



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA, 1948

Facultad de Ingeniería Mecánica

Departamento de Energía

Trabajo de Diploma

Estudio de la Eficiencia Energética en el área de molienda de la  
fábrica de cemento Siguaney

Autor: José A. Alvarez Cabrera.

Tutores: Dr. Tirso Reyes Carvajal

Ing. Saúl Rodríguez Pérez

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



### Resumen

En el siguiente trabajo se realizó una evaluación de la eficiencia energética en el área de molienda de la fábrica de cemento Siguaney donde se muestra un estudio general del proceso de molienda. También se hace un recuento sobre la producción de cemento en Cuba así como la determinación de los principales potenciales de ahorro dentro del área de molienda y los métodos y tecnologías para lograr una mejor eficiencia en el proceso productivo teniendo en cuenta los avances que se lograron en nuestro país a partir de la Revolución Energética en el 2006. Se cuantifican las principales pérdidas por sobredimensionamiento y generación de calor durante el proceso de molienda.

### Abstract

In the following work one carries out an evaluation of the energy efficiency in the area of mill of the cement factory where a general study of the mill process is shown. A recount is also made on the cement production in Cuba as well as the determination of the main saving potentials inside the mill area and the methods and technologies to achieve a better efficiency in the productive process keeping in mind the advances that were achieved in our country starting from the Energy Revolution in Cuba in 2006. The main losses are quantified by moresize and generation of heat during the mill process.

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	3
<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo I. Estado del arte</b> .....	6
1.1 Introducción .....	6
1.2 La eficiencia energética como alternativa para el ahorro de energía. ....	6
1.3 Desarrollos energéticos del cemento mundial .....	7
1.3.1 <i>La energía en la industria cementera cubana</i> .....	11
1.4 Comportamiento de los molinos durante la explotación como altos consumidores de energía eléctrica .....	14
1.5 Conclusiones parciales .....	14
<b>Capítulo II Estudio del proceso de molienda y determinación del régimen de trabajo de los molinos</b> .....	16
2.1 Introducción .....	16
2.2 Caracterización del área de molinos .....	16
2.3 Molinos de Bolas .....	19
2.4 Descripción de proceso de producción de molinos de pasta .....	20
2.4.1 <i>Régimen de trabajo actual de los molinos de pasta</i> .....	24
2.5 Descripción de proceso de producción de molienda de cemento .....	28
2.5.1 <i>Régimen de trabajo actual de los molinos de cemento</i> .....	30
2.6 Distribución de los consumos en el área de molienda de cemento .....	33
2.7 Conclusiones parciales .....	35
<b>Capítulo III: Alternativas de Ahorro en el Área de Molinos y determinación de los potenciales de ahorro</b> .....	36
3.1 Introducción. ....	36
3.2 Posibles formas de recuperación de calor a la salida de los molinos .....	36
3.3 Determinación de los potenciales de ahorro .....	40
3.4 Operaciones por contienda .....	42
3.5 Molino vertical de cemento de serie LM .....	43
3.6 Conclusiones parciales .....	44
<b>Conclusiones</b> .....	45
<b>Recomendaciones</b> .....	46
<b>Bibliografía</b> .....	47
<b>Anexo 1- Esquema de la fabricación de cemento por vía húmeda</b>	
<b>Anexo 2- Movimiento de los cuerpos moledores en el molino de tubo</b>	
<b>Anexo 3- Valores de c en relación al grado de llenado y al diámetro de las bolas</b>	
<b>Anexo 4- Coeficiente de morturabilidad a</b>	
<b>Anexo 5- factor de corrección para molienda fina b</b>	
<b>Anexo 6- Coeficiente de morturabilidad según el %de Silicato bicálquico en clinker</b>	
<b>Anexo 7- factor de corrección por el tipo de molino c</b>	
<b>Anexo 9- Fotografía espacial de la Fábrica de Cemento “Siguaney” y explicación de las áreas.</b>	

## ***Introducción***

A partir del desarrollo industrial que experimentó durante el siglo XX, Cuba ha enfrentado el problema de la dependencia externa en lo que se refiere a la satisfacción de sus necesidades en materia de energía. Las causas de este problema están dadas por la pobre reserva de recursos energéticos fósiles con que cuenta el país y por sus propias condiciones y dimensiones geográficas, expresadas por sus particularidades insulares que no brindan ventajas tales como la explotación de grandes recursos hidrográficos, el aprovechamiento de sistemas con diferentes husos horarios y demás facilidades con que cuentan otras naciones o asociaciones regionales de naciones. En términos más concretos, Cuba presenta una alta dependencia de la importación de portadores energéticos fósiles, fundamentalmente el petróleo, para todos sus planes de desarrollo.

Históricamente el desarrollo energético en Cuba puede caracterizarse en tres etapas, cada una de las cuales se enfrentó a la deficiencia energética antes mencionada en un contexto de limitaciones y oportunidades específicas.

Hasta 1959, período durante el cual el cuadro energético, compuesto básicamente por una capacidad instalada de generación de electricidad ascendente a los 397 MW, garantizaba el abastecimiento sólo al 56% de la población. La capacidad de refinación de petróleo entonces ascendía a 4 millones de toneladas por año, se empleaba en muy baja escala los escasos recursos hidroenergéticos y se disponía de una pequeña capacidad de cogeneración de electricidad en los centrales azucareros y en las industrias del papel cuyo alcance estaba restringido a determinadas comunidades y durante ciertas temporadas en el año. El consumo de combustible equivalente estaba al nivel anual de 533 kg/habitante.

Desde 1959 hasta 1989, período durante el cual tuvo lugar un desarrollo creciente basado en suministros estables de combustibles y tecnologías provenientes de los países de Europa del Este y de la extinta URSS. En este período la capacidad de generación instalada creció hasta 3178 MW en centrales termoeléctricas fundamentalmente, sobre la base de petróleo importado, y se aseguró el suministro de energía eléctrica al 95% de la población, que había ascendido en 1.7 veces con relación a 1958, mediante la creación del Sistema Electro energético Nacional (SEN). En esta etapa la capacidad de refinación se incrementó en casi tres veces respecto a 1958, se puso en marcha un plan para la utilización de la hidroenergía y se incrementó significativamente el uso de la cogeneración en

la industria azucarera. El consumo de combustible equivalente en 1989 llegó a alcanzar la cifra de 1.5 toneladas por habitante, lo cual casi triplicaba la cifra del período anterior.

Desde 1989 a la fecha, el país atraviesa por una etapa crítica en la que su desarrollo, basado en una estructura económico - productiva excesivamente dependiente de las importaciones de petróleo, con tecnologías y esquemas de especialización caracterizados por indicadores de eficiencia relativamente inferiores a sus similares internacionales y con una elevada intensidad energética, se ve sometido a la súbita pérdida de los suministros de petróleo que venía recibiendo establemente y a precios preferenciales (aproximadamente de 13 millones de toneladas, en 1989, a unas 6 millones de toneladas, en 1993). A este cuadro debe añadirse el recrudecimiento del embargo económico que el país ha venido enfrentando durante casi cuatro décadas. Esta situación provocó un intenso déficit de energía que impactó fuertemente en todas las estructuras productivas, de servicios y poblacionales del país.

Una situación tan crítica como ésta, tuvo una repercusión inmediata sobre toda la población del país, tanto de manera directa como indirecta. En cuanto a la disponibilidad de servicios energéticos, los momentos de mayor impacto negativo fueron alcanzados durante 1993-1994, época en que los cortes del servicio eléctrico por momentos alcanzaron el 50% diario. De igual manera, la falta de disponibilidad de energía, entre otros aspectos, deprimió la capacidad productiva del país en prácticamente todos los sectores económicos. Es oficialmente reconocido que entre 1989 y 1993 el PIB decreció en un 35%.

El Ministerio de Economía y Planificación (MEP) funge como organismo rector de la política energética del país y como tal es responsable de la elaboración de los programas y estrategias nacionales. Como organismo asesor principal se encuentra constituido el Consejo Asesor para Asuntos Energéticos, presidido por el MEP e integrado por representantes de los organismos nacionales vinculados a este sector, entre los cuales se encuentran el Ministerio de la Industria Básica, el Ministerio de la Industria Sidero -Mecánica, el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, el Ministerio del Azúcar, el Ministerio de la Construcción, el Ministerio de la Inversión Extranjera y la Colaboración Económica y otros organismos más.

Las Naciones Unidas a través de su Programa para el Desarrollo, PNUD, acordaron apoyar el Programa Energético de Cuba, para lo cual seleccionó el área referente a la Energía Solar y la correspondiente a la Eficiencia Energética, esta última con énfasis en el Control y la Inspección Estatal Energética.

Uno de los sectores que requieren ser controlados son las grandes empresas, las cuales son los principales consumidores de energía en el país. En nuestra provincia la Empresa de Cemento Siguaney es la mayor consumidora de energía eléctrica, en la actualidad, consume el 10% de la electricidad de la provincia que representa 23 GWh/anales de consumo aproximadamente. Teniendo en cuenta esto, se ha hecho un estudio de los principales lugares de la industria en donde se consume energía, principalmente en el área de molienda donde presenta un alto consumo de energía eléctrica debido a gigantescos motores que hacen girar a los molinos.

### **Problema científico**

Independiente de la antigüedad de tecnología existen en el área de molienda de la fábrica no se tiene conocimiento de las causas de los altos consumos de energía eléctrica ni alternativas para minimizar estos.

### **Hipótesis**

Es posible a través de la realización de un diagnóstico energético conocer las posibles causas del incremento de los consumos en el área de molienda de la fábrica y realizar propuestas de alternativas de explotación más eficiente.

### **Objetivo general**

Realizar un diagnóstico energético que permita cuantificar las causas fundamentales de los altos consumos de energía, proponiendo posibles soluciones y alternativas con vistas a disminuir estos.

### **Objetivos específicos.**

1. Realizar el análisis de los principales consumidores de energía que están vinculados directamente al área de molienda.
2. Determinar los potenciales de ahorro en el área de molienda de la fábrica de cemento de Siguaney
3. Proponer soluciones y alternativas que contribuyan al aumento de la eficiencia en el área de molienda.

**Tareas del trabajo:**

Para alcanzar los objetivos anteriormente planteados, se realizaron las siguientes tareas:

1. Conformar una biblioteca personal mediante del gestor bibliográfico EndNote, realizar una revisión bibliográfica que permita conocer el desarrollo de la industria cementera a nivel internacional y nacional.
2. Hacer un estudio sobre el desarrollo de la Industria Cementera Internacional y plantear las características actuales de la Industria de Cemento Nacional y en especial las de la Fábrica de Cemento “Siguaney”
3. Recopilar y organizar datos que se encuentran archivados con respecto a los portadores energéticos de los molinos.
4. Elaborar los parámetros de trabajo actuales con los que opera la industria caso de estudio.
5. Determinar los principales factores que intervienen en el alto consumo de energía y los principales potenciales de ahorro.
6. Investigar sobre otras tecnologías de mayor avance tecnológico que puedan ser adaptadas a esta área de la fábrica de cemento “Siguaney”.
7. Elaborar recomendaciones que, según el grado encontrado de factibilidades de aplicación de las alternativas, puedan llevar a su total aplicación.

**Los aportes de este trabajo de diploma son:**

Un estudio detallado sobre las condiciones de los molinos de pasta y de cemento de la Fábrica de Cemento “Siguaney”

Determinación de los parámetros y condiciones de trabajo actuales de los molinos de la Fábrica de Cemento “Siguaney”

Aun seria de sobre posibles cambios de tecnologías respecto al avance y desarrollo tecnológicos nivel mundial y que puedan ser adaptadas a esta área de la fábrica de cemento “Siguaney”.

**Repercusiones esperadas**

**En lo Científico y Tecnológico:** este trabajo contribuye al aumento de los conocimientos de la

Industria cementera, y de la Fábrica de Cemento “Siguaney” en especial, y de las herramientas de control energético, que si bien son técnicas conocidas por todos, no son muy aplicables en las industrias para ver el rendimiento de estas.

**En lo Económico:** como resultado este trabajo plasmó los sobredimensionamientos de algunos equipos lo cual su rendimiento era subutilizado y esto es un consumo un necesario de energía eléctrica lo cual representa un gasto monetario, esta medida si se lograra tener en cuenta y hacer un cambio de tecnología se produciría una disminución de los costos de energía eléctrica.

**En los Social:** el conocimiento de las perdidas energéticas y las posibles alternativas de recuperación de estas pérdidas crea en las personas, tanto en los trabajadores del sector del cemento o de otras industria, en alimentar la conciencia de ahorro y estimularse para los posibles cambios tecnológicos que pueda sufrir la industria una vez que se tome como medida recuperar las pérdidas que se generan.

## ***Capítulo I. Estado del arte***

### ***1.1 Introducción***

El inicio del tercer milenio representa para la humanidad la encrucijada de una nueva elección energética, frente al agotamiento de los combustibles fósiles por una parte, pero sobre todo, por la amenaza de una catástrofe ecológica, al rebasarse los límites de la capacidad del planeta para asimilar sus negativos impactos. Según científicos de todo el mundo nos encontramos sobre la línea de “no retorno”, estamos llegando a límites nunca antes alcanzados, respecto a consumos de combustibles, emisiones de gases nocivos, y efectos de todos esto sobre el medio ambiente.

