 84,1 |
| Longitud a cambiar refractario | m | 14 |
| Ahorro energía térmica por nuevo refractario | Kcal/Kg clinker | 12,62 |
| Ahorro por menor perdida calor | $/día | **$602** |
| Precio del ladrillo refractario Almag 85 | $/TM | 1 050 |
| Precio del ladrillo refractario Almag 85 C | $/TM | 1 150 |
| diferencia de precio entre refractarios | $/TM | 100 |
| Peso del refractario por metro lineal | TM/ml | 6,195 |
| Peso total del ladrillo refractario | TM | 86,73 |
| Costo del ladrillo Almag 85 | $ | 91 067 |
| Costo del ladrillo Almag 85 C | $ | 99 740 |
| Vida útil de refractario | mes | 12 |
| Diferencia costo de refractario | $ | **$8 673** |
| **Ahorro al año** | $/año | **$172 040** |

Ladrillos refractarios utilizados en la prueba



ALMAG 85



ALMAG 85 C

**Tabla 1:** Conductividad térmica de refractarios

| Ladrillo | Base materias primas | Análisis químico, % | | | | | Conductividad térmica, W/m.k | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | MgO | $Fe_2O_3$ | CaO | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | 800 °C | 1200 °C |
| Básicos | Magnesita | >80% | 3 - 10% | 1 - 4% | <5% | 1 - 3% | 4,00 | 3,00 |
| Básicos | Magnesita | >90% | <0.5% | <2% | 1 - 3% | <0.5% | 3,20 | 2,80 |
| Básicos | Espinela periclasa | 80 - 90% | <1% | <1% | 5 - 15% | <1% | 3,00 | 2,80 |
| Almag 85 | Espinela periclasa | 85-89% | 0,50% | 1% | 9-12% | 0,50% | 3,00 | 2,70 |
| Alta alúmina | Bauxita/corindón | | <1.5% | | 80-90% | <12% | 2,20 | 2,20 |
| Alta alúmina | Bauxita | | <2% | | 70-80% | 15-20% | 1,60 | 1,60 |
| Alta alúmina | Corindón | | <1% | | >90% | 9-6% | 2,00 | 2,20 |
| Chamota | Chamota | | <3% | | 30-35% | 60-65% | 1,40 | 1,40 |
| Aislantes | Aislante | | <4% | | 22-26% | 51-55% | 0,25 | |
| Aislantes | Moler | | <5% | | 11-13% | 75-80% | 0,21 | |
| Placa fibra cerámica | | | | | | | 0,22 | 0,33 |
| | | | | | | | 100 °C | 300 °C |
| Aire | | | | | | | 0,032 | 0,046 |

**Fuente**: Carniglia S. Y Barma G. (1992) “Handbook of Industrial Refractories Technology”

## ANEXO X: Perfil de temperatura al exterior del horno en prueba de nuevo ladrillo refractario

| Fecha | Temperatura °C | | Fecha | Temperatura °C | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ALMAG 85 | ALMAG 85 C | | ALMAG 85 | ALMAG 85 C |
| 17-Ago | 330 | 302 | 04-Sep | 302 | 210 |
| | 280 | 236 | | 323 | 222 |
| | 258 | 284 | | 328 | 216 |
| 18-Ago | 207 | 255 | 05-Sep | 319 | 215 |
| | 189 | 277 | | 328 | 293 |
| | 317 | 264 | | 303 | 243 |
| 19-Ago | 176 | 236 | 06-Sep | 332 | 298 |
| | 183 | 280 | | 336 | 300 |
| | 311 | 270 | | 341 | 304 |
| 20-Ago | 226 | 306 | 07-Sep | 331 | 301 |
| | 317 | 298 | | 341 | 295 |
| | 287 | 298 | | 348 | 296 |
| 21-Ago | 312 | 294 | 08-Sep | 337 | 294 |
| | 274 | 296 | | 336 | 299 |
| | 359 | 282 | | 352 | 301 |
| 22-Ago | 324 | 305 | 09-Sep | 336 | 257 |
| | 331 | 301 | | 327 | 268 |
| | 310 | 298 | | 343 | 261 |
| 23-Ago | 317 | 293 | 10-Sep | 339 | 250 |
| | 314 | 290 | | 319 | 215 |
| | 327 | 295 | | 326 | 247 |
| 24-Ago | 361 | 304 | 11-Sep | 319 | 260 |
| | 323 | 295 | | 366 | 294 |
| | 295 | 291 | | 315 | 225 |
| 25-Ago | 280 | 281 | 12-Sep | 369 | 298 |
| | 340 | 211 | | 365 | 300 |
| | 308 | 195 | | 330 | 252 |
| 26-Ago | 302 | 173 | 13-Sep | 333 | 303 |
| | 348 | 130 | | 323 | 299 |
| | 364 | 138 | | 263 | 277 |
| 27-Ago | 337 | 132 | 14-Sep | 287 | 269 |
| | 326 | 132 | | 307 | 272 |
| | 339 | 141 | | 281 | 274 |
| 28-Ago | 337 | 156 | 15-Sep | 332 | 257 |
| | 342 | 150 | | 362 | 266 |
| | 312 | 170 | | 285 | 251 |
| 29-Ago | 334 | 140 | 16-Sep | 368 | 286 |
| | 346 | 167 | | 353 | 288 |
| | 278 | 160 | | 316 | 244 |
| 30-Ago | 320 | 187 | 17-Sep | 313 | 267 |
| | 330 | 192 | | 356 | 265 |
| | 326 | 217 | | 338 | 269 |
| 31-Ago | 327 | 215 | 18-Sep | 325 | 300 |
| | 341 | 206 | | 325 | 307 |
| | 340 | 191 | | 273 | 300 |
| 01-Sep | 341 | 194 | 19-Sep | 325 | 297 |
| | 298 | 176 | | 342 | 299 |
| | 335 | 162 | | 350 | 250 |
| 02-Sep | 325 | 168 | 20-Sep | 337 | 255 |
| | 326 | 186 | | 345 | 234 |
| | 327 | 185 | | 306 | 229 |
| 03-Sep | 333 | 185 | 21-Sep | 332 | 249 |
| | 331 | 151 | | 350 | 238 |
| | 332 | 200 | | | |

Fuente: Elaboración propia, medidas de temperaturas tomadas cada 8 horas

## ANEXO XI: Ahorro de energía por cambio de placas en el enfriador

**Tabla 1:** Ahorro de energía por cambio de placas en primer cuerpo del enfriador

| | | |
|---|---|---|
| Producción clinker | TM/día | 3 992 |
| Aire peso específico a 20$^{o}$C | Kg/m$^{3}$ | 1,205 |
| Aire total que ingresa al horno (secundario y primario) | Kg/Kg clinker | 1,336 |
| Aire total para enfriamiento | Kg/Kg clinker | 3,086 |
| Aire que ingresa a multiciclones | Kg/Kg clinker | 1,750 |
| Aire primario (axial mas radial) | Kg/Kg clinker | 0,077 |
| Aire secundario desde el enfriador al horno | Kg/Kg clinker | 1,259 |
| Pérdida calor en el enfriador | Kcal/Kg clinker | 97,63 |
| Propuesta, máxima pérdida con nuevas placas CFG | Kcal/Kg clinker | 85,0 |
| Ahorro energía por tipo placa | Kcal/Kg clinker | 12,6 |
| Calor total para ahorrar | Kcal/Kg clinker | 13,89 |
| Porcentaje de ahorro de electricidad | % | 4,17 |
| Electricidad a ahorrar | KWh/TM clinker | 0,42 |
| Ahorro calor US$/día | $/día | **662,8** |
| Ahorro electricidad US$/día | $/día | **92,6** |
| **Ahorro total por cambio placas primer cuerpo** | $/día | **755,4** |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2:** Cantidad de aire a través de parrillas del enfriador

| Ventilador | Área descarga | Motor ventilador | Abertura compuerta | Presión en clinker | Aire | | Clinker |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | m$^{2}$ | Amp. | % | mb | m$^{3}$/h | Kg/m$^{2}$/min | Kg/Kg clinker |
| K | 3,2 | 200 | 90 | 72 | 40000 | 251 | 0,29 |
| K 176 | 4,8 | 200 | 45 | 74 | 48 000 | 201 | 0,35 |
| K178 | 8,3 | 220 | 42 | 76 | 42 000 | 102 | 0,30 |
| K180 | 11,4 | 220 | 34 | 74 | 42 000 | 74 | 0,30 |
| K182 | 10,1 | 210 | 53 | 58 | 40 000 | 80 | 0,29 |
| K184 | 10,1 | 190 | 38 | 54 | 42 000 | 83 | 0,30 |
| K186 | 19,0 | 300 | 36 | 52 | 40 000 | 42 | 0,29 |
| K188 | 10,1 | 210 | 37 | 38 | 43 000 | 85 | 0,31 |
| K192 | 10,1 | 178 | 48 | 32 | 40 000 | 80 | 0,29 |
| K194 | 17,7 | 170 | 17 | 22 | 49 000 | 56 | 0,35 |
| **SUMA** | **104,8** | | | | **426 000** | **1 053** | **3,09** |

