



Universidad Andina Simón Bolívar

SEDE CENTRAL

Maestría en Administración de Empresas

**Co-Proceso de combustibles alternos en la industria del cemento:
una alternativa para la eliminación de desechos sólidos en el
Municipio de Sucre**

Tesis presentada para obtener el Grado Académico de:
Magister en Administración de Empresas

MAESTRANTE: Ing. Luis Alberto Terán Calderón

Sucre - Bolivia
Enero 2017

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo no hubiera sido posible, sin las enriquecedoras conversaciones sobre la industria cementera con Ulrich Osthoff Técnico Supervisor de ThyssenKrupp Industrial Solutions AG (Alemania) en Junio de 2012. La amplia experiencia de soporte técnico en diversos continentes en Hornos Rotatorios para la Industria del cemento permitió dar los primeros pasos para el inicio del estudio de AFRs. Agradecer también su apoyo en contactos con diversos expertos sobre el tema para poder aclarar dudas que iban presentándose en el desarrollo del Tema.

Mis agradecimientos a Jeffery Sharratt, Service Sales Manager (FLSmidth USA) por las pautas sobre Pyro-proceso en la industria Cementera.

Mis agradecimientos a Wolfram Zschiesche (VECOPLAN, Alemania) por los consejos, dimensionamiento y cálculo proyectado de una Planta para el Manejo de Residuos Sólidos con destino final la aplicación en una Planta cementera.

Mis agradecimientos a Marco Curdt REFRASTECHNIK (Alemania) por sus consejos sobre la utilización de AFRs y su incidencia en los ladrillos refractarios.

Mis agradecimientos a la Dr. Mag. Bettina Schorr (Freie Universität Berlin) por su apoyo en la valoración de políticas socio-económicas de desarrollo en Latinoamérica.

Mis agradecimientos a José Hoss (YPFB, Bolivia) por su valiosa colaboración en tema consumo/facturación de Gas Natural.

Agradecer a mis padres Alberto y Felicidad por su apoyo incondicional durante el desarrollo del Tema.

RESUMEN

La producción del cemento involucra un alto consumo energético, el proceso propio de transformación del carbonato de calcio $CaCO_3$ (Caliza) en Clinker se realiza a altas temperaturas en un promedio de $1450^{\circ}C$. Para este fin se utilizan combustibles fósiles como: carbón, petróleo, Gas Natural (GN). La disponibilidad de reservas gasíferas en el país hacen que el GN sea empleado en la industria cementera nacional. La producción de cemento viene también acompañada de altas emisiones de CO_2 , llegando a valores de $0,825 t$ de CO_2 por tonelada de Clinker producida. Esto equivaldría por día aproximadamente a 3,8 veces la contaminación ambiental por CO_2 del total del parque automotor del Municipio de Sucre con sus 51 621 unidades registradas.

El Co-Proceso en la industria del cemento es la forma más óptima de aprovechar la energía calorífica de materiales presentes en los desechos sólidos (basura). Esta acción repercute en el cuidado del medio ambiente, consumo racional de combustibles fósiles no renovables sin afectar la calidad del producto final.

El Municipio de Sucre actualmente con sus 259 388 habitantes genera diariamente 170 t de basura. Este alto volumen de materiales sólidos ya ha sobrepasado la capacidad de una “eliminación” a cielo abierto en botaderos municipales denominados “Rellenos Sanitarios”. Sin un control y tratamiento adecuado, no exentos de costos económicos, se corre el riesgo de daños al medio ambiente.

Actualmente en el Municipio de Sucre se tiene una producción de 2760 tdc con la cementera FANCESA, en los próximos años la cementera tiene previsto una capacidad total instalada de 5300 tdc.

La presente Tesis se enfoca en determinar la factibilidad del Co-Proceso de desechos sólidos generados en el Municipio de Sucre en la industria cementera local como una medida para la eliminación tecnológica de Residuos Sólidos (RS). En forma emergente se plantea la necesidad de la valoración de los RS en una planta de manejo de RS así como la futura evaluación de RS como fuente energética para la generación de Electricidad.