El agotamiento de los combustibles fósiles y el daño irreversible que se ocasiona al medio ambiente es previsible, exige del amparo de nuevas estrategias en materia de energía, como base de un modelo de desarrollo sostenible, que permita satisfacer las necesidades energéticas de la generación actual y preservar las posibilidades para que las futuras generaciones puedan también encontrar soluciones para satisfacer las suyas. Se hace necesario encontrar un modelo que posibilite mejorar la calidad de la vida con más y mejores servicios energéticos, que distribuya más equitativamente los beneficios del progreso económico, pero de una forma racional que permita respetar y cuidar las comunidades de seres vivos, no sobrepasar los límites de la capacidad del planeta para suplir fuentes de energía y asimilar los residuos de su producción y uso; un modelo que posibilite, en definitiva, integrar el desarrollo y la conservación del medio ambiente.

### ***1.2 La eficiencia energética como alternativa para el ahorro de energía.***

La tendencia de la energía es encarecerse cada vez más, aunque los precios fluctúen debido a otros motivos, pero una vez que los combustibles que aportan esta energía comiencen a escasear el precio de esta comenzara a subir, por ello en muchos casos uno de las principales partidas del costo total es el costo energético, donde se incluyen los componentes relativos a la producción, distribución y uso de las diferentes formas de energía y el agua.

La eficiencia energética está entendida como eficiencia en la producción, distribución y uso de la energía, necesaria para garantizar una calidad total, es parte del conjunto de problemas que afectan la competitividad de las empresas o instituciones (Nordelo & Yanes, 2006a)

La Eficiencia Energética implica lograr un nivel de producción o servicios, con los requisitos establecidos por el cliente, con el menor consumo y gasto energético posible, y la menor contaminación ambiental por este concepto, pocas palabras “hacer más con menos”. (Nordelo & Yanes, 2006a)

El incremento de la eficiencia energética se logra mediante las acciones tomadas por productores o consumidores que reducen el uso de energía por unidad de producto o servicio, sin afectar la calidad del mismo.

El país ha cursado por varias etapas de transición energética desde incluso antes del triunfo de la Revolución, pero fue después de esta donde los cambios han sido sustanciales, ya que la Revolución entre uno de sus acápites está el ofertarle un mejor estilo de vida a cada cubano, y esto conllevó a que cada persona tiene derecho a la energía eléctrica, pero no fue hasta el período 80 - 89 donde existió un adecuado balance oferta - demanda de portadores energéticos,

Lo más importante para lograr la eficiencia energética en una empresa, no es sólo que exista un plan de ahorro de energía, sino contar con un sistema de gestión energética que garantice que ese plan sea renovado cada vez que sea necesario, que involucre a todos, que eleve cada vez más la capacidad de los trabajadores y directivos para generar y alcanzar nuevas metas en este campo, que desarrolle nuevos hábitos de producción y consumo en función de la eficiencia, que consolide los hábitos de control y autocontrol, y en general, que integre las acciones al proceso productivo o de servicios que se realiza.

### ***1.3 Desarrollos energéticos del cemento mundial***

Al igual que otras actividades fabriles originadas de la primera revolución industrial, la producción de cemento tuvo a Inglaterra como cuna. En 1826 se puso en marcha la primera fábrica del material y, durante varios lustros, los productores británicos mantuvieron un control absoluto del mercado.

El cemento fue inventado en 1811 y patentizado en octubre de 1824 en Inglaterra. El término cemento Portland se empleó por primera vez en 1824 por el fabricante inglés de cemento Joseph Aspdin, debido a su parecido con la piedra de Portland, que era muy utilizada para la construcción en Inglaterra. El primer cemento Portland moderno, hecho de piedra caliza y arcilla o pizarras, calentadas hasta convertirse en carbonilla (o escorias) y después triturada, fue producido en Gran Bretaña en 1845. En aquella época el cemento se fabricaba en hornos verticales, esparciendo las materias primas sobre capas de coque a la que se prendía fuego. Los primeros hornos rotatorios surgieron hacia 1880. (Autores, 1998)

El cemento es una mezcla de piedra caliza y arcilla, triturada y calcinada hasta el punto fundente, convertida en una escoria granulada llamada clinker que se muele con una pequeña proporción de yeso (sulfato de calcio) hasta quedar finamente pulverizada. (Autores, 1998)

Es el aglutinante básico del hormigón y de muchos otros productos que se utilizan en la construcción, tales como: mosaicos, baldosas, bloques, asbestos cemento, tubos para acueducto y alcantarillado, etc.

El producto tiene diversas aplicaciones para formar hormigón, pegar superficies de distintos materiales o para revestimiento de superficie a fin de protegerlas de la acción de sustancias químicas y de la intemperie. Además de su importancia clave en la industria de la construcción, el cemento es un insumo básico en otras muchas manufacturas, como tubos, láminas y tanques de asbesto-cemento, postes, pilotes, muebles de baño e incluso casas precoladas.

Gracias a la tecnología moderna las plantas cementeras pueden ser tan limpias como laboratorios. En apariencia los problemas de la industria en materia ambiental son cosa del pasado y, en los casos en que todavía subsisten, la solución se considera como una simple cuestión de tiempo.

En general el ahorro de energía en la industria del cemento debe comprender la modernización de la planta, en la gran mayoría de las fábricas de cemento del mundo se lucha por una producción con la mejor eficiencia energética posible, tanto para el consumo de energía térmica que para la eléctrica. En muchos casos se cambian los procesos de producción de clínquer de vía húmeda a vía seca, aumentando así la capacidad de producción de la fábrica y reduciendo el

consumo térmico. También para mejorar la eficiencia térmica del horno se instalan intercambiadores de calor y se acorta el horno, así como el uso de aditivos en el cemento y elevando la eficiencia en la molienda. (Anónimo, 2009)

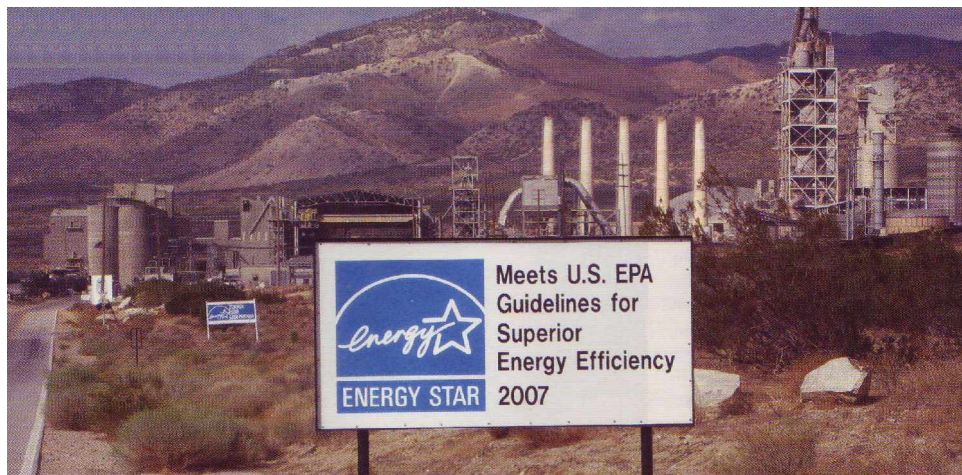
También se ha trabajado en el desarrollo de los sistemas para el incremento del uso de combustibles alternativos para disminuir el consumo de combustibles tradicionales. Los combustibles alternativos mayormente usados en la producción de cemento son los subproductos provenientes de otras actividades como aceites usados, disolventes, neumáticos usados, etc. Toda esta gestión se realiza teniendo en cuenta un estricto control de aceptación de estos combustibles de manera que no se vea afectada ni la calidad del cemento ni se incrementen los niveles de emisión a la atmósfera. En estos momentos se está poniendo a prueba un nuevo combustible llamado Enerfuel el cual es un combustible derivado de los residuos sólidos urbanos. Estos desechos domésticos, que no pueden ser reutilizados y que en la actualidad van directamente a los vertederos provocando, además de peligrosas emisiones y contaminación, problemas de limpieza, olores y saturación, son los que forma parte del nuevo combustible Enerfuel.(Anónimo, 2010)

Algunas de estas iniciativas han sido clasificadas por Naciones Unidas como “Mecanismos de Desarrollo Limpio”(Anónimo, 2010; Lafarge, 2010)

- Por ejemplo, la cementera de Arasmeta (India) utiliza la ceniza volante de las centrales eléctricas para la fabricación del cemento.
- Malasia, el 5% de la energía térmica necesaria para las plantas de cemento de Lafarge de Rawang y Kanthan se produce a partir de biomasa.
- Marruecos, un parque eólico proporciona el 50% de la electricidad requerida por la cementera de Tetuán.

La industria cementera tiende a que cada día su producción sea cada vez más rentable económica y ambientalmente, grandes compañías toman de la mano la posibilidad que brinda el desarrollo industrial e implementan este desarrollo a la producción de cemento. Industrias como California Portland Cement Company (CPC) han revolucionado esta idea, en Mojave, California, una fábrica perteneciente a esta compañía implemento esta idea al extremo que

logró independizar esta industria de la red eléctrica nacional con la implementación de energías renovables y uso de las pérdidas energéticas de la industria, como son las pérdidas de calor recuperándolas e implementando las tecnologías de cogeneración, pero además usa también combustibles alternativos, posibilitando un uso mínimo de combustibles básicos para la producción de cemento.

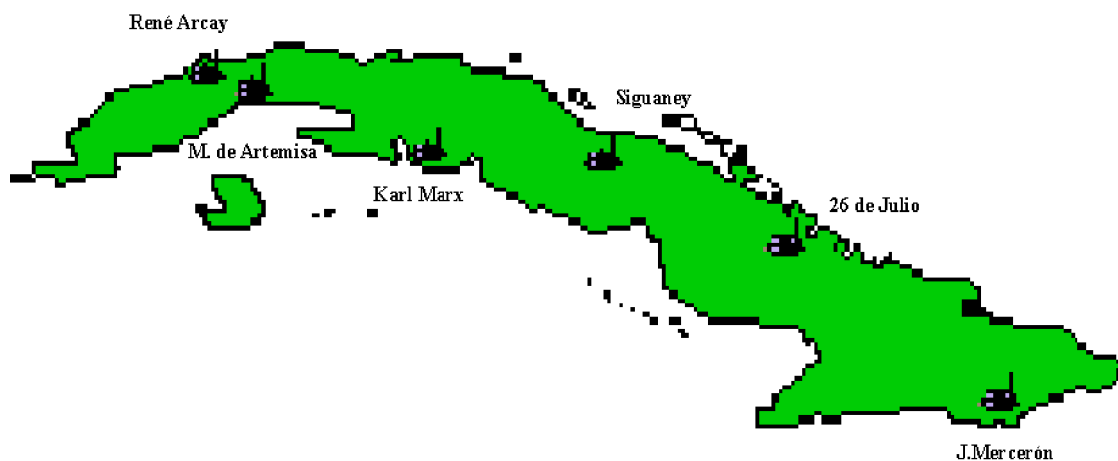




*Fig. 1.4 – Imágenes de la industria de cemento de Mojave, California perteneciente a la California Portland Cement Company (CPC). Fuente:(Coppinger, 2008)*

### **1.3.1 La energía en la industria cementera cubana.**

En nuestro país hasta el año 2010 se cuenta con la existencia de 6 fábricas de Cemento, entre estas, cuatro producen cemento mediante un proceso de vía húmeda, la “José Merceron” de Santiago de Cuba, “Mártires de Artemisa” de La Habana, “26 de Julio” de Nuevitás, Camagüey y “Siguaneý” de Sancti Spíritus, las otras dos son de proceso seco, “Mariel” en La Habana y “Cienfuegos” en dicha ciudad. A continuación se muestra la ubicación geográfica de las fábricas en nuestro país (Autores, 1998)



*Fig. 1.6 - Ubicación geográfica de las fábricas de cemento cubanas. Fuente: (Autores, 1998)*

La industria del cemento Portland en Cuba, como consecuencia del proceso revolucionario y el desarrollo industrial que el mismo conlleva, ha experimentado, en su capacidad productiva, una expansión considerable en los últimos años.

Ha sido de atención fundamental lograr los mayores rendimientos, elevar la productividad del trabajo (con la consiguiente disminución de los costos de producción), elevar el estado técnico de los equipos de esta industria, mejorando las condiciones y calidad del mantenimiento de los mismos, para obtener de ellos el máximo de eficiencia.

En la actualidad, la industria del cemento nacional, en aquellas fábricas 100% cubanas, enfrentan grandes dificultades como son los altos consumos energéticos que representa más del 65 % de los costos de producción. La fábrica de cemento Siguaney cuenta con una tecnología de producción muy antigua y deteriorada en comparación con la maquinaria que se utiliza actualmente en la producción de cemento a nivel mundial. Estas condiciones con que cuenta la empresa actualmente llevan consigo a que la utilización de la energía no sea la más apropiada, ya que los consumos durante la producción son mayores que los predeterminados. (Autores, 1998)

Como un resultado del desarrollo de la tecnología de producción del cemento en la dirección de economizar combustible en hornos de gran tamaño, han surgido varios factores que afectan la marcha continuada del horno, fundamentalmente los revestimientos refractarios.