**Fuente:** Elaboración propia

## ANEXO XII: Paradas del horno por atoros del precalentador

**Tabla 1:** Número paradas del horno por atoros del precalentador

| Nº Paradas, al mes | RAS, % |
|---|---|
| 0 | 1,10 |
| 1 | 1,14 |
| 3 | 1,12 |
| 4 | 1,15 |
| 5 | 1,12 |
| 7 | 1,14 |
| 9 | 1,13 |
| 10 | 1,15 |
| 11 | 1,12 |
| 12 | 1,13 |
| 13 | 1,13 |
| 15 | 1,20 |
| 16 | 1,18 |
| 18 | 1,25 |
| 19 | 1,19 |
| 21 | 1,22 |
| 23 | 1,27 |
| 25 | 1,28 |

**Fuente:** Elaboración propia en empresa base del estudio

**Tabla 2:** Ahorros por cambio de composición química en el crudo para regular el RAS

| | | |
|---|---|---|
| Tiempo de demora por limpieza o descostre | h | 8 |
| Tiempo de calentamiento y normalización horno | h | 4 |
| Tiempo total de pérdida de producción | h/año | 1 008 |
| Número paralizaciones del horno por atoros al año | | 84 |
| Producción horaria de clinker del horno | TM/h | 166,3 |
| Clinker dejado producir por efecto de atoros | TM/año | 167 656 |
| Precio de clinker | $/TM | 20,0 |
| Pérdida por no producción | $/año | 3 353 112 |
| Harina cruda necesaria para producir el clinker | TM/h | 266,12 |
| Incremento de costo por cambios en la materia prima | $/TM | 1,22 |
| Incremento del costo de clinker por nuevos materiales | $/TM | 2,05 |
| Aumento de costo del clinker por cambio en las materias primas | $/año | 2 450 736 |
| Ahorro al usar nuevo crudo | $/año | **902 376** |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3:** Materias primas para diseño de crudo y control del RAS

| | Cantera 1 | Cantera 5 | Sílice | Hierro |
|---|---|---|---|---|
| **$Na_2O$** | 0,23 | 0,18 | 0,09 | 0,01 |
| **$K_2O$** | 0,85 | 0,47 | 0,11 | 0,03 |
| **$Al_2O_3$** | 4,46 | 3,24 | 0,98 | 2,32 |
| **$SO_3$** | 1,21 | 0,12 | 0,11 | 0,23 |
| **$SiO_2$** | 13,12 | 9,65 | 97,18 | 11,49 |
| **$Fe_2O_3$** | 2,10 | 1,61 | 0,49 | 67,27 |
| **CaO** | 42,99 | 46,06 | 0,04 | 8,92 |
| **MgO** | 2,45 | 1,88 | 0,05 | 1,57 |
| **Pérdida al fuego, P.F.** | 32,73 | 36,73 | 0,72 | 7,29 |
| **Total** | 100,14 | 99,94 | 99,77 | 99,13 |
| | | | | |
| **Álcalis Total, AT** | 0,79 | 0,49 | 0,16 | 0,03 |
| **Saturación de Cal, SC** | 99,14 | 144,44 | 0,01 | 11,34 |
| **Módulo Silícico, MSi** | 2,00 | 1,99 | 66,11 | 0,17 |
| **Módulo Fundentes, MF** | 2,12 | 2,01 | 2,00 | 0,03 |
| **$CaCO_3$** | 76,8 | 82,3 | 0,1 | 15,9 |
| **RAS** | 1,25 | 0,21 | | |
| **Costo US$/TM** | 3,62 | 8,12 | 15,24 | 20,10 |

| Requerido en mezcla de materiales | | Clinker |
|---|---|---|
| **SC** | **0,96** | 97,54 |
| **MSi** | **2,02** | 2,24 |
| **MF** | **1,57** | 2,12 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Coeficientes** en ecuación de mezcla de 4 componentes | **$a_1$** | **$b_1$** | **$c_1$** | **$d_1$** |
| | -1,36 | -15,45 | 262,60 | -66,57 |
| | **$a_2$** | **$b_2$** | **$c_2$** | **$d_2$** |
| | 0,13 | 0,15 | -94,21 | -129,08 |
| | **$a_3$** | **$b_3$** | **$c_3$** | **$d_3$** |
| | -1,15 | -0,71 | -0,21 | -103,56 |

| Componentes | % |
|---|---|
| **Caliza 1** | **75,13** |
| **Caliza 2** | **23,36** |
| **Sílice** | **1,51** |
| **Fierro** | **0,00** |
| | **100,00** |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4:** Incremento costo por nuevo diseño de mezcla

| | Porcentaje % | Costo US$/TM | Costo Ponderado US$/TM |
|---|---|---|---|
| Caliza Cantera 1 | 75,13 | 3,62 | 2,72 |
| Caliza Cantera 5 | 23,36 | 8,12 | 1,90 |
| Sílice | 1,51 | 15,24 | 0,23 |
| Fierro | 0,00 | 20,10 | 0,00 |
| Costo Total, US$/TM | | | 4,84 |
| Mayor costo por TM materia prima | | | 1,22 |
| Mayor costo por TM de cemento actual (f:1.56) | | | 1,91 |

| | Crudo Obtenido | Clinker Teórico |
|---|---|---|
| **$Na_2O$** | 0,22 | 0,32 |
| **$K_2O$** | 0,75 | 1,12 |
| **$Al_2O_3$** | 4,12 | 6,16 |
| **$SO_3$** | 0,94 | 1,40 |
| **$SiO_2$** | 13,58 | 20,30 |
| **$Fe_2O_3$** | 1,95 | 2,91 |
| **CaO** | 43,07 | 64,37 |
| **MgO** | 2,28 | 3,41 |
| **Pérdida al fuego, P.F.** | 33,19 | |
| **Total** | 100,09 | 100,00 |
| | | |
| **Álcalis total, A.T.** | 0,71 | 1,06 |
| **Saturación de cal, SC** | 97,54 | 97,54 |
| **Módulo silícico, MSi** | 2,24 | 2,24 |
| **Módulo fundentes, MF** | 2,12 | 2,12 |
| **RAS** = $SO_3/(K_2O+Na_2O)$ | 1,09 | 1,09 |
| **Fases mineralógicas de Bogue** | | |
| **$C_3S$** | | 62,20 |
| **$C_2S$** | | 13,11 |
| **$C_3A$** | | 11,41 |
| **$C_4AF$** | | 8,85 |
| **Fase Líquida** | | 29,56 |

Fuente: elaboración propia

## ANEXO XIII: Comparación del consumo de electricidad por tipo de equipo de molienda

**Tabla 1:** Comparación del consumo de electricidad por tipo de equipo de molienda

| CONFIGURACIÓN | MOLINO DE BOLAS | PRENSA RODILLOS | MOLIENDA COMBINADA |
|---|---|---|---|
| Producción de cemento, TM/h | 107 | 128 | 172 |
| Dureza del clinker de alimentación, KWh/TM | 14,35 | 14,53 | 14,46 |
| Fineza Blaine, $cm^2$ /g | 3 146 | 3 136 | 3 106 |
| Accionamiento principal del molino, KWh/TM | 35,7 | | 12,55 |
| Accionamiento principal de la prensa, KWh/TM | | 17,82 | 11,81 |
| Ventilador, KWh/TM | 4,58 | 4,39 | 5,41 |
| Separadora, KWh/TM | | 1,69 | 1,42 |
| Equipos auxiliares, KWh/TM | 4,87 | 6,23 | 5,63 |
| Total, KWh/TM | **45,15** | **30,13** | **36,82** |

| | | |
|---|---|---|
| Costo electricidad, US$/KWh | | 0,0557 |
| Ahorro electricidad por uso de prensa por molino, US$/TM | | 0,8366 |
| Ahorro electricidad por uso de prensa por molino, **US$/día** | | **2 142** |
| Costo del cemento tipo I, US$/TM | 32,83 | |
| Trabajo día promedio de una prensa, h | 20 | |

Fuente: Elaboración propia

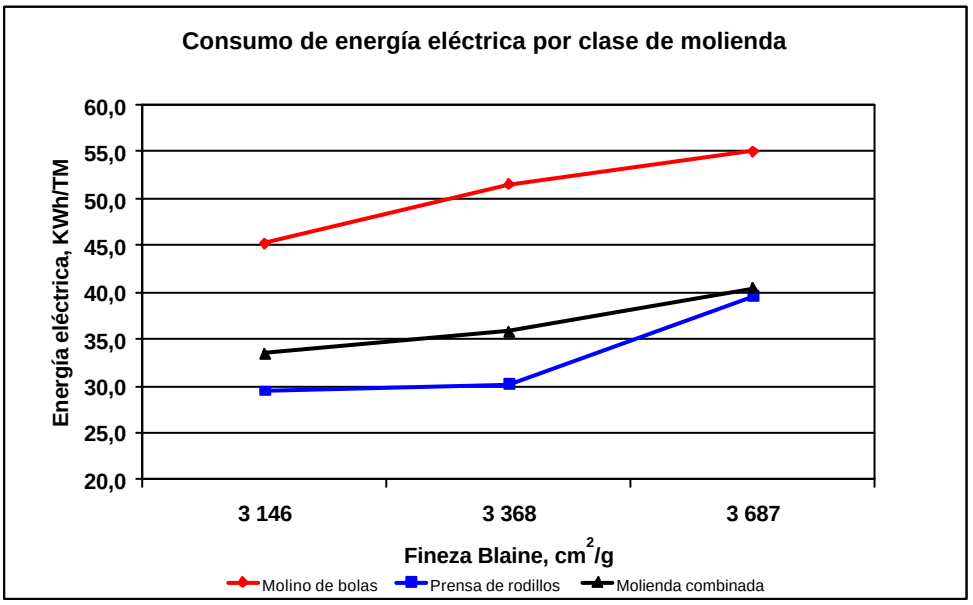



**Figura 1:** Consumo de energía eléctrica por clase de equipo de molienda
Fuente: Elaboración propia

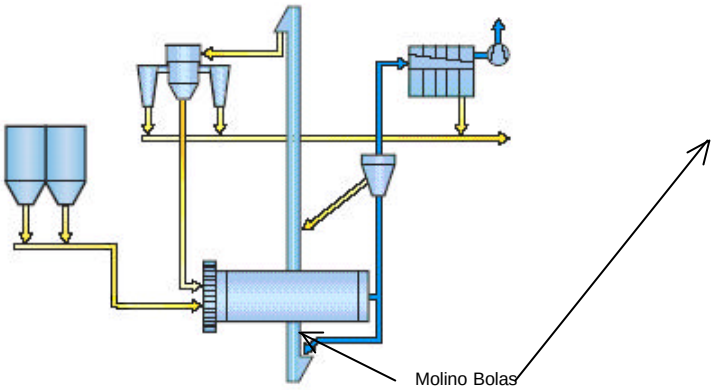



**FIGURA 2:** Molienda con molino de bolas
Fuente: Esquema utilizado en la empresa base del estudio

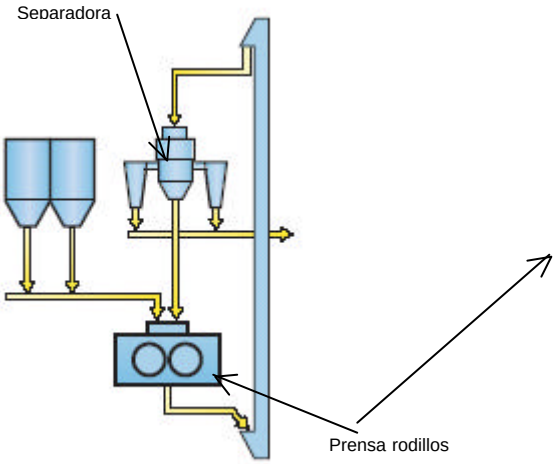



**Figura 3:** Molienda Integral con Prensa de Rodillos
Fuente: Esquema utilizado en la empresa base del estudio

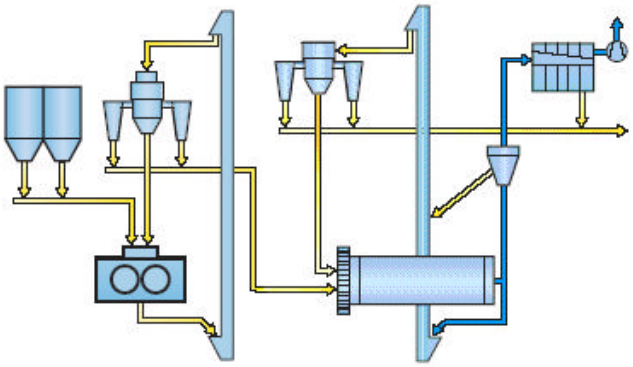


**Figura 4:** Molienda Combinada de prensa y molino de bolas
Fuente: Esquema utilizado en la empresa base del estudio

**Tabla 2:** Propiedades del cemento obtenido en diversos equipos

| ENSAYOS FÍSICOS | MOLINO DE BOLAS | PRENSA RODILLOS | MOLIENDA COMBINADA |
|---|---|---|---|
| Fineza Blaine, $cm^2/gr$ | 3 146 | 3 136 | 3 106 |
| Contenido de aire, % | 7,01 | 7,51 | 6,7 |
| Expansión al autoclave, % | 0,27 | 0,30 | 0,21 |
| Peso específico, $g/cm^3$ | 3,11 | 3,11 | 3,13 |
| Fraguado Vicat inicial, minutos | 130 | 141 | 130 |
| Fraguado Vicat final, minutos | 255 | 265 | 220 |
| **Resistencia a Compresión, Kg /$cm^2$** | | | |
| 1 día | 111 | 154 | 149 |
| 3 días | 241 | 280 | 257 |
| 7 días | 298 | 320 | 304 |
| 28 días | 366 | 402 | 373 |

Fuente: Elaboración propia

## Anexo XIV: Consumo anual de energía eléctrica y térmica

| Proceso | Producción por procesos | Factor consumo | Producción Equivalente | Consumo energía eléctrica | Consumo energía eléctrica | Consumo energía térmica | Total, consumo energético | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | TM | | TM equiv. | KWh | Kcal/Kg equiv. | Kcal/Kg equiv. | Kcal/Kg equiv. | % |
| **Trituración Primaria** | 1,945,782 | 0.9925 | 1,318,949 | 409,295 | 0.27 | | 0.27 | 0.03 |
| **Trituración Secundaria** | 1,945,319 | 0.9925 | 1,318,635 | 4,279,708 | 2.79 | | 2.79 | 0.32 |
| **Molienda de Crudo** | 1,931,805 | 1.6000 | 1,299,654 | 35,776,935 | 23.67 | | 23.67 | 2.68 |
| **Clinkerización** | 1,200,877 | 0.9290 | 1,292,656 | 44,215,021 | 29.42 | 783.00 | 812.41 | 91.89 |
| **Molienda de Cemento** | 1,637,544 | 1.0000 | 1,637,544 | 75,044,941 | 39.41 | | 39.41 | 4.46 |
| **Despacho** | 1,618,643 | 1.0000 | 1,618,643 | 1,530,810 | 0.81 | | 0.81 | 0.09 |
| **Auxiliares** | 1,414,690 | 1.0000 | 1,414,348 | 7,851,116 | 4.77 | | 4.77 | 0.54 |
| **Total** | | | | 169,107,826 | 101.15 | | 884.14 | 100.00 |