A raíz de todo esto el Ministerio Nacional que controla este rama industrial, el Grupo nacional de Cemento y las fábricas propiamente dichas se ha propuesto llevar a cabo medidas energéticas, ya que la producción de cemento necesariamente consume tanto energía eléctrica como térmica, medidas que parten desde crear conciencia de ahorro de energía en cada uno de los trabajadores, hasta actualización de la técnica, equipamientos e infraestructura de toda una fábrica.

Considerando lo anterior se justifica desde el punto de vista económico, el estudio que se realiza en el presente trabajo con relación a la recuperación del calor en las paredes de los hornos de cemento, donde se hace necesario caracterizar ante todo, el proceso de producción de

clinker. También es importante evaluar, según se reporta en la literatura, los problemas por los que no sería posible la recuperación del calor, así como los resultados alcanzados hasta el presente tratándose del problema antes planteado.

Dentro de la estrategia general en materia de energía se considera como su principal fuente la aplicación de medidas que optimicen la eficacia en el uso de los recursos energéticos y un riguroso control basado en las regulaciones económicas que aseguren un constante avance en este empeño.

Para la elaboración de este proyecto basado en las posibilidades energéticas de la Industria del Cemento de “Siguaneý” se contó con el auxilio que cuenta la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía (GTEE), la cual no es más que un paquete de procedimientos, herramientas técnico-organizativas y un software especializado, que aplicado de forma continua y con la filosofía de la gestión de la calidad, permite establecer nuevos hábitos de dirección, control, diagnóstico y uso de la energía, dirigidos al aprovechamiento de todas las oportunidades de ahorro, conservación y reducción de los costos energéticos en una empresa.

Su objetivo no es sólo diagnosticar y dejar un plan de medidas, sino esencialmente elevar las capacidades técnico-organizativas de la empresa, de forma tal que esta sea capaz de desarrollar un proceso de mejora continua de la eficiencia energética.

La GTEE incorpora un conjunto de procedimientos y herramientas innovadoras en el campo de la gestión energética. Es particularmente novedoso el sistema de control energético, que incorpora todos los elementos necesarios para que exista verdaderamente control de la eficiencia energética.

Estudios de este tipo usando la GTEE en industrias del cemento como “Cementos Cienfuegos” dieron un potencial de ahorro de casi 3 cuartos de millón de dólares. De la misma forma ha tenido una amplia generalización en otras empresas del país, demostrando su efectividad para crear en las empresas capacidades permanentes para la administración eficiente de la energía, alcanzando significativos impactos económicos, sociales y ambientales y contribuyendo a la creación de una cultura energética ambiental (Nordelo & Yanes, 2006a, 2006b)

#### ***1.4 Comportamiento de los molinos durante la explotación como altos consumidores de energía eléctrica***

La energía eléctrica se consume en su mayor parte en las operaciones de molienda, tanto de materias primas como de cemento, que representan aproximadamente el 75 % de la energía eléctrica total consumida. La impulsión de gases, la manipulación y transporte de materiales suman prácticamente el 25 % restante. Los costes energéticos combustibles y electricidad suponen en torno al 30 % de los costos de fabricación, repartidos a medias entre los dos componentes térmico y eléctrico.

Además de la vía de fabricación empleada, el consumo energético en la fabricación de clinker está relacionado con la humedad de las materias primas y con la dificultad en completar las reacciones químicas para la formación del clinker. Esta dificultad depende de la cristalografía /mineralogía de los compuestos que lo conforman y de la presencia de minerales fundentes (hierro, aluminio). Esta dificultad tiene lugar, por ejemplo, en la fabricación de clinker blanco, en la que las materias primas son muy pobres en fundentes (para que no oscurezcan el clinker) y requieren temperaturas más altas de clinkerización (en torno a 150 °C más), lo que implica necesariamente un mayor consumo energético que puede estar entre los 5.500 y 6.500MJ/t de clinker. El consumo de electricidad varía entre 90 y 130 kWh/t de cemento, cifra que depende de los tres factores siguientes:

- La facilidad de molturación de los materiales, relacionado básicamente con su estructura mineralógica. En el caso del cemento blanco por tratarse de estructuras normalmente de mayor dureza, podría llevar a valores por encima del rango mencionado
- La eficiencia energética de los equipos de molienda
- La finura del material molido, especialmente en la fabricación de cementos de diferentes categorías resistentes

#### ***1.5 Conclusiones parciales***

En la producción de cemento existe un sobre consumo de energía siendo esta de vital importancia para el desarrollo de la sociedad. A su vez el ahorro de la misma en la industria del cemento debe comprender la modernización de la planta, en la gran mayoría de las fábricas de cemento del mundo se lucha por una producción con la mejor eficiencia energética posible, tanto para el consumo de energía térmica que para la eléctrica. En muchos casos se cambian los

procesos de producción de clinker de vía húmeda a vía seca, aumentando así la capacidad de producción de la fábrica pero a su vez aumentan los consumos de electricidad.

## ***Capítulo II Estudio del proceso de molienda y determinación del régimen de trabajo de los molinos***

### ***2.1 Introducción***

Aunque de forma general toda producción de cemento consume grandes cantidades de energía eléctrica y térmica, en el caso de la primera, su consumo es fundamentalmente en el accionamiento de motores eléctricos de baja y media tensión para molinos de bolas, de martillos, de quijada, Roller Press, en compresores, bombas, ventiladores, transportadores de banda y de tablillas, elevadores, etc. y un mínimo en el alumbrado y en actividades administrativas que representan menos del 5 %. El indicador de consumo por tonelada de cemento es de alrededor de 100 kWh para el proceso húmedo y un poco más, alrededor de 120 kWh para el seco como promedio aproximado, teniendo en cuenta de que estos números es para cuando la industria se encuentra trabajando al 100% de su capacidad (Autores, 1982, 1998; Canales & Autores, 2004; Duda, 1977). La Empresa de Cemento Siguaney, en la actualidad, consume de 10 al 18% de la electricidad de la provincia que representa 23 Gwh/anuales de consumo aproximadamente. Esto la hace la industria de mayor consumo de energía eléctrica de la provincia. (Provincial, 2005 - 2008)

### ***2.2 Caracterización del área de molinos***

La energía eléctrica se consume en su mayor parte en las operaciones de molienda, tanto de materias primas como de cemento, que representan aproximadamente el 75 % de la energía eléctrica total consumida. La impulsión de gases y la manipulación y transporte de materiales suman prácticamente el 25 % restante.

Además de la vía de fabricación empleada, el consumo energético en la fabricación de clinker está relacionado con la humedad de las materias primas y con la dificultad en completar las reacciones químicas para la formación del clinker. Esta dificultad depende de la cristalografía y mineralogía de los compuestos que lo conforman y de la presencia de minerales fundentes (hierro, aluminio). Esta dificultad tiene lugar, por ejemplo, en la fabricación de clinker blanco, en la que las materias primas son muy pobres en fundentes (para que no oscurezcan el clinker)

y requieren temperaturas más altas de clínkerización (en torno a 150 °C más), lo que implica necesariamente un mayor consumo energético que puede estar entre los 5.500 y 6.500 MJ/t de clinker. El consumo de electricidad varía entre 90 y 130 kWh/t de cemento, cifra que depende de los tres factores siguientes:

- La facilidad de molturación de los materiales, relacionado básicamente con su estructura mineralógica. En el caso del cemento blanco por tratarse de estructuras normalmente de mayor dureza, podría llevar a valores por encima del rango mencionado
- La eficiencia energética de los equipos de molienda. (Tecnología muy antigua).

La molienda se puede efectuar por circuito abierto o cerrado.

Para el caso del circuito abierto, la premolienda y el refino se efectúan en un solo molino normalmente dividido en dos cámaras o más, donde la última está dotada de un calificador de bolas, las desventajas que presenta este sistema es la disipación del calor latente en el clinker y el calor de molturación, lo que requiere una fuerte ventilación de los molinos e incluso la inyección de agua y la dificultad del cambio rápido y otras finuras distintas a la prefijadas.(Autores, 1982; Duda, 1977)

En el caso del circuito cerrado, la instalación va dotada de un separador, siendo la disposición del conjunto similar a la de molienda de crudo, el separador hace posible la regulación de la finura dentro de los límites deseados, los molinos suelen ser de varias cámaras como en los casos anteriores y de igual forma también es necesario eliminar una gran cantidad de calor, aunque en este tipo de instalación se vea favorecido el hecho de utilizar mayores caudales de aire, pero puede seguir siendo necesaria la inyección de agua.(Autores, 1982; Duda, 1977)

Las mayores exigencias de la finura o granulometría del material molido, especialmente en la fabricación de los distintos tipos de cemento (como producto final) implican una mayor utilización del circuito cerrado. En la Fábrica de cemento Siguaney presenta ambos tipos de circuitos para la producción el primero se usa en la parte de los molinos de pasta y el cerrado para los molinos de cemento.

La distribución media en porcentaje de la energía eléctrica consumida por una industria de

cemento de proceso húmedo es la siguiente: (Autores, 1982; Duda, 1977)

- Extracción, preparación de materias primas y transporte a fábrica 3
- Prehomogenización y molienda de crudo 18
- Homogeneización y conjunto de horno 29
- Molienda de cemento y acabado 24
- Servicios generales y auxiliares 23
- Iluminación 3

La fábrica objeto de estudio no está muy diferente de estos números, en cuestión consumió solo en energía eléctrica en el 2009 dentro del área de molinos solamente 4382947 kWh produciendo un total de 156356 toneladas de cemento. Hay que tener en cuenta que la industria cemento “Siguaney” no se encuentra trabajando a plena capacidad, desde hace muchos años se planifica la producción mensual y esta la realiza por contiendas, en ocasiones contiendas por áreas de producción y otras ocasiones por tipos de clínquer y cementos, esto en dependencia de las necesidades.

*Tabla 2.1 - Consumo y producción histórica del 2009 en el área de molinos. Fuente: (Siguaney, 2005 - 2008)*

Cemento 2009	Consumo (kWh)	Producción (t)	Índice de Consumo(kWh/t)
Enero	491625	16310	31.00
Febrero	456750	15200	30.05
Marzo	355125	12350	28.76
Abril	423375	14730	28.76
Mayo	452250	15050	30.05
Junio	201891	7530	26.82
Julio	459756	15905	28.91
Agosto	412500	14210	29.03
Septiembre	375000	13820	27.14
Octubre	468000	16110	29.05
Noviembre	272300	10250	26.50
Diciembre	511125	16925	30.20

### ***2.3 Molinos de Bolas***

El molino de bola que se utilizan en diferentes tipos de industrias para moler infinidades de productos no son más que un cilindro que gira a una determinada velocidad y en su interior se encuentra recubierto de piezas de acero llamadas blindaje que son las encargadas de elevar hasta cierta altura las bolas de acero produciendo una ola que trae como consecuencia que la materia prima quede en partículas de microscópico tamaño. Los molinos de bola de la fábrica de cemento de Siguaney no son muy distintos de estos que se explican.

Debido que las bolas son las encargadas de moler y dejar el material lo más fino posible los molinos de bolas son tan ineficientes, pues el área de contacto entre una bola y otra es muy pequeño (ver fig 2.1) y esto hace que el tiempo de la materia prima dentro del molino se alargue y con ello los consumos de energía sean más elevados.



*Fig. 2.1 – Fotografía de diferentes bolas utilizadas dentro de un molino de bola. Fuente: Fotografía propia.*

En estos tipos de molinos, de la energía que se suministra para moler las materias primas, se aprovecha el 12%, es decir que por cada 1 kWh un 0,88 kWh se pierde principalmente por ruido, vibraciones y calor, entre otras, según la literatura especializada. (Autores, 1982, 1998; Canales & Autores, 2004; Duda, 1977; Pérez, 1995)

Unas de las formas más utilizadas para generar eficiencia es aprovechar al máximo las fuentes de energía, en el caso de los molinos de bola, teniendo en cuenta los principales potenciales de pérdida de energía son el ruido y las vibraciones y es importante aprovecharlas mediante la

instalación de cerramientos insonorizados con material aislante y absorbente que reduce las emisiones de ruido intenso al exterior.

El molino de bola es un equipo dominante para moler los materiales machacados y es ampliamente utilizado en la cadena de producción de polvos incluyendo el cemento, silicato, nuevos tipo material de construcción, material refractario, fertilizante, preparación de menas de metal ferroso y no ferroso, la cerámica de cristal entre otros; estos molinos pueden moler varios minerales y otros materiales de tipo seco o mojado. Hay dos clases de molino de bola, de tipo de la rejilla y de tipo del overfall debido a las maneras diferentes de descargar el material.

Debido a que estos molinos son tan ineficientes, el desarrollo industrial siempre crea nuevas alternativas para una mayor eficiencia en los proceso fabriles, en el mundo ya se han creado molinos sustituidores del ineficiente molino de bolas, el cual es el Molino Vertical de Rodillos, a partir de esto se ha tenido en cuenta la posibilidad de cambiar la tecnología existente en la fábrica de cemento “Siguaney”

Especificaciones técnicas del molino de bola:

1. Es una herramienta eficiente para moler muchos materiales en polvo fino
2. El molino de bola es ampliamente utilizado en material de construcción
3. Hay dos maneras de pulido: la manera seca y la manera húmeda.
4. Mientras el barril gira, el material se pulveriza hasta quedar como polvo.
5. Cuanto más largo es el molino de bola, mejor será la fineza del producto.