**Fuente:** Elaboración propia basada en dato de empresa base del estudio.

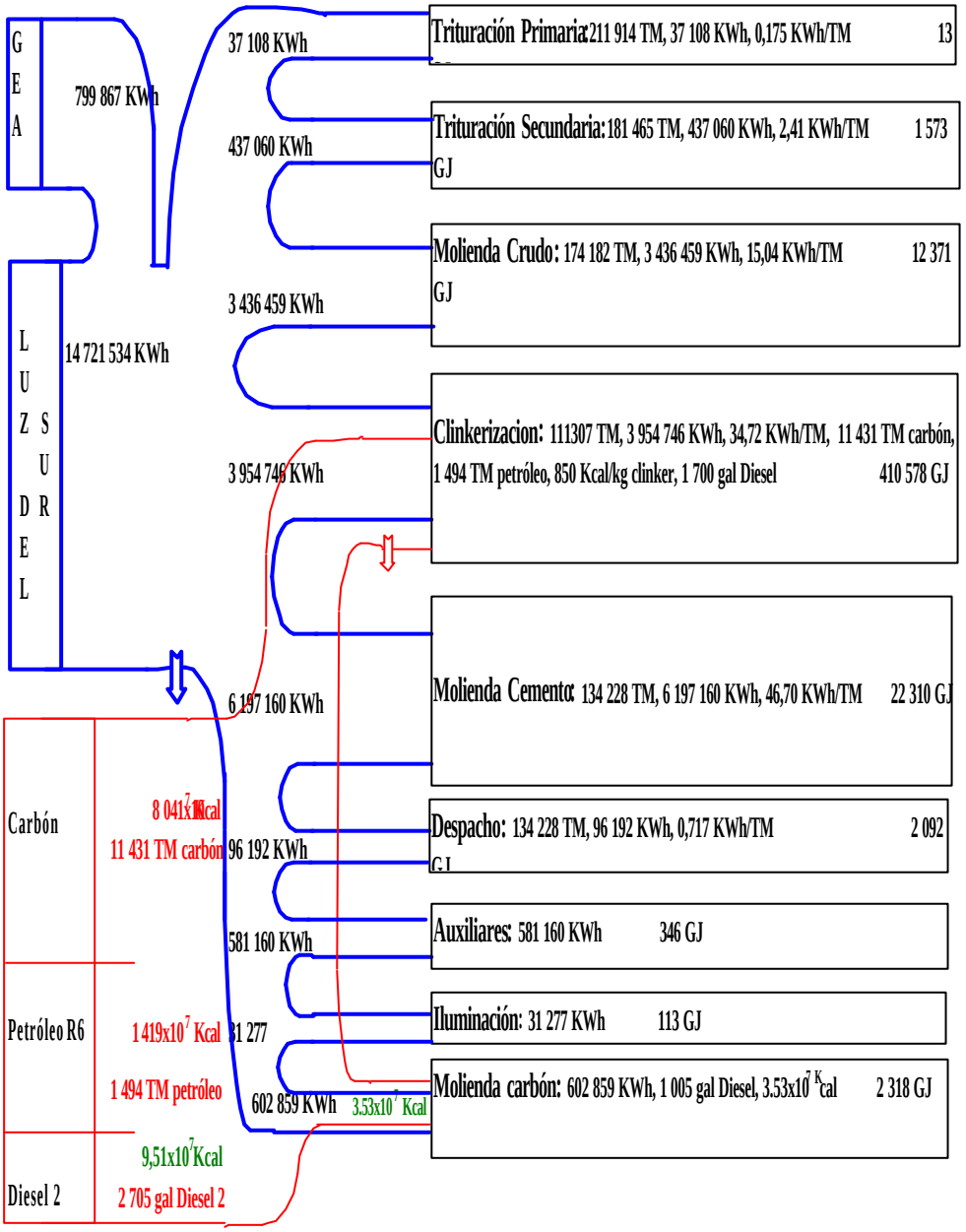
## **Anexo XV**: **Ahorro de energía eléctrica por programación fuera de horas punta**

| Año | Total KWh | Horas Punta KWh | % Energía en Horas Punta | Venta cemento, TM | Consumo específico KWh/TM |
|---|---|---|---|---|---|
| **1993** | 144 565 059 | 22 689 858 | 15,7% | 1 020 766 | **141,62** |
| **1994** | 150 487 780 | 20 393 095 | 13,6% | 1 271 568 | **118,35** |
| **1995** | 175 590 775 | 27 180 779 | 15,5% | 1 561 709 | **112,44** |
| **1996** | 178 024 828 | 21 543 079 | 12,1% | 1 611 251 | **110,49** |
| **1997** | 200 998 180 | 33 867 068 | 16,8% | 1 854 704 | **108,37** |
| **1998** | 237 925 683 | 40 030 663 | 16,8% | 1 915 592 | **124,20** |
| **1999** | 169 571 124 | 26 950 518 | 15,9% | 1 624 524 | **104,38** |
| **2000** | 162 858 158 | 20 463 956 | 12,6% | 1 567 627 | **103,89** |
| **2001** | 152 866 133 | 18 307 999 | 12,0% | 1 598 956 | **95,60** |
| **2002** | 193 321 772 | 27 348 349 | 14,1% | 1 995 709 | **96,87** |
| **2003** | 194 961 557 | 25 832 720 | 13,3% | 1 851 406 | **105,30** |
| **2004** | 240 936 695 | 24 894 475 | 10,3% | 2 145 820 | **112,28** |

| | | |
|---|---|---|
| Sin programa de ahorro energía | 15% | |
| Con programa de ahorro energía | 12% | |
| Diferencia | 3% | |
| Ahorro de energía | 683 371 | KWh |
| Precio en hora punta del KWh | 0,1172 | $/KWh |
| Precio en fuera hora punta del KWh | 0,0557 | $/KWh |
| Ahorro $/año | **42 027** | $/año |

Fuente: elaboración propia

## Anexo XVI: Diagrama de flujo de energía mensual en planta cementera




Fuente: Elaboración propia

## ANEXO XVII: Balance de Materia y energía en el sistema del Horno 1

| | kcal/h | kcal/kg | % |
|---|---|---|---|
| **ENTRADAS** | | | |
| Calor sensible de la harina cruda | 1 690 861 | 9,87 | 1,17% |
| Calor del polvo del electrofiltro | 12 180 | 0,07 | 0,01% |
| Calor con el aire de transporte de la harina cruda | 19 216 | 0,11 | 0,01% |
| Calor sensible del carbón | 97 082 | 0,57 | 0,07% |
| Calor de combustión | 142 669 800 | 832,82 | 98,74% |
| | 144 489 139 | 843,4 | 100,00% |

| **SALIDAS** | **kcal/h** | **kcal/kg** | **%** |
|---|---|---|---|
| Calor de reacción | 73 340 738 | 428,12 | 50,76% |
| Vaporización del agua de la harina cruda | 635 040 | 3,71 | 0,44% |
| Vaporización del agua del carbón | 155 507 | 0,91 | 0,11% |
| Contenido de calor en el clinker | 6 948 308 | 40,56 | 4,81% |
| Pérdidas por radiación y convección en el enfriador | 46 516 | 0,27 | 0,03% |
| Pérdidas por radiación y convección en el horno | 7 257 231 | 42,36 | 5,02% |
| Pérdidas por radiación y convección en el precalentador | 8 172 360 | 47,71 | 5,66% |
| Exceso de aire en el enfriador | 9 718 858 | 56,73 | 6,73% |
| Aire falso en el enfriador | 10 616 | 0,06 | 0,01% |
| Aire falso en el precalentador | 5 470 041 | 31,93 | 3,79% |
| Pérdidas por el aire de transporte de la harina cruda | 823 900 | 4,81 | 0,57% |
| Recuperación polvo del electrofiltro | 0 | 0,00 | 0,00% |
| Gases de escape por el precalentador | 31 820 029 | 185,75 | 22,02% |
| Sin determinar | 89 996 | 0,53 | 0,06% |
| | 144 489 139 | 843,4 | 100,00% |

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO XVIII: Diversas alternativas de ahorro de energía

### a. Ahorros por cambio de tipo de bomba para transporte de carbón

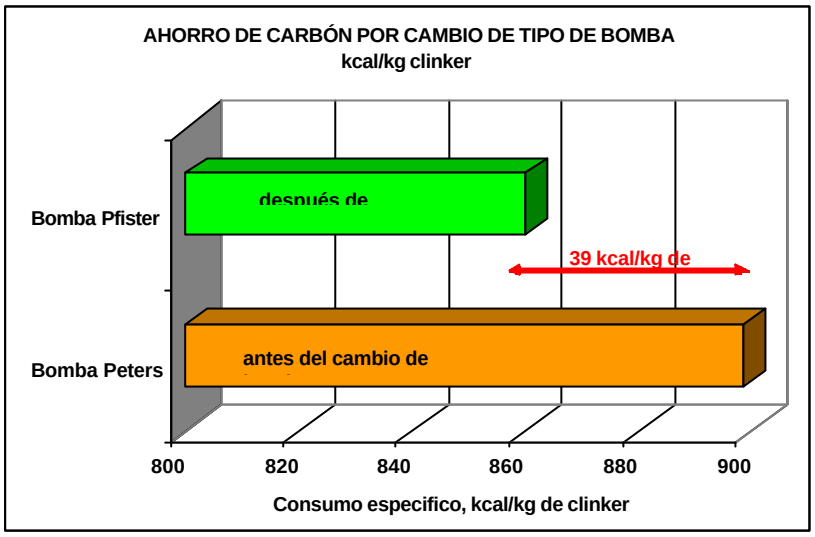



**Figura 1:** Variación de consumo de energía entre sistema de transporte
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 1:** Consumo de combustible y el sistema de bombeo, Kcal/TM clinker

| | CARBÓN | PETRÓLEO | TOTAL |
|---|---|---|---|
| ENE | 853 | 28 | **881** |
| FEB | 818 | 97 | **915** |
| MAR | 611 | 292 | **904** |
| ABR | 815 | 105 | **920** |
| MAY | 336 | 618 | **953** |
| JUN | 872 | 24 | **896** |
| JUL | 812 | 61 | **873** |
| AGO | 751 | 127 | **878** |
| SET | 721 | 160 | **881** |
| OCT | 738 | 141 | **880** |
| NOV | 685 | 197 | **882** |
| DIC | 747 | 146 | **893** |
| ENE | 774 | 153 | **927** |
| FEB | 847 | 78 | **924** |
| MAR | 792 | 108 | **900** |
| ABR | 740 | 158 | **898** |
| MAY | 760 | 86 | **846** |
| JUN | 803 | 70 | **872** |
| JUL | 797 | 60 | **857** |
| AGO | 679 | 189 | **869** |
| SET | 793 | 37 | **830** |
| OCT | 790 | 38 | **828** |
| NOV | 795 | 52 | **847** |
| DIC | 809 | 46 | **854** |
| ENE | 763 | 98 | **861** |

Fuente: Elaboración propia de datos de la empresa base del estudio

## b. Ahorros por reducción de CO en humos de escape

**Tabla 2:** Datos del combustible y gases de escape

| | | |
|---|---|---|
| Análisis del carbón | | |
| Carbono | % | 74,69 |
| Oxigeno | % | 4,73 |
| Hidrogeno | % | 5,12 |
| Azufre | % | 0,77 |
| Nitrógeno | % | |
| Cenizas | % | 12,45 |
| Humedad | % | 1,42 |
| Precio Carbón | $/TM | 84,10 |
| Clinker producido | TM/h | 166,3 |
| Alimentación de Crudo al Horno | TM/h | 279 |
| Gases Escape, seco | Nm3/h | 264 070 |
| Calor producido por el CO2 | kcal/kmol | 97 800 |
| Calor producido por el CO | kcal/kmol | 29 280 |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3:** Pérdidas económicas por presencia de CO en gases escape

| **Monóxido de carbono CO, a salida Precalentador** | **%** | **0,10** | **0,20** | **0,25** | **0,30** | **0,35** | **0,40** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CO | $Nm^3/h$ | 264 | 528 | 660 | 792 | 924 | 1056 |
| Pérdida de calor | Kcal/Kg clinker | 4,86 | 9,71 | 12,14 | 14,57 | 17,00 | 19,43 |
| Pérdida como Carbón | TM /h | 0,19 | 0,38 | 0,47 | 0,57 | 0,66 | 0,76 |
| Pérdida $/hora | $/hora | 15,93 | 31,86 | 39,82 | 47,79 | 55,75 | 63,72 |
| **Ahorro/Pérdida $/año** | **$/año** | **137 626** | **275 251** | **344 064** | **412 877** | **481 690** | **550 502** |
| **Ahorro/Pérdida $/día** | $/día | **382** | **765** | **956** | **1 147** | **1 338** | **1 529** |

Fuente: Elaboración propia

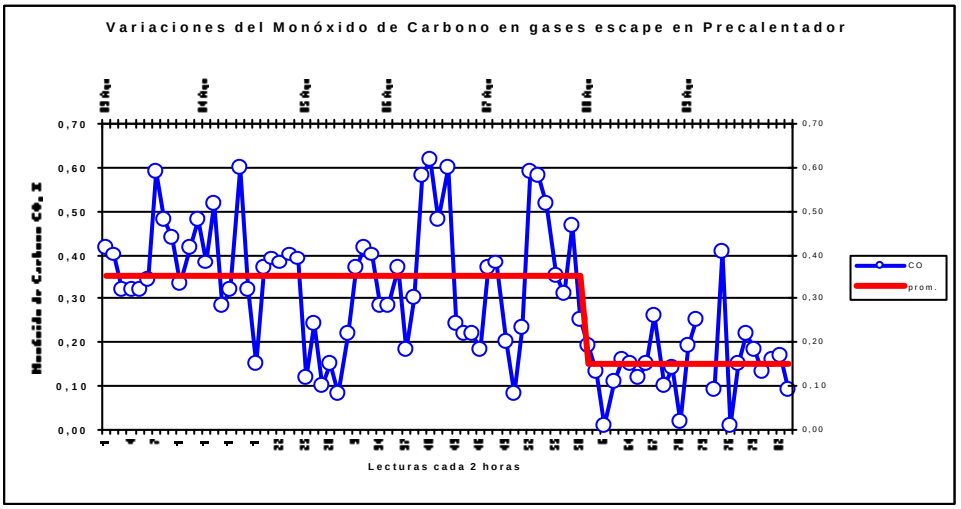



**Figura 2:** Variación CO en gases escape antes y tras regulación
Fuente: Elaboración propia

### c. Ahorros por nuevos cementos, reemplazo del clinker por adiciones

**Tabla 4:** Reemplazo de clinker por adición de polvo en el cemento tipo I

| Adición | | 0% de Polvo | 2% de Polvo | 4% de Polvo |
|---|---|---|---|---|
| **Composición del cemento** | | | | |
| $SiO_2$ | % | 19,69 | 19,60 | 19,51 |
| $Al_2O_3$ | % | 5,71 | 5,70 | 5,69 |
| $Fe_2O_3$ | % | 3,08 | 3,05 | 3,04 |
| CaO | % | 62,93 | 62,83 | 62,83 |
| MgO | % | 3,31 | 3,29 | 3,28 |
| $SO_3$ | % | 2,98 | 2,85 | 2,82 |
| $K_2O$ | % | 0,85 | 0,83 | 0,84 |
| $Na_2O$ | % | 0,30 | 0,29 | 0,29 |
| Pérdida Ignición | % | 1,21 | 1,89 | 2,54 |
| Total | % | 100,06 | 100,33 | 100,84 |
| Residuo Insoluble | % | 0,72 | 0,36 | 0,50 |
| **Finezas** | | | | |
| Retenido en malla 325 | % | 17,30 | 16,83 | 16,17 |
| Fineza Blaine | $cm^2/g$ | 3 460 | 3 540 | 3 650 |
| **Resistencia a la comprensión** | | | | |
| 1 día | $Kg/cm^2$ | 169 | 176 | 171 |
| 3 días | $Kg/cm^2$ | 282 | 302 | 298 |
| 7 días | $Kg/cm^2$ | 336 | 365 | 354 |
| 28 días | $Kg/cm^2$ | 399 | 420 | 407 |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5:** Ahorros por adición de polvo en el cemento

| Componentes | Si adición % | Precio US$/TM | Cemento US$/TM | Con adición % | Precio US$/TM | Cemento US$/TM | Ä Costo US$/TM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Clinker | 95,5% | 31,21 | 29,81 | 91,5% | 31,21 | 28,56 | -1,25 |
| Yeso | 4,5% | 16,98 | 0,76 | 4,5% | 16,98 | 0,76 | 0,00 |
| Polvo de filtro | 0,0% | 4,70 | 0,00 | 4,0% | 4,70 | 0,19 | 0,19 |
| | 100% | | 30,57 | 100% | | 29,51 | -1,06 |
| Costo unitario del cemento, US$/TM | | | | 32,83 | | | |
| **Variación en costo por uso de polvo, US$/TM** | | | | **-1,06** | -3,2% | | |

Fuente: Elaboración propia

### d. Uso de la Fluorita como mineralizador

La adición del $CaF_2$ a la harina cruda en determinada proporción permite la obtención del clinker a menor temperatura cumpliendo los requerimientos de las normas ASTM C150 y la norma peruana NTP 334.009.