#### ***2.4 Descripción de proceso de producción de molinos de pasta***

El proceso empieza en los yacimientos de materia prima, los cuales son Caolín, Arcilla, Zeolita o Toba, Caliza y Yeso, sobre los yacimientos de estos materiales se pueden decir que:

La caliza es utilizada para la producción de ambos tipos de cemento. Esta materia prima se extrae en diferentes regiones de acuerdo a su uso, para el cemento blanco se extrae caliza blanca, la cual tiene un gran % de blancura, en las cantera de “Nieves Morejón” ubicada en Guayos distante a 20 km de la planta, la otra parte es caliza gris que se extrae en la cantera de la propia planta las cuales están a menos de 1 km, el modo de extracción es por voladura a cielo

abierto y su transportación por carretera. En la tabla 2.2 se muestra como debe ser las características de la caliza deseada para la producción

*Tabla 2.2 – Características de las composiciones químicas de la caliza. Fuente: Elaboración Propia.*

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>W</b>
<b>0.58</b>	<b>0.27</b>	<b>0.04</b>	<b>55.31</b>	<b>0.40</b>	<b>98.4</b>	<b>93.0</b>

El Caolín se extrae de una cantera ubicada en Gaspar (Ciego de Ávila) distante a 130 km de la planta. Se utiliza para la fabricación del cemento blanco solamente, el modo de extracción es por voladura a cielo abierto y su transportación por ferrocarril o carretera. La composición química deseada del caolín se puede ver en la tabla 2.3.

*Tabla 2.3 – Características de las composiciones químicas del Caolín. Fuente: Elaboración Propia.*

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>
<b>75.62</b>	<b>14.17</b>	<b>0.67</b>	<b>0.85</b>	<b>0.30</b>

El Yeso es un subproducto de las salineras al occidente del país distante a 240 km. Este producto presenta el SO<sub>3</sub> en un 44.06 %. Su transportación es por carretera y se usa para la producción de ambos cementos, esta a su vez presenta una composición deseada con la que se trabaja, esta composición se puede observar en la tabla 2.4.

*Tabla 2.4 – Características de las composiciones químicas del Yeso. Fuente: Elaboración Propia.*

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>W</b>
<b>0.34</b>	<b>0.29</b>	<b>0.11</b>	<b>32.22</b>	<b>0.40</b>	<b>92.0</b>

La Arcilla se extrae de “Cataño” un campo cercano a la fábrica, está a unos 3 km de distancia, su transportación es por carretera y se utiliza solo para la fabricación del cemento gris. Esta materia prima a su vez presenta una composición deseada con la que se trabaja, esta composición se puede observar en la tabla 2.5.

*Tabla 2.5 – Características de las composiciones químicas de la Arcilla. Fuente: Elaboración Propia.*

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>
<b>54.9</b>	<b>11.28</b>	<b>5.56</b>	<b>9.76</b>	<b>2.39</b>	<b>14.6</b>

La Zeolita o Toba se extrae a las afuera del poblado de Siguaney a unos 5 km de distancia de la planta, es transportada por carretera. Se utiliza para el cemento gris, solo para el PP-250 con el objetivo de rebajar la calidad del P-350 para su posterior uso o exportación. Esta materia prima a su vez presenta una composición deseada con la que se trabaja, esta composición se puede observar en la tabla 2.6.

*Tabla 2.6 – Características de las composiciones químicas de la Zeolita o Toba. Fuente: Elaboración Propia.*

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>
<b>63.66</b>	<b>11.13</b>	<b>2.97</b>	<b>6.98</b>	<b>1.76</b>

El hierro se extrae de Sola, región situada al norte de la provincia de Camaguey, es transportado por vía férrea hasta la planta, se utiliza solamente para la producción de cemento gris con el objetivo de que el calor de las llamas no afecten directamente las paredes del horno. Esta materia prima a su vez presenta una composición deseada con la que se trabaja, esta composición se puede observar en la tabla 2.7.

*Tabla 2.7 – Características de las composiciones químicas del Hierro. Fuente: Elaboración Propia.*

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>
<b>16.85</b>	<b>19.40</b>	<b>46.20</b>	<b>2.62</b>	<b>1.57</b>

Una vez la materia prima en la planta es procesada cada una de estas para poder ser utilizadas en las diferentes etapas que conlleva la fabricación del cemento.

Para ambos tipos de cemento la caliza una vez extraída de las canteras pasan por 2 trituradoras de martillos de 2.8 kWh/t, la cual procesa unas 230 t/h, dejando la roca con una granulometría máxima de 4 cm.

Más específico para cada proceso se usan como ya se dijo anteriormente diferentes tipos de materias primas, para el caso del cemento blanco, también se utiliza como materia prima, el caolín el cual junto con la caliza procesada y con el hierro, este último se usa para el cemento gris, son almacenados en almacenes abiertos y en el momento de la utilización se transportan con 3 grúas viajeras de 8 m<sup>3</sup>. En cambio la arcilla es depositada en 2 diluidores de 2.7 kWh/t,

los cuales la mezclan con agua entregando 55 t/h y después de lograr una mezcla homogénea son bombeadas a 2 silos de arcilla de 400m<sup>3</sup> cada uno para su almacenamiento.

En el momento de comenzar a elaborar lo que sería la pasta o el crudo del cemento, cada materia prima es depositada en varios alimentadores de bandas que hay en cada molino de pasta, para cada proceso existen dos molinos, la dosificación para el caso del cemento gris es a través de básculas dosificadoras para la caliza y para el hierro, y para la arcilla diluida un flujómetro. Para el caso del proceso blanco con básculas dosificadoras para la caliza y para el caolín, a cada proceso a la entrada del molino se le agrega agua. En la figura 2.2 se representa un pequeño diagrama de flujo del área de los Molinos de Pasta para el proceso gris.

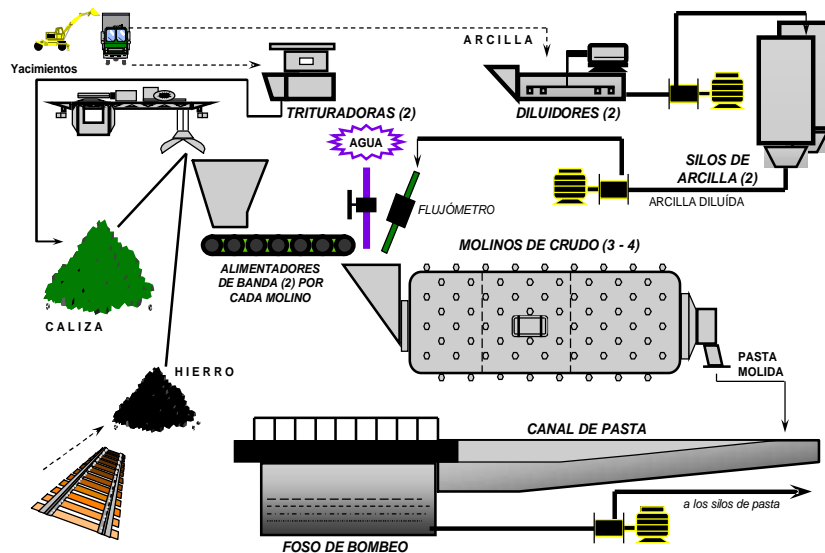


Fig. 2.2 – Diagrama de flujo de la primera etapa de producción, molienda del crudo, caso específico de la figura: proceso gris. Fuente: Elaboración propia.

Los molinos son 4 en total, 2 para cada tipo de pasta, pero cada uno presenta similares características y condiciones de trabajo, todos son molinos tubulares con tres cámaras interiores, tienen una longitud de 14 metros aproximadamente, sus cámaras interiores miden 4.15m la primera y las otras dos 5.5 m, rotan a una velocidad de 19.8 rpm aproximadamente y la potencia del motor principal es de 860 kW

Todas las cámaras cuentan con revestimiento interior de acero al manganeso y de 50 mm de espesor. Dentro de las cámaras se utilizan bolas de acero de 25 – 60 mm de diámetro, el

rendimiento para el caso del proceso blanco es de 20 t/h y para el gris es 40 t/h, el por ciento de humedad con que sale la pasta está entre 34 y 35%, la granulometría corresponde a que un 10% se retenga sobre el tamiz de 0.09 mm. En dependencia del tipo de pasta o crudo que se desea hacer es la cantidad o porciones de material que se depositan a moler, estas porciones se pueden ver en la tabla 2.8 y en la 2.9

*Tabla 2.8 – Representación porcentual de cada Materia Prima en cada tipo de pasta. Fuente: Elaboración Propia.*

<b>Clinquer gris</b>			<b>Clinquer blanco</b>	
<b>Caliza</b>	<b>Arcilla</b>	<b>Hierro</b>	<b>Caolín</b>	<b>Caliza</b>
80%	15%	5%	20%	80%

Una vez molida esta pasta es depositada en una canal la cual vierte en un foso colector de donde se bombea con 2 bombas de 90 m<sup>3</sup>/h hacia los 8 silos de pasta todos de 400 m<sup>3</sup>, donde 5 son para pasta gris y 3 son para pasta blanca. Sobre estos silos la fábrica tiene montado un pequeño laboratorio químico el cual controla y monitorea la calidad de las pastas almacenadas, en caso de alguna deficiencia esta es informada a los responsables de los procesos anteriores y es corregida para posteriormente ser mezclada en los 3 homogenizadores, 1 para blanco y 2 para gris, los cuales son como piscinas de 2500m<sup>3</sup> de capacidad donde la pasta una vez allí debe tener las características óptimas para tu posterior cocinado en los hornos. (Ver tabla 2.9)

*Tabla 2.9 – Características de las composiciones químicas de la pasta o crudo. Arriba: Pasta Blanca; Abajo: Pasta Gris.. Fuente: Elaboración Propia.*

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>O(%)</b>	<b>MS</b>	<b>MA</b>	<b>MH</b>	<b>FSC</b>	<b>Fluidez</b>
<b>15.21</b>	<b>3.34</b>	<b>0.25</b>	<b>45.12</b>	<b>80.0</b>	<b>34 - 35</b>	<b>4.26</b>	<b>13.70</b>	<b>2.40</b>	<b>0.93</b>	<b>4 - 4.5</b>

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>O(%)</b>	<b>MS</b>	<b>MA</b>	<b>MH</b>	<b>FSC</b>	<b>Fluidez</b>
<b>14.24</b>	<b>3.24</b>	<b>2.98</b>	<b>42.27</b>	<b>75</b>	<b>37.2</b>	<b>2.25</b>	<b>1.12</b>	<b>2.06</b>	<b>0.9</b>	<b>4</b>

#### **2.4.1 Régimen de trabajo actual de los molinos de pasta**

Grado de llenado de los molinos de pasta

El grado de llenado de los molinos de bolas es la relación entre el volumen de de apilamiento de las bolas, y el volumen de trabajo del molino. El grado de llenado varía entre un 25 % y un 45 %. Por debajo del 25 % de llenado, los cuerpos moledores se deslizan sobre el blindaje del

molino; por encima del 45 % de grado de llenado se originan dificultades en las trayectorias de caída de los cuerpos molidores.

- Grado de llenado habituales:

para bolas de acero            28 – 45%

para cylpebs                    24 – 33%

- Para molino de tres cámaras son usuales los grados de llenado:

cámara I                        30%

cámara II                       27%

cámara III                      24%

$$h = 0.16 * D$$

$$h = 0.16 * 1.90$$

$$h = 0.30$$

D- diámetro interior del molino

- Velocidad Crítica

$$n_c = \sqrt{\frac{60^2 * g}{4\pi^2 * r}} = \sqrt{\frac{60^2 * 9.81}{4 * 3.14 * \frac{D}{2}}} = \frac{42.3}{\sqrt{D}} = \frac{42.3}{\sqrt{1.90}} = 30.8rpm$$

Este valor es la velocidad de rotación crítica en número de vueltas por minutos, para la cual las bolas no realizan un trabajo útil. El número de vueltas por minuto que en la práctica se aplica de modo general, esta comprendido entre el 65 – 95% de la velocidad crítica.

- Velocidad del molino

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}} = \frac{32}{\sqrt{1.90}} = 23.4rpm$$

- Velocidad angular del molino

$$w = \frac{2\pi * n}{60} = \frac{2\pi * 23.4}{60} = 2.45 rad/s$$

- Volumen de las cámaras

$$V_1 = \frac{\pi * D^2}{4} * L$$

$$V_1 = \frac{\pi * 1.9^2}{4} * 4.15$$

$$V_1 = 11.8m^3$$

$V_1 = V_2$  Ya que tienen las mismas dimensiones tanto en longitud de la cámara como en su diámetro

$$V_3 = \frac{\pi * D^2}{4} * L$$

$$V_3 = \frac{\pi * 1.9^2}{4} * 5.50$$

$$V_3 = 15.6m^3$$

El volumen total del molino en de  $39.2m^3$

- Potencia exigida por los molinos

$$P = c * G * \sqrt{D}$$

$$P = 9.53 * 72 * \sqrt{1.90}$$

$$P = 940CV = 677.5kW$$

c- Factor relacionado con los cuerpos molidores y con el grado de llenado (anexo 3)

G- Carga de bolas en (t)

$$1 CV=0.98HP=735.5W$$

- Distribución de bolas por las cámaras en los molinos de pasta.