**Tabla 6:** Reducción de temperatura clinkerización usando mineralizador

| Temperatura de clinkerización, $^oC$ | | **1 250** | **1 300** | **1 350** | **1 400** |
|---|---|---|---|---|---|
| Concentración del mineralizador, $CaF_2$ | Periodo | Resistencia a compresión, $Kg/cm^2$ | | | |
| **0,00%** | 28 días | 329 | 452 | 466 | 446 |
| **0,40%** | 28 días | 384 | 485 | 498 | 485 |
| **0,75%** | 28 días | 429 | 499 | 485 | 486 |

Fuente: Elaboración propia

Considerando que la transmisión de calor por radiación:

$Q = â ó (T_f^4 - T_m^4)$

$Q_1 = â ó [(T_f)^4 - (T_{1450})^4] =$

$Q_2 = â ó [(T_f)^4 - (T_{1300})^4] =$

| | | |
|---|---|---|
| Absorbancia, â (de 0 a 1): | 1,00 | |
| Constante de Stefan, ó: | 5,67E-08 | $W/m^2 K^4$ |
| $T_{1450}$ : | 1 723 | $^oK$ |
| $T_{1300}$ : | 1 573 | $^oK$ |
| Poder calorífico del carbón, Pci: | 7 039 | Kcal/Kg |
| Diámetro horno, m: | 5,20 | m |
| Precio, US$/TM carbón: | 114,00 | US$/TM |
| Longitud llama, m: | 8,00 | m |
| Área proyectada llama = P x L: | 130,69 | $m^2$ |

$Q = â ó [(T_{1450})^4 - (T_{1300})^4] =$ 131 227 Kcal/h $m^2$

Caudal de carbón ahorrado: 2,44 TM/h

**Ahorro por uso de la fluorita: 1 999 833 US$/año**

## ANEXO XIX: Ahorros de energía térmica en hornos por cambio de tecnología

**Tabla 1:** Ahorro de calor en los hornos por cambio de tecnología

| Año | Promedio, Kcal/Kg | Mínimo, Kcal/Kg | Máximo, Kcal/Kg |
|---|---|---|---|
| 1 994 | 874 | 831 | 917 |
| 1 995 | 848 | 805 | 892 |
| 1 996 | 909 | 866 | 952 |
| 1 997 | 875 | 831 | 918 |
| 1 998 | 880 | 837 | 924 |
| 1 999 | 737 | 718 | 755 |
| 2 000 | 722 | 704 | 741 |
| 2 001 | 736 | 718 | 754 |
| 2 002 | 740 | 722 | 758 |
| 2 003 | 737 | 718 | 755 |
| 2 004 | 751 | 733 | 769 |

Fuente: Elaboración propia

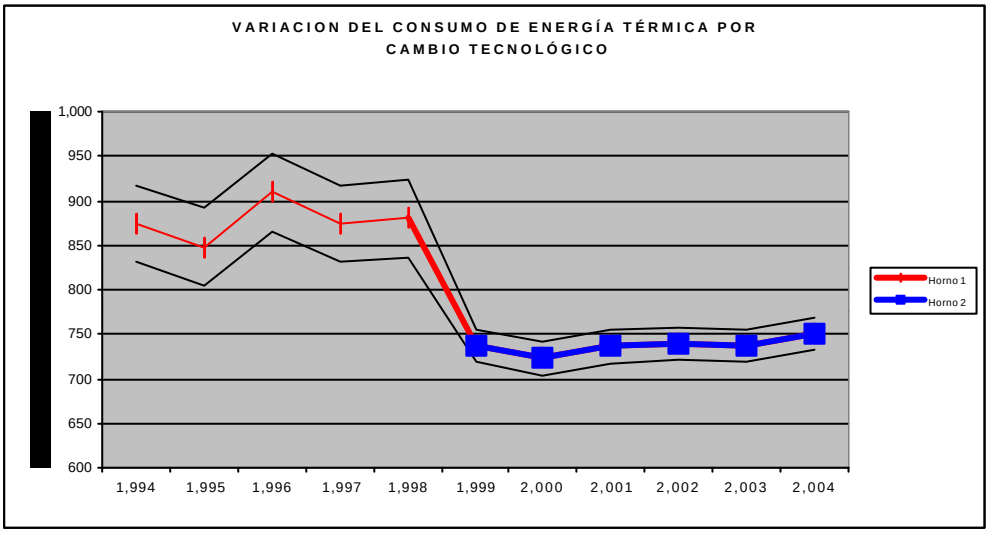



**Figura 1:** Variación del consumo de energía térmica por cambio de tecnología

Fuente: Elaboración con datos de empresa base del estudio

**Tabla 2:** Ahorro en energía térmica por cambio tecnológico

| | | |
|---|---|---|
| Consumo específico de calor antes del cambio tecnológico | Kcal/Kg clinker | 921 |
| Consumo específico de calor tras el cambio tecnológico | Kcal/Kg clinker | 755 |
| Variación en el consumo de calor | Kcal/Kg clinker | **165** |
| Precio Carbón bituminoso (Diciembre 2 004) | US$/TM | 84,1 |
| Poder calorífico inferior | Kcal/Kg carbón | 7.035 |
| Clinker en el cemento | % | 95,5% |
| Ahorro en el clinker por cambio tecnológico | US$/TM clinker | **1,974** |
| **Ahorro en el cemento por cambio tecnológico** | US$/TM cemento | **1,885** |

Fuente: Elaboración propia

## **ANEXO XX**: **Costo para implementar el modelo de ahorro de energía**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Comité para el Ahorro de energía** | US$/h-h | | | | |
| Logística | 8,4 | | | | |
| Producción | 8,4 | | | | |
| Mantenimiento Mecánico | 8,4 | | | | |
| Mantenimiento Eléctrico | 8,4 | | | | |
| Ingeniería | 8,4 | | | | |
| Control de Calidad | 8,4 | | | | |
| **Actividades** | Horas | Días | Personas | h-h | |
| Toma de información | 8 | 1 | 2 | 16 | |
| Inspección a instalaciones | 16 | 2 | 5 | 80 | |
| Toma de mediciones | 16 | 2 | 3 | 48 | |
| Cálculos y análisis | 16 | 2 | 3 | 48 | |
| Redacción de informe | 8 | 1 | 6 | 48 | |
| | 64 | 8 | | 240 | **$2 016** |
| **Equipos y materiales** | US$ | | | | **$200** |
| Computadora | | | | | |
| Pirómetro, vacuometro, otros | 120 | | | | |
| Papeles | 20 | | | | |
| Otros (analizadores portátiles) | 80 | | | | |
| **Frecuencia del Diagnóstico** | 2 | año | | | |
| Enero | 1 | | | | |
| Julio | 1 | | | | |
| **Costo de aplicar el modelo, US$/año** | | | | | **$4 432** |