Cámara I

d= 70 mm- 5t

d= 80 mm- 7t

d= 90 mm- 9t

Cámara II

d= 40 mm- 7t

d= 50 mm- 7t

d= 60 mm- 7t

Cámara III

d= 25 mm- 15t

d= 30 mm- 15t

- Cálculo del caudal de los molinos de pasta

$$Q = q * \frac{a * b * c}{1000} * 6.7 * V * \sqrt{D} * \sqrt{\frac{G}{D}} \text{ en la cual:}$$

q- caudal específico del molino 50 Kg/kWh

a- coeficiente de morturabilidad (Anexo 4)

*CAPITULO III. ALTERNATIVAS DE AHORRO EN EL ÁREA DE MOLINOS Y DETERMINACION DE LOS POTENCIALES DE AHORRO*

b- factor de corrección para molienda fina (Anexo 5)

Este factor depende del residuo del producto molido sobre el tamiz y se establece como  $b=1$  cuando el residuo es de un 10 %

c- factor de corrección por el tipo de molino. (Anexo 7)

V- Volumen del recinto de molienda en  $m^3$

D- Diámetro interior del molino en m

G- Peso de los cuerpos moledores en t

$$Q = 50 * \frac{3.20 * 1.09 * 1}{1000} * 6.7 * 39.2 * \sqrt{1.9} * \sqrt{\frac{72}{39.2}}$$

$$Q = 30.6 \frac{t}{h}$$

*Tabla 2.10 – Caracterización de los equipos en el área de molienda de pasta Fuente: Elaboración Propia.*

Acciona	Nac.	Pot.	Amp.	R.P.M
Mol.Pasta 1	-	-	-	-
Bba Aceite-1	-	-	-	-
Motor Aux-1	-	-	-	-
Alimentador 1-1	-	-	-	-
Alimentador 2-1	-	-	-	-
Mol.Pasta 2	Checo	860	100	880
Bba Aceite-2	Ruso	1,5	4,2	1140
Motor Aux-2	Checo	12	25,2	1120
Alimentador 1-2	-	-	-	-
Alimentador 2-2	-	-	-	-
Mol. Pasta 3	Checo	860	100	880
Bba Aceite-3	Checo	3	5,8	1700
Motor Aux-3	Checo	12	25,2	1120
Alimentador 1-3				
Alimentador 2-3				
Mol. Pasta 4	Checo	860	100	880
Bba Aceite-4	Checo	1,8	4,5	1140
Motor Aux-4	Checo	12	25,2	1120
Alimentador 1-4				
Alimentador 2-4				
Mol. Pasta 5	Checo	860	100	880
Bba Aceite-5	Ruso	1,8	4,5	1140
Motor Aux-5	Checo	12	25,2	1120
Alimentador 1-5		2CV	6,5	3000
Alimentador 2-5		2CV	6,5	3000

*CAPITULO III. ALTERNATIVAS DE AHORRO EN EL ÁREA DE MOLINOS Y DETERMINACION DE LOS POTENCIALES DE AHORRO*

*Tabla 2.11 – Características de la Grúa cadena de los motores de pasta. Fuente: Elaboración Propia.*

Acciona	Nac.	Pot.	Amp.	R.P.M.
Traslación	Checo	2,2	5,1	1130
Trasl. Carrito	Checo	2,2	4,7	1720
Izaje	Checo	2,2	4,7	1710

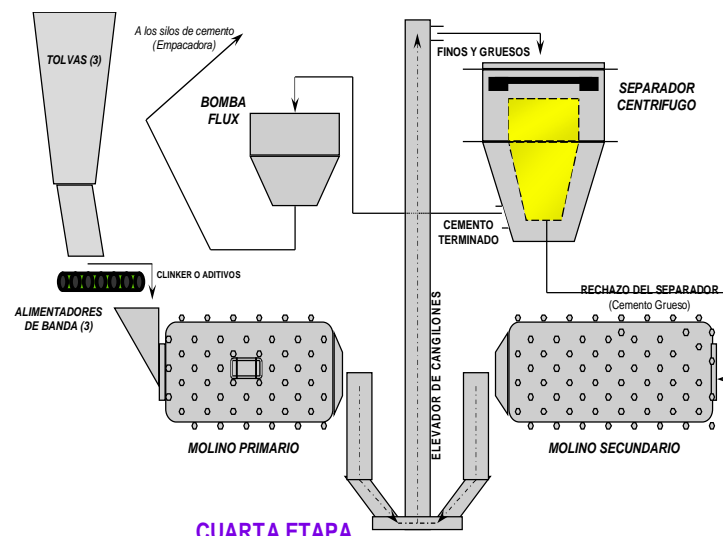
*Tabla 2.12 – Características de la Grúa molinos de pasta. Fuente: Elaboración Propia.*

Traslación 1	Ruso	3	6,7	840
Traslación 2	Ruso	3	6,7	840
Izaje	-	11	23	1160
Trasl. Carrito	Checo	4	9	860

*Tabla 2.13 – Características de las Bombas de Pasta Fuente: Elaboración Propia.*

Acciona	Nac.	Pot.	Amp.	R.P.M.
Pasta Gris 5		132	208	1180
Pasta Gris 6		-	-	-
Pasta Gris 7	Italia	132	245	1770
Pasta Blanca 1		-	-	-
Pasta Blanca 2		-	-	--
Arcilla 3	Checo	90	174	1190
Arcilla 4	Checo	90	174	1190

**2.5 Descripción de proceso de producción de molienda de cemento**



*Fig. 2.3 – Diagrama de flujo de la última etapa de producción, molienda de cemento. Fuente: Elaboración propia.*

*CAPITULO III. ALTERNATIVAS DE AHORRO EN EL ÁREA DE MOLINOS Y DETERMINACION DE LOS POTENCIALES DE AHORRO*

Para almacenar el cemento se cuenta con 5 silos, 2 de 15000 toneladas los cuales son para cemento gris y 3 de 5000 toneladas donde uno es para gris y el restante para el cemento blanco.

El modo de entrega puede ser a granel, tanto para transportarse por vía férrea o por carretera o en bolsas, para las cuales se cuentan con 3 empacadoras de bolsas de hasta 50 kg de un rendimiento de 1200 - 1300 bolsas/h, de estas empacadoras dos son para cemento gris y una para el cemento blanco, las cuales reciben el cemento con las características que se reflejan en las tablas 2.14, 2.15 y 2.16

*Tabla 2.14 – Representación porcentual de cada Materia Prima para la elaboración de Cemento Gris y Blanco. Fuente: Elaboración Propia.*

Tipo	Clinker	Yeso	Caliza	Toba
P-350	90	5	5	
PP-250	75	5		20
Blanco	85	5	10	

*Tabla 2.15 – Características de las composiciones químicas de Cemento Blanco. Fuente: Elaboración Propia.*

MgO	SO <sub>3</sub>	RI	PPI	CaO	Yeso	Caliza
1.37	2	0.66	6.15	1	4.20%	9.63%

Blaine	Fineza	Expansión	Fraguado Inicial	Fraguado Final
3060 cm <sup>2</sup> /g	95.40%	0	110 min.	3.00 horas

COMPRESIÓN	3 días	7 días	28 días
MPa	27.4	35.4	49.4

*Tabla 2.16 – Características de las composiciones químicas de Cemento Gris. Fuente: Elaboración Propia.*

MgO	SO <sub>3</sub>	RI	PPI	CaO <sub>1</sub>	Yeso	Caliza
1.45	2.03	1.33	3.68	1.2	3.48	5.81

Blaine	Fineza	Expansión	Fraguado Inicial	Fraguado Final
2934	95	0	95	2.92

COMPRESIÓN	3 días	7 días	28 días
MPa	18	23.7	33.3

### 2.5.1 Régimen de trabajo actual de los molinos de cemento

- Grado de llenado de los molinos de cemento (primario)

$$h = 0.16 * D$$

$$h = 0.16 * 2.5 \quad (25 - 45\%) - \text{Óptimo}$$

$$h = 0.40$$

D- diámetro interior del molino en (m)

- Grado de llenado de los molinos de cemento (secundario)

$$h = 0.16 * D$$

$$h = 0.16 * 2.8 \quad (25 - 45\%) - \text{Óptimo}$$

$$h = 0.45$$

- Velocidad Crítica molino primario

$$n_c = \sqrt{\frac{60^2 * g}{4\pi^2 * r}} = \sqrt{\frac{60^2 * 9.81}{4 * 3.14 * D/2}} = \frac{42.3}{\sqrt{D}} = \frac{42.3}{\sqrt{2.5}} = 26.7 \text{rpm}$$

- Velocidad Crítica molino secundario

$$n_c = \sqrt{\frac{60^2 * g}{4\pi^2 * r}} = \sqrt{\frac{60^2 * 9.81}{4 * 3.14 * D/2}} = \frac{42.3}{\sqrt{D}} = \frac{42.3}{\sqrt{2.8}} = 24.8 \text{rpm}$$

Este valor es la velocidad de rotación crítica en número de vueltas por minutos, para la cual las bolas no realizan un trabajo útil. El número de vueltas por minuto que en la práctica se aplica de modo general, esta comprendido entre el 65 – 95% de la velocidad crítica.

- Velocidad del molino primario

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}} = \frac{32}{\sqrt{2.5}} = 21.3 \text{rpm}$$

- Velocidad del molino secundario

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}} = \frac{32}{\sqrt{2.8}} = 19.9 \text{rpm}$$

- Velocidad angular del molino primario

$$w = \frac{2\pi * n}{60} = \frac{2\pi * 21.3}{60} = 2.22 \text{ rad/s}$$

- Velocidad angular del molino primario

$$w = \frac{2\pi * n}{60} = \frac{2\pi * 19.9}{60} = 2.08 \text{ rad/s}$$

- Volumen del molino primario

$$V_p = \frac{\pi * D^2}{4} * L$$

$$V_p = \frac{\pi * 2.50^2}{4} * 3.80$$

$$V_p = 18.6 \text{ m}^3$$

- Volumen del molino secundario

$$V_s = \frac{\pi * D^2}{4} * L$$

$$V_s = \frac{\pi * 2.80^2}{4} * 6.00$$

$$V_s = 36.9 \text{ m}^3$$

El volumen total del molino en de  $55.5 \text{ m}^3$

- Potencia exigida por el molino de primario

$$P_p = c * G * \sqrt{D}$$

$$P_p = 8.2 * 28 * \sqrt{2.50}$$

$$P_p = 363 \text{ CV} = 261.5 \text{ kW}$$

$P_p$ - Potencia exigida por el molino primario

c- Factor relacionado con los cuerpos moledores y con el grado de llenado (anexo 3)

G- Carga de bolas en (t)

1 CV=0.98HP=735.5W

- Potencia exigida por el molino de secundario en kW

$$P_s = c * G * \sqrt{D}$$

$$P_s = 8.2 * 60 * \sqrt{2.80}$$

$$P_s = 823.3 CV = 593.4 kW$$

$P_s$  – Potencia exigida por el molino secundario en kW

c- Factor relacionado con los cuerpos moledores y con el grado de llenado (anexo 3)

G- Carga de bolas en (t)

1 CV=0.98HP=735.5W

- Distribución de bolas por molino.

d- diámetro de las bolas moledoras

Primario

d= 30 mm- 12t

d= 40 mm- 10t

d= 50 mm- 6t

Secundario

d= 20 mm- 30t

d= 30 mm- 30t

- Cálculo del caudal del molino primario

$$Q = q * \frac{a * b * c}{1000} * 6.7 * V * \sqrt{D} * \sqrt{\frac{G}{V}}$$

En la cual:

q- caudal específico del molino 40 Kg/kWh

a- coeficiente de morturabilidad (Anexo 4)

El coeficiente de morturabilidad expresa cuanto se eleva o disminuye el caudal del molino respecto al obtenido moliendo clinker de horno rotatorio cuya morturabilidad se iguala a uno. Este mismo coeficiente oscila con su composición mineralógica y depende, ante todo, del contenido de silicato bicálcico, pues cuanto más alto es este mas difícil resulta de moler el clinker (Anexo 6) Además de que mientras el clinker lleve de 2-3 semanas almacenado en los silos el % de silicato bicálcico disminuye.

b- factor de corrección para molienda fina (Anexo 5)

Este factor depende del residuo del producto molido sobre el tamiz y se establece como  $b=1$  cuando el residuo es de un 10 %

c- factor de corrección por el tipo de molino. (Anexo 7)

V- Volumen del recinto de molienda en  $m^3$

D- Diámetro interior del molino en m

G- Peso de los cuerpos moledores en t

$$Q = 40 * \frac{1.0 * 1.09 * 1.04}{1000} * 6.7 * 18.6 * \sqrt{2.50} * \sqrt{\frac{28}{18.6}}$$

$$Q = 10.2 \frac{t}{h}$$

- Cálculo del caudal del molino secundario

$$Q = 40 * \frac{1.0 * 1.09 * 1.04}{1000} * 6.7 * 36.9 * \sqrt{2.80} * \sqrt{\frac{60}{36.9}}$$

$$Q = 24.3 \frac{t}{h}$$

## **2.6 Distribución de los consumos en el área de molienda de cemento**

*Tabla 2.17 – Características de la Línea de Cemento # 1. Fuente: Elaboración Propia.*

Acciona	Nac.	Pot.	Amp.	R.P.M.
Motor Terminal	Checo	860	100	880
Aux. Secundario	Checo	12	25,2	1125
Motor Primario	Ruso	400	47	900
Aux. Primario	Checo	12	25,2	1125
Sinfín Filtro 1	Checo	1	2,3	1685
Sinfín Filtro 2	Checo	1	2,3	1685
Ventilador	Checo	110	190	892
Separador	Checo	130	256	885
Elevador	Ruso	37	62	1175
Bba. Aceite 1	Checo	1,1	2,7	1130
Bba. Aceite 2	Checo	1,1	2,8	1140
Bba. Ac. Fozo	Checo	1,1	2,8	1140
Alimentador 1	Brasil	1,25	5,7	1800
Alimentador 2	Brasil	1,25	5,7	1800
Alimentador 3	Brasil	1,25	-	-
Cinta 11	Japón	7,5	14,8	1730
Cinta 12	Japón	5,5	11,5	1760
Cinta 13	Japón	5,5	11,5	1760

*CAPITULO III. ALTERNATIVAS DE AHORRO EN EL ÁREA DE MOLINOS Y DETERMINACION DE LOS POTENCIALES DE AHORRO*

---

*Tabla 2.18 – Características de la Línea de Cemento # 2. Fuente: Elaboración Propia.*

Acciona	Nac.	Pot.	Amp.	R.P.M.
Motor Terminal	Checo	860	100	880
Aux. Secundario	Checo	12	25,2	1125
Motor Primario	Japón	400	48,5	890
Aux. Primario	Checo	12	25,2	1125
Sinfin Filtro 1	Checo	2,2	5,1	1130
Sinfin Filtro 2	Checo	2,2	5,1	1130
Ventilador	Checo	110	190	892
Separador	Checo	130	256	885
Elevador	-	-	-	-
Bba. Aceite 1	Checo	1,1	2,8	1140
Bba. Aceite 2	Checo	1,1	2,8	1140
Bba. Ac. Fozo	Checo	1,5	2,9	1140
Alimentador 1	Japón	0,75	1,65	1500
Alimentador 2	Checo	2	9,3	1140
Alimentador 3	Japón	0,75	1,65	1500
Opérculo 1	Ruso	0,75	1,95	1100
Vent. Opérculo 1	Ruso	7,5	15,4	3500
Opérculo 2	Ruso	0,75	1,95	1100
Vent. Opérculo 2	Ruso	7,5	15,4	3500

*Tabla 2.19– Características de la Línea de Cemento # 3. Fuente: Elaboración Propia.*

Acciona	Nac.	Pot.	Amp.	R.P.M.
Sinfin Filtros 1	-	-	-	-
Sinfin Filtros 2	Japón	5,5	11,5	1680
Ventilador	Checo	75	85	880
Separador	Checo	130	256	885
Elevador	-	-	-	-
Bba. Aceite 1	Checo	1,1	2,8	1140
Bba. Aceite 2	Checo	1,1	2,8	1140
Mol. Cto. Sec.	Alemán	1000	122	886
M. Aux. Sec	Checo	12	25,2	1125
Bba. Aceite	Checo	1,5	2,9	1140
Mol. Cto. Prim.	Checo	400	47,9	890
M. Aux. Prim	Checo	12	25,2	1125
Alimentador 1	Checo	2,2	4,7	1720

*CAPITULO III. ALTERNATIVAS DE AHORRO EN EL ÁREA DE MOLINOS Y DETERMINACION DE LOS POTENCIALES DE AHORRO*

Alimentador 2	Checo	0,81	2,8	1500
Alimentador 3	Checo	3,6	7,3	1120
Opérculo 1	Ruso	0,75	1,95	1100
Vent. Opérculo 1	Ruso	7,5	15,4	2920

***2.7 Conclusiones parciales.***

Teniendo en cuenta los cálculos realizados en epígrafes anteriores en relación con los datos técnicos obtenidos de los diferentes equipos dentro del área de molienda; específicamente en los motores de los molinos, he llegado a la conclusión de que existe un sobre consumo de energía eléctrica pues estos molinos solo requieren de una potencia 677.5 kW en el caso de los molinos de pasta, 261.5 kW en el molino de cemento primario y 593.4 kW en el secundario, teniendo en realidad motores de 860 kW en el caso de los molinos de pasta y 400 kW en el de cemento primario.

## ***Capítulo III: Alternativas de Ahorro en el Área de Molinos y determinación de los potenciales de ahorro***

### ***3.1 Introducción.***

En los últimos años el mundo se ha visto envuelto en una crisis energética y económica de la cual nuestro país no ha sido la excepción de dicha crisis.

La alta dirección de nuestro país ha tomado las medidas propicias de controlar muy de cerca las industrias altas consumidoras de portadores energéticos, y la industria cementera se encuentra entre una de ellas y es posible que se encuentre encabezando dicha lista. Para esto se están tomando medidas a corto, mediano y largo plazo en dependencia de las posibilidades económicas y políticos-administrativas, de manera que estas operen más eficiente y aporten con el ahorro energético.

Algunas de estas medidas tomadas con respecto al ahorro energético referente a los molinos, tanto los de pasta como los de cemento son:

- Aprovechamiento de las fuentes de energía que se desechan en el proceso como calor, ruido y vibraciones.
- Operaciones de las áreas de consumos en “contendias energéticas” si la producción lo permite.
- Posibilidad de cambio de la tecnología para los molinos de bola por molinos verticales (roller press)

### ***3.2 Posibles formas de recuperación de calor a la salida de los molinos***

En la fábrica de cemento Siguaney se ha venido experimentando un nuevo tipo de cemento, cemento Hidrófugo. A este tipo de cemento se le adiciona cierta cantidad de cera de caña proporcionándole a este una mayor fraguabilidad y a su vez una mejor calidad a la hora de trabajar con el mismo.

La producción del cemento de nuevo tipo (Hidrófugo) ha permitido usar el calor de perdidas que se presenta en los molinos como fuente de energía para la fusión de la cera en un dosificador, que tiene como temperatura de fusión de 70 - 75 °C y a su vez la dosificación sea la correcta

3.2.1- Pérdidas de calor en la salida del molino de pasta donde:

C<sub>1</sub>- Calor a la salida del molino en kWh

Q-caudal del molino en kg/h

Ce-Calor especifico del cemento en kcal/Kg °C

Tent- temperatura de entrada del molino en °C

Tsal- temperatura de salida del molino en °C

1 kWh – 860kcal

$$C_1 = \frac{Q * Ce * (Tsal - Tent)}{860} = \frac{30600 * 0.185 * (95 - 27)}{860}$$

$$C_1 = 447.6 \text{ kWh}$$

3.2.2- Pérdidas de calor por radiación en el tambor de molienda

Donde:

C<sub>2</sub>- cantidad de calor desprendido por radiación en las paredes del molino en kWh

A- área exterior del tambor en m<sup>2</sup>

Fr- radiación del tambor de molienda en Kcal/kg °C

D- diámetro del tambor en m

h- largo del tambor en m

$$C_2 = \frac{A * Fr}{860} = \frac{82.3 * 200}{860}$$

$$C_2 = 35.8 \text{ kWh}$$

$$A = \pi * D * h$$

$$A = 3.14 * 1.90 * 13.80$$

$$A = 82.3 \text{ m}^2$$

Total de pérdidas de calor

$$C_t = C_1 + C_2$$

$$C_t = 447.6 + 35.8$$

$$C_t = 483.3 \text{ kWh}$$

$$\frac{483.3 * 100}{677} = 71.4\%$$

En los molinos de pasta según las fórmulas tomadas del manual tecnológico del cemento por la salida del molino se pierden 447.6 kWh de energía en forma de calor, a través de la caparazón exterior se pierde por radiación 35.8 kWh. Teniendo en cuenta que el molino necesita una potencia de 677 kW, estas pérdidas representan un 71.4% de la potencia absorbida por el molino.

3.2.3- Pérdidas de calor en la salida del molino de cemento donde:

Q-caudal del molino en kg/h

Ce-Calor específico del cemento en kcal/Kg °C

Tent- temperatura de entrada del molino en °C

Tsal- temperatura de salida del molino en °C

1 kWh – 860kcal

Molino primario

C<sub>1p</sub> – cantidad de calor a la salida del molino primario en kWh

$$C_{1p} = \frac{Q * Ce * (Tsal - Tent)}{860} = \frac{10200 * 0.185 * (95 - 27)}{860}$$

$$C_{1p} = 149.2 \text{ kWh}$$

Molino Secundario

C<sub>1s</sub> – cantidad de calor a la salida del molino secundario en kW

$$C_{1s} = \frac{Q * Ce * (Tsal - Tent)}{860} = \frac{24300 * 0.185 * (95 - 27)}{860}$$

$$C_{1s} = 355 \text{ kWh}$$

3.2.4- Pérdidas de calor por radiación en el tambor de molienda donde:

C<sub>2p</sub> -Cantidad de calor desprendido por las paredes del molino primario en kWh.

C<sub>2s</sub> -Cantidad de calor desprendido por las paredes del molino secundario en kWh

B- área exterior del tambor en m<sup>2</sup>

Fr- radiación del tambor de molienda en kcal/kg °C

D- diámetro del tambor en m

h- largo del tambor en m

$$C_{2p} = \frac{A * Fr}{860} = \frac{29.8 * 200}{860}$$

$$C_{2p} = 6.9 \text{ kWh}$$

$$C_{2s} = \frac{A * Fr}{860} = \frac{52.7 * 200}{860}$$

$$C_{2s} = 12.3 \text{ kWh}$$

$$A_p = \pi * D * h$$

$$A_p = 3.14 * 2.50 * 3.8$$

$$A_p = 29.8 \text{ m}^2$$

$$A_s = \pi * D * h$$

$$A_s = 3.14 * 2.80 * 6.00$$

$$A_s = 52.7 \text{ m}^2$$

Total de pérdidas de calor

Molino primario

$$C_t = C_{1p} + C_{2p}$$

$$C_t = 149.2 + 6.9$$

$$C_t = 156.1 \text{ kWh}$$

$$\frac{156.1 * 100}{261.5} = 59.7\%$$

En el molino primario se absorbe una potencia de de 261.5 kW según los cálculos realizados por el manual tecnológico del cemento, de ello se pierden 156.5 kWh de energía lo que representa un 59,7% en forma de calor por la salida del molino y por radiación en las paredes del mismo.

Molino secundario

$$C_t = C_{1s} + C_{2s}$$

$$C_t = 355 + 12.3$$

$$C_t = 367.3 \text{ kWh}$$

$$\frac{367 * 100}{593.4} = 61.8\%$$

Se pierde en los molinos secundarios 367 kWh de energía en forma de calor lo que representa el 61.8 % de la potencia suministrada.

### ***3.3 Determinación de los potenciales de ahorro***

El consumo eléctrico en la molienda en las instalaciones estudiadas tiene un valor medio del 24 % del consumo eléctrico global de la planta. Salvo en lo referente al aprovechamiento de los gases no existen diferencias esenciales entre los sistemas de molturación del crudo y del clinker. Los molinos de bolas son máquinas de elevado consumo y muy bajo rendimiento. Solamente una cantidad inferior a la décima parte de la energía eléctrica suministrada, es empleada propiamente en el desmenuzamiento de los materiales. En consecuencia más del 88 % de la energía consumida se derrocha durante este proceso y es disipada básicamente en forma de calor, ruido o vibración.

#### **3.3.1- Molinos de pasta**

En los molinos de pasta existe un gran sobreconsumo que es originado por varias causas, una de estas causas es el dimensionamiento del motor principal con una potencia de 860 kW de la cual el molino solo requiere 677 kW para que funcione según los cálculos a partir del manual tecnológico del cemento, a esto se le suman 40 kW que requiere la transmisión mecánica por lo que 143 kW se pierden por sobredimensionamiento. Otra de las principales causas es mediante el calor que se pierde en las paredes del molino y a la salida de este. Estas pérdidas ascienden a valores notables como 483.3 kWh lo que representa el 71.4 % de la potencia que absorbe el molino.

#### **3.3.2- Molinos de cemento**

En los molinos de cemento es distinto porque es un circuito cerrado de dos molinos uno primario y otro secundario, ambos están presentando un alto consumo en cuanto a diseño, el primario presenta un motor de 400 kW y el secundario 860 kW de potencia de la cual según el manual tecnológico del cemento el molino primario solo requiere unos 261.5 kW más la potencia que requiere la transmisión mecánica por lo que se pierden por sobredimensionamiento 98.8 kW de potencia y en el secundario se requiere para hacer girar el

molino 593.4 kW más la potencia de la transmisión mecánica se pierden 226.6 kW. Otra de las principales causas es mediante el calor que se pierde en las paredes del molino y a la salida de este. Estas pérdidas ascienden a valores notables como 156 kWh en el primario y 367 kWh en el secundario lo que representa el 59.7 y 61.8 % respectivamente de la energía absorbida por los molinos.