Fuente: Elaboración propia

## ANEXO XXI: Medición del Nivel de Excelencia Operativa

**Tabla 1:** Tablero de Gestión de Excelencia Operativa y Ahorro de Energía

| *INDICADOR* | *Meta* | *Logro* | *Peso Relativo* | *variación* | *Factores* | | | | *Puntos* | *Valor ponderado* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | LP | AP | L% | R | | |
| **CALIDAD** | | | | | | | | | | |
| **Desv. estándar CaO en PH_I** | **0,82** | **0,98** | 15 | 84 | 7 | 10 | 80 | 20 | 7,55 | 1,13 |
| **Desv. estándar CaO en PH_II** | **0,82** | **0,79** | 12 | 104 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,57 | 1,27 |
| **Desv. estándar CaO en PH_IBA** | **0,82** | **0,78** | 12 | 105 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,77 | 1,29 |
| **Coef. Var. Resistencia tipo I** | **4,80** | **4,70** | 16 | 102 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,32 | 1,65 |
| **Coef. Var. Resistencia tipo IBA** | **4,80** | **4,55** | 15 | 105 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,82 | 1,62 |
| **Coef. Var. Resistencia tipo IP** | **4,80** | **5,60** | 15 | 86 | 7 | 10 | 80 | 20 | 7,86 | 1,18 |
| **Coef. Var. Resistencia tipo II** | **4,80** | **4,60** | 15 | 104 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,65 | 1,60 |
| | | | | | | | | | | **9,74** |
| **PRODUCCIÓN** | | | | | | | | | | |
| **Kcal/kg clinker tipo I** | **693** | **773** | 60 | 90 | 7 | 10 | 80 | 20 | 8,45 | 5,07 |
| **Trituración Primaria, KWh/TM** | **0,30** | **0,31** | 1 | 97 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,52 | 0,10 |
| **Trituración Secundaria, KWh/TM** | **2,10** | **2,01** | 3 | 104 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,67 | 0,32 |
| **Molienda Crudo, KWh/TM** | **17,80** | **18,53** | 7 | 96 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,41 | 0,66 |
| **Clinkerización, KWh/TM** | **35,50** | **31,40** | 11 | 113 | 10 | 13 | 100 | 20 | 11,96 | 1,32 |
| **Molienda Cemento, KWh/TM** | **35,00** | **37,37** | 12 | 94 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,05 | 1,09 |
| **Despacho Cemento, KWh/TM** | **0,95** | **1,05** | 2 | 90 | 7 | 10 | 80 | 20 | 8,57 | 0,17 |
| **Auxiliares, KWh/TM** | **5,00** | **4,78** | 4 | 105 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,69 | 0,43 |
| | | | | | | | | | | **9,14** |
| **MANTENIMIENTO** | | | | | | | | | | |
| **Mecánico: Paradas por 100,000 TM** | **55** | **49** | 50 | 112 | 10 | 13 | 100 | 20 | 11,84 | 5,92 |
| **Eléctrico: Paradas por 100,000 TM** | **81** | **78** | 50 | 104 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,58 | 5,29 |
| | | | 100 | | | | | | | **11,21** |
| **DESPACHO** | | | | | | | | | | |
| **Exceso cemento en bolsa, Kg** | **0,25** | **0,21** | 100 | 119 | 10 | 13 | 100 | 20 | 12,86 | 12,86 |
| | | | | | | | | | | **12,86** |
| **COSTO UNITARIO** | | | | | | | | | | |
| **US$/TM de cemento** | **27,00** | **31,10** | 100 | 87 | 7 | 10 | 80 | 20 | 8,02 | 8,02 |
| | | | | | | | | | | **8,02** |
| **SEGURIDAD** | | | | | | | | | | |
| **Índice accidentabilidad** | **1,0** | **20,5** | 100 | 5 | 0 | 1 | 0 | 20 | 0,24 | 0,24 |
| | | | | | | | | | | **0,24** |

**Fuente:** Adaptación de Vogel M. (2003) "Tablero de comando: Indicadores no Financieros", Abril, Lima, Perú

Los indicadores son medidos mensualmente. Para determinar el puntaje se utiliza la ecuación siguiente:

$$PB = LP + [(X\% - L\%)x(AP-LP)]/R \qquad (1)$$

LP= Punto anterior, en tabla de referencia
L%= Porcentaje anterior, en tabla de referencia
AP= Punto actual, en tabla en tabla de referencia
R= Rango de porcentaje, en tabla en tabla de referencia
X%= Porcentaje de variación
PB= Punto buscado

**Tabla 2**: Tabla de referencia

| De | Hasta | Puntos |
|---|---|---|
| 0 | 20% | **1** |
| 21 | 40% | **3** |
| 41 | 60% | **5** |
| 61 | 80% | **7** |
| 81 | 100% | **10** |
| 101 | 120% | **13** |
| 121 | 140% | **16** |

**Fuente:** Adaptación de Vogel M. (2003).

La tabla de referencia tiene como objetivo dar 10 puntos cuando se logra el 100% de la meta.
En la tabla se considera para cada 1% en el intervalo de 0 a 20% un peso de 0,05 (1/20), para el intervalo de 21 a 40% un peso de 0,10 (3-1, 2/20) y para valores mayores a 81% un peso de 0,15 (13-10, 3/20). Se incremento a 3 puntos como premio por lograr la meta.

Cálculo del puntaje del indicador de consumo específico de electricidad (de tabla 3):

| *INDICADOR* | *Meta* | *Logro* | *Peso Relativo* | *variación* | *Factores* | | | | *Puntos* | *Valor ponderado* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | LP | AP | L% | R | | |
| Clinkerización, KWh/TM | 35,50 | 31,40 | 5,0 | 113 | 10 | 13 | 100 | 20 | 0,60 | 1,32 |

En el mes de Enero 2005 para el indicador de consumo de electricidad en el proceso de clinkerización se midió 31,40 KWh/TM de clinker y la meta propuesta por la empresa es 35,50 KWh/TM. Al indicador se asignó un peso relativo de 5,0 (ver Tabla 3).

Cálculo de Variación o relación del logro respecto de la meta:

$$X\% = \frac{Meta}{Logro} = \frac{35{,}50}{31{,}40} x100 = 113\%$$

De la tabla 2, tomamos:

LP= 10

L%= 100

AP= 13

R= 20

Utilizando la ecuación (1) se obtiene el puntaje buscado (PB) 11,96. En la tabla 3 se muestra el resumen de los indicadores base del cálculo del Nivel de Excelencia Operativa y de Gestión de Ahorro de Energía. Para tener el puntaje ponderado se multiplica los puntos con los pesos relativos de cada indicador.

**Tabla 3: Resumen de indicadores del** Nivel de Excelencia Operativa y Ahorro Energético

| *INDICADOR* | *Meta* | *Logro* | *Peso Relativo* | *variación* | *Factores* | | | | *Puntos* | *Valor ponderado* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | LP | AP | L% | R | | |
| **Kcal/kg clinker tipo I** | 693 | **773** | 15,0 | 90 | 7 | 10 | 80 | 20 | 8,45 | 1,27 |
| **Trituración Primaria, KWh/TM** | 0,30 | **0,31** | 0,5 | 97 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,52 | 0,05 |
| **Trituración Secundaria, KWh/TM** | 2,10 | **2,01** | 1,0 | 104 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,67 | 0,11 |
| **Molienda Crudo, KWh/TM** | 17,80 | **18,53** | 2,5 | 96 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,41 | 0,24 |
| **Clinkerización, KWh/TM** | 35,50 | **31,40** | 5,0 | 113 | 10 | 13 | 100 | 20 | 11,96 | 0,60 |
| **Molienda Cemento, KWh/TM** | 35,00 | **37,37** | 7,0 | 94 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,05 | 0,63 |
| **Despacho Cemento, KWh/TM** | 0,95 | **1,05** | 3 | 90 | 7 | 10 | 80 | 20 | 8,57 | 0,26 |
| **Auxiliares, KWh/TM** | 5,00 | **4,78** | 4 | 105 | 10 | 13 | 100 | 20 | 10,69 | 0,43 |
| **Despacho, exceso peso bolsa, Kg** | 0,25 | **0,21** | 1 | 119 | 10 | 13 | 100 | 20 | 12,86 | 0,13 |
| **Calidad** | 10,00 | **9,74** | 8 | 97 | 7 | 10 | 80 | 20 | 9,62 | 0,77 |
| **Mantenimiento** | 10,00 | **11,21** | 9 | 112 | 10 | 13 | 100 | 20 | 11,81 | 1,06 |
| **Seguridad** | 1,00 | **20,50** | 4 | 5 | 0 | 1 | 0 | 20 | 0,24 | 0,01 |
| **Costo unitario, US$/TM cemento** | 27,00 | **31,10** | 40 | 87 | 7 | 10 | 80 | 20 | 8,02 | 3,21 |
| **NIVEL DE EXCELENCIA OPERATIVA Y GESTIÓN DE AHORRO ENERGÍA:** | | | | | | | | | | **8,75** |

**Fuente:** Adaptación de Vogel M. (2003) "Tablero de comando: Indicadores no Financieros", Abril, Lima, Perú

Los colores indican: Rojo cuando es menor de 7,9 puntos, amarillo si está entre 7,901 y 9,2, verde cuando está entre 9,201 a 10,5 y azul cuando es mayor de 10,5 puntos.