### 3.3.3- Repercusión económica del aprovechamiento de las pérdidas de calor.

Para las tarifas actuales por las que se rige la fábrica tales como:

0.08 \$/kW Horario de mayor consumo (horario pico).

0.04 \$/kW Horario durante el día que no sea horario pico.

0.02 \$/kW Horario de la madrugada.

Teniendo en cuenta las diferentes tarifas en los distintos horarios, para los molinos de pasta si esta energía se aprovechara representarían:

#### ***Molinos de pasta***

Horario pico 38.7 \$ la hora

Horario durante el día 19.3 \$ la hora

Horario de la madrugada 9.6 \$ la hora

#### ***Molinos de cemento***

Horario pico 41.8 \$ la hora

Horario durante el día 20.9 \$ la hora

Horario de la madrugada 10.5 \$ la hora

Estos precios son tan bajos porque la fábrica se encuentra sustentada, pero si estos precios fueran a 15 centavos CUC

La energía que se pierde en forma de calor si se cobrara a 15 centavos CUC se estarían perdiendo 72.5 CUC por cada hora de molienda de pasta y 78.5 CUC por hora en los molinos de cemento.

#### 3.3.4- Repercusión económica debido al sobredimensionamiento de los motores principales

Debido a que los motores de los molinos se encuentran sobredimensionados, los consumos energéticos se elevan por esta causa, por ejemplo en los molinos de pasta solo se requiere de una potencia de 677.5 kW más 40 kW por los reductores mecánicos y el motor principal es de 860 kW por lo que 142.5 kW se están perdiendo indebidamente y a un precio de 15 centavos dólar eso significa que se gastan 21.4 CUC por cada hora que funcione este molino sin proporcionar trabajo alguno. En los de cemento presentan dos motores el primario de 400 kW y el secundario de 860 kW, el primario solo requiere de una potencia de 261 más 40 kW de transmisión mecánica y el secundario 593.4 kW más 40 kW de transmisión mecánica, esto no dice que 325.6 kW se están desperdiciando lo que equivale a 48.9 CUC por cada hora que trabaje que no ejerce ningún tipo de trabajo útil.

#### ***3.4 Operaciones por contienda***

Debido a la crisis energética y a la factibilidad económica por la que cursa el país, la fábrica de cemento se ha visto obligada a realizar sus operaciones productivas por contiendas, estas son separadas por áreas de producción.

Las industrias cementeras están diseñadas para que operen 11 meses del año y tan solo un mes de mantenimiento, estas condiciones de producción no logran tan al pie de la letra por diversos motivos. Esto crea el problema que gran parte de las industrias cementeras del país no tienen las posibilidades operacionales como para trabajar por tiempo corrido de la forma para que están destinadas.

Las industrias de cemento, principalmente la que es el caso de estudios separa las operaciones de producción, por tipo de cemento y por área, estas son las tres principales: Área de molinos de pasta y homogenizadores, área de hornos y el área de molinos de cemento.

En el proceso de cemento primero se realiza la pasta en los molinos, posteriormente se cocina en el horno para crear la materia prima principal del cemento que es el clinker y una vez realizado esto, se muele en conjunto con otros aditivos para crear el cemento.

Teniendo en cuenta el ciclo de operación anterior se realiza los desplazamiento de cargas, por una etapa de tiempo operan los molinos de pasta para almacenar un poco de este producto y luego cocinarlos en el horno, por un plazo de tiempo ambos trabajan al unísono; una vez almacenada la cantidad necesaria de clinker se comienza a operar los molinos de cemento en el horario donde no coincida con el pico eléctrico nacional y donde la tarifa eléctrica sea más barata para la industria, de manera que sea económica y energéticamente factible para todos.

### ***3.5 Molino vertical de cemento de serie LM***

Requiere de una inversión más baja por parte de los mecanismos de trituración, secador, molienda y movimiento los cuales están juntados en el mismo sistema y por otra parte razonable de la colocación, que este ocupa solo el 50% del espacio que ocupa el sistema del molino de bola lo que puede reducir más inversión y el costo de operación además de aprovechamiento del espacio.

La alta eficiencia del Molino vertical, aplicando el rodillo que muele el material directamente en el plano de molienda, se puede ahorrar de un 30%-40% el consumo de energía en comparación con el sistema del molino de bola: poco desgaste en el proceso de molienda, no hay contacto entre el rodillo y el anillo por eso el molino tendrá poco desgaste y larga vida de funcionamiento.

La alta capacidad de secador, ya que el viento caliente contacta a los materiales directamente en el molino ahorrando de esta manera energía térmica. En el se pueden satisfacer varias necesidades de humedad ajustando la temperatura del viento caliente. Este molino consta de una operación sencilla y un funcionamiento seguro. El equipo se instala un sistema automático

de control, que puede realizar el control a distancia y se maneja fácilmente con la instalación de un accesorio que evite el contacto entre el rodillo y el plato de molienda evitando el choque y el fuerte sacudimiento. La estabilidad de la calidad por parte del material que se queda poco tiempo en el Molino es otra de sus ventajas fundamentales además de producir poco temblor, poco ruido.

### ***3.6 Conclusiones parciales***

En este capítulo se dan a conocer los valores cuantitativos de los principales potenciales de ahorro que se pudieran aprovechar. Por otra parte se muestran algunas posibles alternativas que pudieran minimizar los altos consumos de energía eléctrica. Las operaciones por contiendas que permiten que los molinos funcionen a una determinada hora que el costo energético sean lo menor posible y la recomendación de una nueva tecnología que presenta una eficiencia superior en un 30 - 40 % que la tecnología existente.

## ***Conclusiones***

Con la realización de este trabajo hemos llegado a las siguientes conclusiones:

- 1- Se realizaron estudios energéticos y térmicos donde arrojaron resultados que demuestran la gran cantidad de energía eléctrica que se pierde por sobre dimensionamiento de algunos equipos en el área de los molinos, lo cual representa un gasto innecesario de dinero a la hora de pagar la factura eléctrica.
- 2- Se realizó un estudio exhaustivo con respecto al ahorro en las áreas de los molinos de pasta y cemento lo cual dio al traste de que todo funcionaba bien, exceptuando los motores de estos molinos, lo cual represento los potenciales de ahorro para esta tesis.
- 3- Se propuso alternativas con respecto a los molinos de pasta y de cemento, tanto por mejoramiento de la tecnología como posible cambio de los molinos de bolas por molinos verticales, y así crear un beneficio al disminuir el costo de producción y tener menos gastos de energía en el proceso lo cual es muy importante ya que esta empresa es la mayor consumidora de energía eléctrica de la provincia de Sancti-Spíritus.

### ***Recomendaciones***

- 1- Realizar el diseño del dosificador de cera de caña para que con este se recupere el calor a la salida de los molinos.
- 2- Revisar el diseño de los molinos y utilizar motores que estén de acuerdo a los parámetros requeridos de los mismos y así evitar que estos estén subutilizados.
- 3- Proponer un orden de operaciones por contiendas para el área de molinos que disminuyan los costos de operación de ellos.
- 4- Proponer en próximas tesis de grado un estudio más exhaustivo sobre el posible cambio de tecnología de molinos de bola a molinos verticales.

**Bibliografía**

- Abdalla, K., Berdellans, I., Contreras, M., García, A., Gómez, Y., Henríquez, V. B., et al. (2008). Cuba: A Country Profile on Sustainable Energy Development, *INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA* (pp. 281).
- Anónimo. (2001). Energía de la Biomasa.
- Anónimo. (2008a). EL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL SIGLO XXI. Retrieved 15 de abril, 2010, from [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/10/htm/sec\\_9.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/10/htm/sec_9.html)
- Anónimo. (2008b). Energía y sociedad Retrieved 15 de febrero, 2010, from <http://www.scribd.com/doc/16668235/1-BAXA-G5-ENERGIASMartin>
- Anónimo. (2008c). Fuentes de Energía. Retrieved 15 de febrero, 2010, from [www.hiru.com/es/geografia/geografia\\_02350.html](http://www.hiru.com/es/geografia/geografia_02350.html)
- Anónimo. (2009). CARMELO DAIDONE DIRECTOR DE FÁBRICA DE HOLCIM DE LORCA. *La Verdad*, p. 3, from <http://servicios.laverdad.es/extras/aridosyhormig06/suscr/nec14.htm>
- Anónimo. (2010). El grupo Lafarge reduce más de un 12% sus emisiones de co2. Retrieved 15 de abril, 2010, from <http://www.morvedre.info/innovacio/el-grupo-lafarge-reduce-mas-de-un-12-sus-emisiones-de-co2>
- Autores, C. d. (1982). *Ahorro en Procesos* (Edición Revolucionaria ed. Vol. 2). Madrid, España.
- Autores, C. d. (1998). Diagnóstico Energético, Rama: Cemento. *Situación Energética de la Industria*, 84.
- Canales, C. C., & Autores, C. d. (2004). *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de la Fabricación de Cemento* (Centro de Publicaciones, Secretaría General, Ministerio del Medio Ambiente ed. Vol. 1).
- CERVANTES, Y. G. (2009, jueves 9 de julio). Energía hidráulica favorece red nacional. *GRANMA*, from [www.granma.cubaweb.cu/2009/07/09/nacional/artic16.html](http://www.granma.cubaweb.cu/2009/07/09/nacional/artic16.html)
- Coppinger, S. J. (2008). Strategic Anergy Management. *International Cement Review*, 155-158.
- Duda, D.-I. W. H. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento* (D. A. S. Gonzalez, Trans. Vol. 1). Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin.
- FAO. (2005). Importancia del carbón vegetal. Retrieved 5 de mayo, 2010, from <http://www.fao.org/docrep/q4960s/q4960s04.htm>
- Fernando, S., & Royo, J. (2002). "La Biomasa como Fuente de Energía Renovable" [Electronic Version], from <http://www.cps.unizar.es>
- Grogg, P. (2004). ENERGIA: Cuba apuesta por la diversidad energética. Retrieved 4 de abril, 2010, from <http://cubaalamano.net/sitio/client/report.php?id=63>
- Lafarge. (2010). Todo Sobre Cemento: Ecología Industrial. Retrieved 15 de abril, 2010, from [http://www.lafarge.com.es/wps/portal/es/2\\_2\\_2-Ecologia\\_Industrial](http://www.lafarge.com.es/wps/portal/es/2_2_2-Ecologia_Industrial)
- LARROSA, A. M. (2008). Energía eólica en Cuba: su historia Retrieved 30 de Marzo, 2010, from <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia37/HTML/articulo07.htm>

- Lutgen, P. (2006). Energía Solar, ¿Un Agujero Negro? . Retrieved 15 de abril, 2010, from [www.mitosyfraudes.org/Nuke/AgujeroNegro.html](http://www.mitosyfraudes.org/Nuke/AgujeroNegro.html)
- Martín. (2008). Cuba sigue creciendo en energías renovables. Retrieved 30 de Marzo, 2010, from <http://erenovable.com/2008/03/30/cuba-sigue-creciendo-en-energias-renovables/>
- Morales, I. (2005). Historia de la Industria Petrolera en Cuba. [Electronic Version], 17, from [www.energia.inf.cu/ee-mepetroshistopetro.PDF.pdf](http://www.energia.inf.cu/ee-mepetroshistopetro.PDF.pdf)
- Nordelo, D. A. B., & Yanes, D. J. M. (2006a). *GESTIÓN ENERGÉTICA en el Sector Productivo y los Servicios*: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba.
- Nordelo, D. A. B., & Yanes, D. J. M. (2006b). *Gestión y Economía Energética*: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba.
- PCC. (2006. ). Material de Estudio elaborado por los Dptos. Ideológico y de Industria Básica del CC del PCC. .
- Pérez, I. S. M. R. (1995). *Mesa Redonda Sobre el Ahorro de Energía en la Industria Cementera*. Paper presented at the Forum de Energía.
- Provincial, E. E. (2005 - 2008). *Reporte de Consumo Mensual y Anual* (No. 1-12). Sancti Spiritus: MINBASo. Document Number)
- Siguaney, E. d. C. (2005 - 2008). *Reporte de Producción Mensual* (No. 1-12). Sigauney, Taguasco, Sancti Spiritus: MINBASo. Document Number)
- VICENT, M. (2004 27 de diciembre). Una firma canadiense localiza reservas de 100 millones de barriles de crudo en Cuba *EL PAIS*, from [http://www.elpais.com/articulo/internacional/Fidel/Castro/anuncia/hallazgo/gran/yacimiento/petroleo/elpepiint/20041227elpepiint\\_13/Tes/](http://www.elpais.com/articulo/internacional/Fidel/Castro/anuncia/hallazgo/gran/yacimiento/petroleo/elpepiint/20041227elpepiint_13/Tes/)
- Wikipedia. (2010a, 31 mayo 2010). Biomasa. Retrieved 15 de febrero, 2010, from <http://es.wikipedia.org/wiki/Biomasa>  
[www.definicion-es.com/biomasa/1/](http://www.definicion-es.com/biomasa/1/)  
[www.soloplantasm.com/ver-sitio.php?id=465](http://www.soloplantasm.com/ver-sitio.php?id=465)
- Wikipedia. (2010b, 31 mayo 2010). Energía Eólica. Retrieved 15 de febrero, 2010, from [http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_e%C3%B3lica](http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica)
- Wikipedia. (2010c, 31 mayo 2010). Energía Renovable. Retrieved 15 de febrero, 2010, from [http://es.wikipedia.org/wiki/Energia\\_renovable](http://es.wikipedia.org/wiki/Energia_renovable)
- Wikipedia. (2010d, 31 mayo 2010). Energía Renovable en Alemania. Retrieved 15 de febrero, 2010, from [http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADas\\_renovables\\_en\\_Alemania](http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADas_renovables_en_Alemania)
- Wikipedia. (2010e, 31 mayo 2010). Energy and society. Retrieved 15 de febrero, 2010, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_and\\_society](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_and_society)
- Wikipedia. (2010f, 31 mayo 2010). List of countries by oil consumption. Retrieved 15 de febrero, 2010, from [http://es.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_countries\\_by\\_oil\\_consumption](http://es.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_oil_consumption)
- Wikipedia. (2010g, 31 mayo 2010). Petroleo. Retrieved 15 de febrero, 2010, from <http://es.wikipedia.org/wiki/petroleo>
- Wikipedia. (2010h, 31 mayo 2010). Precio del Petroleo. Retrieved 15 de febrero, 2010, from [http://es.wikipedia.org/wiki/Precio\\_del\\_petr%C3%B3leo](http://es.wikipedia.org/wiki/Precio_del_petr%C3%B3leo)
- Wikipedia. (2010i, 31 mayo 2010). Special Period. Retrieved 15 de febrero, 2010, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Special\\_Period](http://en.wikipedia.org/wiki/Special_Period)

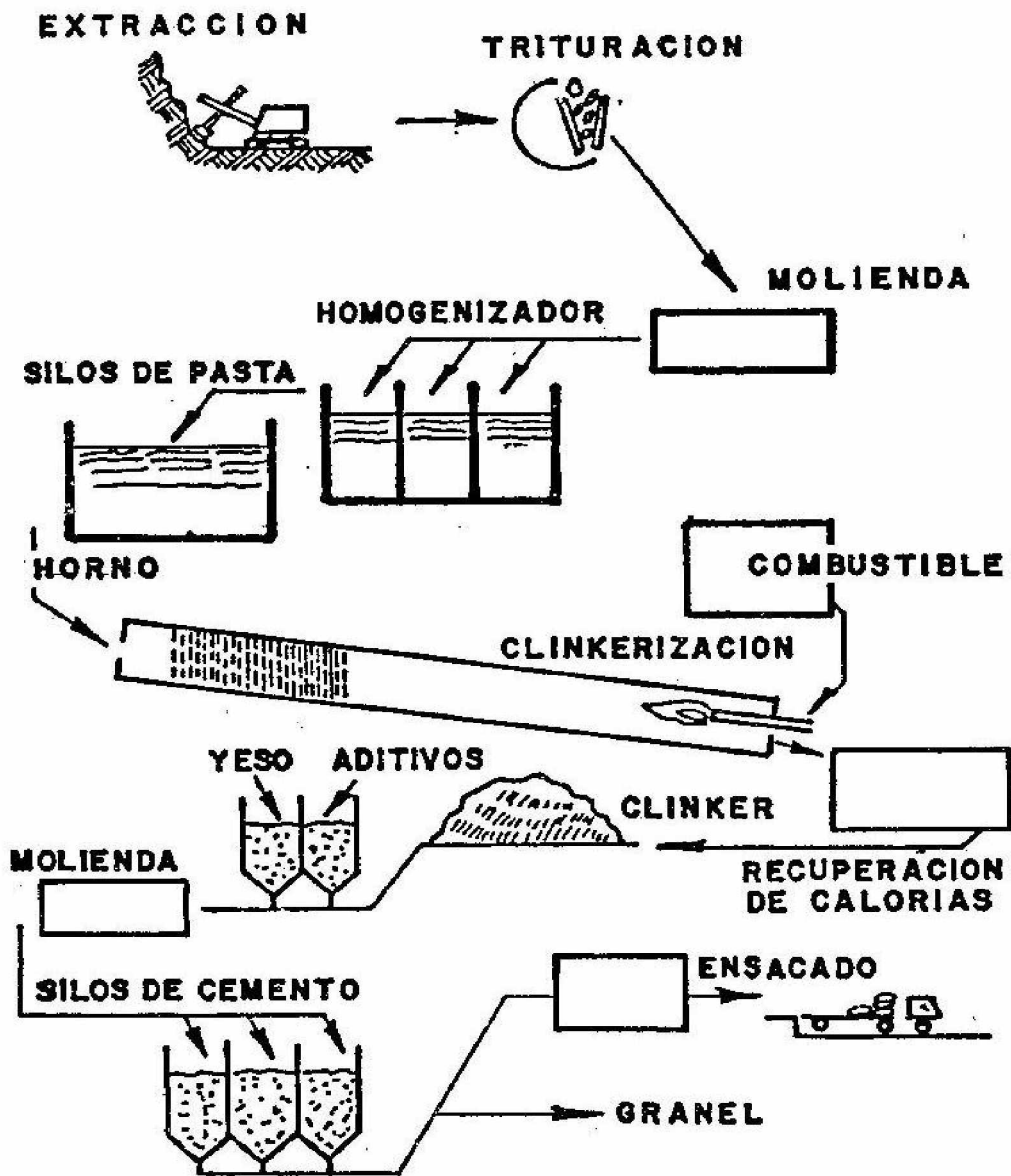
*BIBLIOGRAFÍA*

---

Wikipedia. (2010j, 31 mayo 2010). WTI price 96 09. Retrieved 15 de febrero, 2010, from [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/WTI\\_price\\_96\\_09.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/WTI_price_96_09.svg)

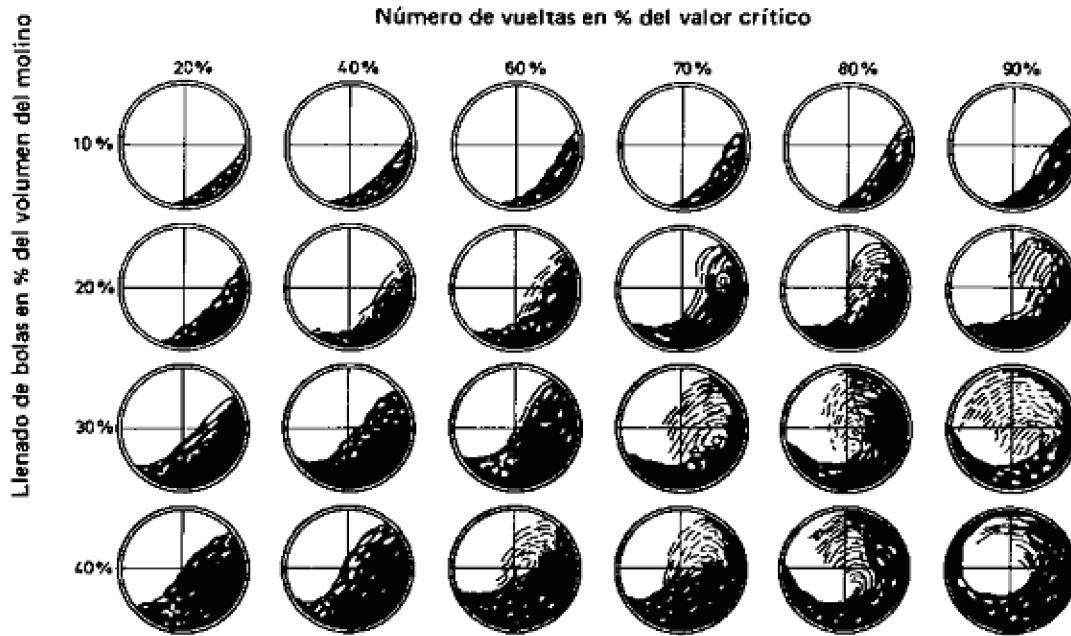
Anexos

Anexo 1- Esquema de la fabricación de cemento por vía húmeda



ESQUEMA DE FABRICACION DE CEMENTO POR VIA HUMEDA.

## Anexo 2- Movimiento de los cuerpos molidores en el molino de tubo



Movimiento de los cuerpos molidores en los molinos de tubo.

**Anexo 3- Valores de  $c$  en relación al grado de llenado y al diámetro de las bolas**

Tabla 6.3.1. Valores del factor (fórmula de Blanc)

Cuerpos molidores	Grado de llenado del molino				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Bolas gruesas (> 60 mm)	11.9	11.0	9.9	8.5	7.0
Bolas de acero (< 60 mm)	11.5	10.6	9.5	8.2	6.8
Cylpebs	11.1	10.2	9.2	8.0	6.0
Cuerpos molidores – promedio	11.5	10.6	9.53	8.23	6.8

*Anexo 4- Coeficiente de morturabilidad a*

Material	Coeficiente a
Clinker de horno rotatorio	1.00
Clinker de horno vert. automático	1.15–1.25
Escorias de horno alto granuladas	0.55–1.10
Creta	3.70
Arcilla	3.00–3.50
Marga	1.40
Caliza	1.20
Arena silícea	0.6–0.7
Carbón	0.8–1.6

**Anexo 5- factor de corrección para molienda fina b**

<b>% de residuo al tamiz de 4900 mallas/cm<sup>2</sup></b>	<b>Factor de corrección b</b>
2	0.59
3	0.65
4	0.71
5	0.77
6	0.82
7	0.86
8	0.91
9	0.95
10	1.00
11	1.04
12	1.09
13	1.13
14	1.17
15	1.21
16	1.26
17	1.30
18	1.34
19	1.38
20	1.42

***Anexo 6- Coeficiente de morturabilidad según el %de Silicato bicálquico en clinker***

<b>Silicato bicálquico en clinker %</b>	<b>Coeficiente de molt, a</b>
5	1.10
10	1.05
15	1.00
20	0.95
25	0.88
30	0.82
35	0.72
40	0.70

**Anexo 7- factor de corrección por el tipo de molino c**

Circuito del molino	Tipo de molino	Factor de corrección c
Circuito abierto	Molino de varias cámaras (3-4 cámaras)	1.0
	Molino de dos cámaras	0.9
Circuito cerrado	Molino con separador de aire	1.3-1.5

**Anexo 8- % de energía eléctrica según el tipo de molino**

Sistema de molienda	% de energía para:	
	Molino	Equipo auxiliar
Molino compound	94	6
Molino a circuito abierto	83	17
Molino barrido por aire	62	38

***Anexo 9- Fotografía espacial de la Fábrica de Cemento “Siguaney” y explicación de las áreas.***

1. Entrada.
2. Organopónico
3. Parqueo.
4. Taller Automotriz.
5. Almacén de Refractario.
6. Almacén de Piezas.
7. Almacén de Piezas.
8. Edificio Administrativo. (Dirección General, EMCV y EAS)
9. Comedor y Cocina.
10. Edificio Administrativo. (Economía, Mantenimiento, Técnico y Producción)
11. Laboratorio Químico.
12. Taller Eléctrico y Mecánico
13. Línea Férrea.
14. Oficinas UEB Productivas.
15. Almacén Central.
16. Empacadora de Cemento Blanco (Bolsas de 1 kg.)
17. Taller Industrial, Pailería y Soldadura.
18. Sala de Compresores.
19. Almacén de Combustible Industrial.
20. Transportador de Clinker Blanco.
21. Enfriaderos de los Hornos y Calderas.
22. Silos de Clinker Blanco.
23. Almacén de Materias Primas. (Clinker Gris, Hierro, Caliza, Yeso, Caolín, Zeolita)
24. Molinos de Cemento. (1 Blanco, 2 Grises)
25. Molinos de Crudo.
26. Casa Empaque Cemento Blanco y Gris. (Bolsas de 42.5 kg)
27. Entrega de Cemento a Granel.
28. Entrega de Cemento a Granel.
29. Silos de Cemento (2 Blancos y 3 Grises)
30. Parqueo de Equipos a la Carga.
31. Dirección de Venta.
32. Horno 4. (Clinker Blanco)
33. Horno 3. (Clinker Gris)
34. Horno 2. (Clinker Gris)
35. Horno 1. (Clinker Gris)
36. Zona de Alimentación Hornos.
37. Trituradora
38. Subestación de Filtro y Tratamiento de Agua.
39. Homogenizador # 11 (Pasta Blanca)
40. Homogenizador # 12 (Pasta Gris)
41. Homogenizador # 13 (Pasta Gris)
42. Silos de Pasta, Laboratorio Químico. (3 Blanco y 5 Grises)
43. Diluidotes de Arcilla.
44. Subestación Eléctrica. (Medio y Bajo Voltaje)
45. Patio Subestación Eléctrica. (Alto Voltaje)
46. Merendero.
47. Chimeneas.
48. Bombas de Petróleo.
49. Acceso a las Canteras.
50. Descargadero de Yeso y Hierro.
51. Planta de Enfriamiento de Agua.
52. Basculas de Carretera.
53. Bascula de Ferrocarril.
54. Línea Férrea.



© 2006 Europa Technologies  
Image © 2006 DigitalGlobe

©2006 Google™

139 m

untero 21°59'14.45" N 79°18'24.74" W elev. 74 m

Secuencia ||||| 100%

Alt. ojo 561 m