## ANEXO XXII: VISTAS DE PLANTAS DE CEMENTO



**Foto 1:** Vista de planta de cemento en Atocongo, Lima



**Foto 2:** Vista de precalentadores de hornos 1 y 2 de la planta de Atocongo.

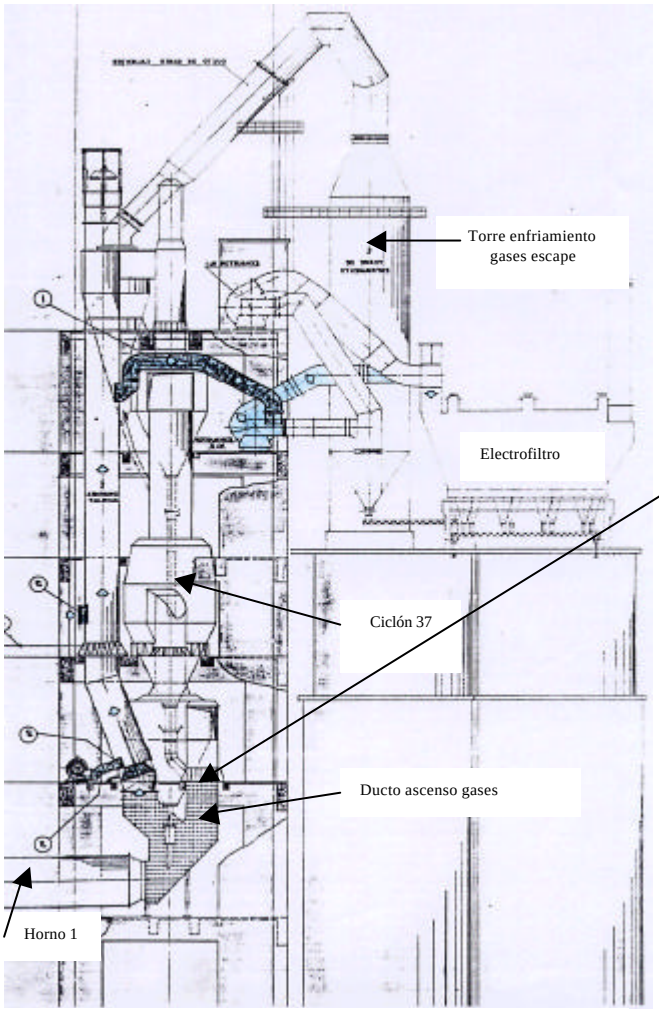


**Foto 3:** Planta de cemento en Condorcocha, Tarma



**Foto 4:** Planta de cemento en Pacasmayo

## ANEXO XXIII: Formación de costras en ductos del Precalentador del Horno 1




**Precalentador del horno 1**: muestra horno, ducto ascenso gases, chimenea, ciclón 37, exhaustotes, electrofiltro y torre enfriamiento gases



**Foto 10:** Costras en ducto de ascenso de gases precalentador horno 1



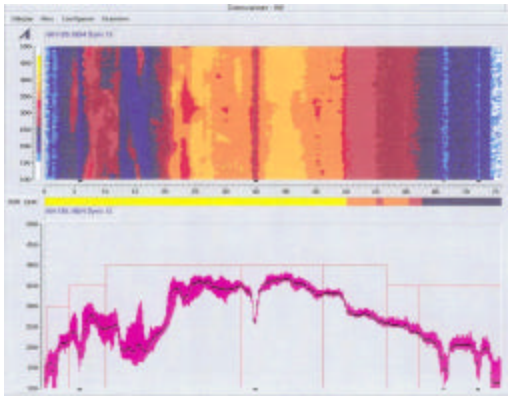
**Foto 11:** Eliminación manual de costras en ducto de ascenso de gases precalentador horno 1

**Figura 1:** Formación de costras en ductos del Precalentador del Horno 1
Fuente: Elaboración propia en empresa base del estudio.

## ANEXO XXIV: VISTAS DEL INTERIOR Y EXTERIOR DEL HORNO ROTATORIO



**Foto 12:** Horno rotatorio de 85 m, Ø 5,20 m. Donde se efectuó prueba de refractario Almag 85C



Perfil de temperatura de superficie exterior del horno, dado por scanner de termografía

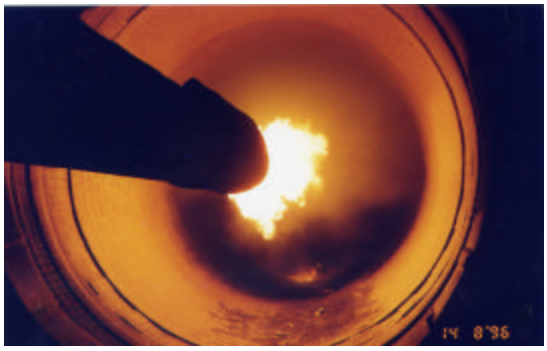


**Foto 13:** Interior del horno al inicio de su calentamiento de 48 horas.

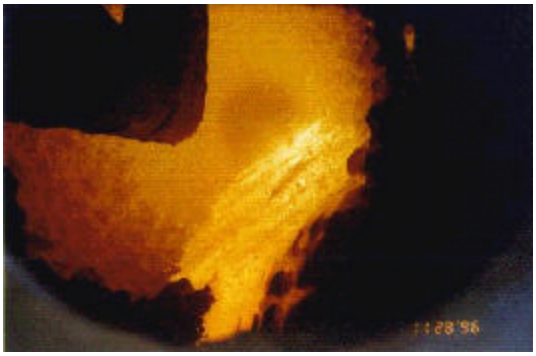


**Foto 14:** Interior del horno inmediatamente después de interrumpida la combustión.

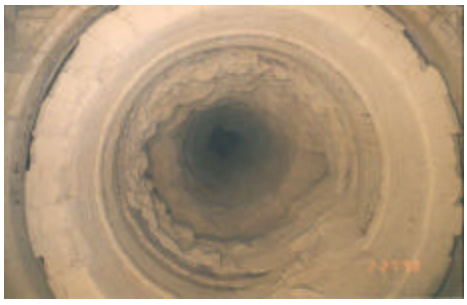


**Foto 15:** Interior del horno después de enfriamiento de 48 horas. Muestra costras y anillos.

## ANEXO XXV: VISTAS DE FALLA EN SELLO DE ENTRADA Y SALIDA DEL HORNO ROTATORIO



**Foto 20:** Sello entrada del horno 1

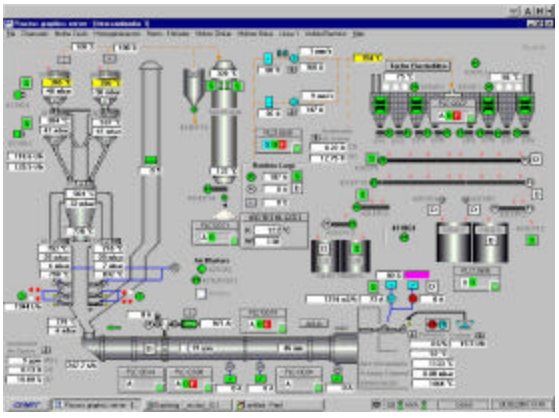


Diagrama flujo del horno 1, pantalla para operación centralizada del horno.

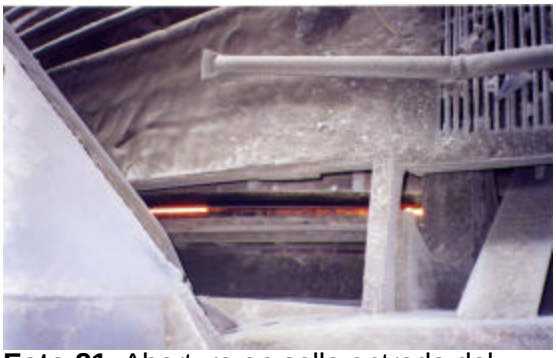


**Foto 21**: Abertura en sello entrada del horno 1. Entrada de aire falso.

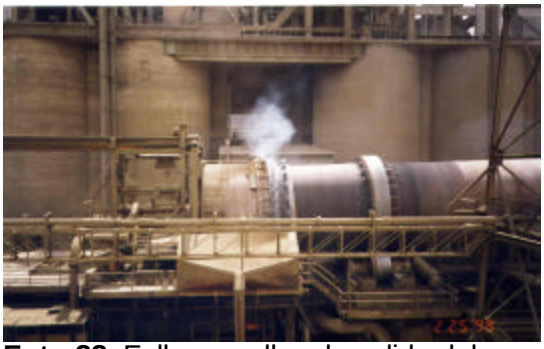


**Foto 22:** Falla en sello a la salida del horno



**Foto 23:** Horno con falla en Sello de Salida, entrada de aire falso.