En el **Capítulo I** se describen aspectos referentes a la producción del cemento tales como las fases inmersas en este proceso, las materias primas utilizadas y los productos resultantes al final de la cadena de producción. Se tocan aspectos como los avances tecnológicos en el ahorro energético en la producción de cemento. Los combustibles tradicionales empleados son descritos, se hace mención a los Combustibles Alternativos (AFR - Alternative Fuel and Raw material) y describe cronológicamente su implementación en

la industria cementera en naciones que poseen una tecnología avanzada en esta área. Se presenta una comparación de ahorros en emisiones de CO_2 que es un factor determinante en la protección y cuidado del medio ambiente en procesos industriales hoy por hoy.

En el **Capítulo II** se hace un diagnóstico situacional de variables inmersas en el proceso, concentrando el análisis en el proceso de calcinación en los Hornos Rotatorios. Se evaluó el consumo energético del GN en un análisis teórico contrastado con consumos reales de este combustible. Se hace mención a requerimientos que deben tener los AFRs. Se presenta un resumen de los materiales presentes en los RS generados en el Municipio de Sucre.

En el **Capítulo III** se presenta la propuesta del Co-Proceso en la industria cementera. Pruebas de laboratorio, equipos diseñados/construidos y una evaluación de aspectos importantes a ser tomados en cuenta son presentados al final del capítulo. El Return of Investment (ROI) primario es calculado y puede ser usado para una futura decisión empresarial.

En el **Capítulo IV** se presenta las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación.

ABSTRACT

Cement production involves high energy consumption, the process of transformation of calcium carbonate $CaCO_3$ (Limestone) in Clinker is performed at high temperatures, in an average of $1450^{\circ}C$. For this purpose fossil fuels are used e.g. Coal, oil, Natural Gas. The availability of gas reserves in Bolivia makes the GN is used in the national cement industry. Cement production is also involve high emissions of CO_2 , reaching values of 0,825 t of CO_2 per ton of clinker produced. This represent approximately 3,8 times the environmental contamination CO_2 of the total private vehicles of the Municipality of Sucre with 51 621 units registered.

Co-processing in the cement industry is the most optimal way of using the energy of materials in the Municipal Solid Waste (MSW). This action reflects in the care of the environment, rational use of non-renewable fossil fuels without affecting the quality of the final product. The Municipality of Sucre today with a population of 259 388 inhabitants generates 170 t of garbage daily. This high volume of solids has already exceeded the capacity of a "elimination" at open sky in municipal landfills. Without control and proper treatment, not without economic costs, there is a risk of damage to the environment. Nowadays in the Municipality of Sucre there is a 2760 tdc production of cement FANCESA, for the near future the cement factory is planning a total installed capacity of 5300 tdc a significant production to think about co-processing.

The present thesis focuses on determining the feasibility of the Co-Processing of solid waste generated in the municipality of Sucre in the local cement industry as a measure for solid waste disposal technology (RS). Emerging subjects such as the valorization of RS, the necessity of a plant for handling RS and future evaluation of RS as an energy source for electricity generation are presented.

In **Chapter I** aspects related to cement production are treated such as phases immersed in this process, the raw materials and the products obtained at the end of the production chain. The technological advances in energy saving in cement production and traditional fuels used are also described. Alternative Fuels (AFR - Alternative Fuel and Raw material) are mentioned and their chronologically implementation in the cement industry in nations with advanced technology in this area. A comparison of savings in CO_2 emissions are presented, this is a determining factor in the protection and care of the environment in every industrial processes today.

In **Chapter II** a situational diagnosis of embedded variables in the process is done, focusing the analysis in the calcination process in rotary kilns. GN energy consumption is evaluated on a theoretical analysis contracted with real consumption of this fuel. Requirements that AFRs should be fulfill are also threatred. At the end of the chapter a summary of Municipal Solid Waste (garbage) generated in Sucre is presented.

In **Chapter III** the proposal for the Co-Process of MSW in the local cement industry. Laboratory test, equipment designed and constructed for the preparation of sample material and important aspects to be taken into account are presented at the end of the chapter. The primary Return of Investment (ROI) is calculated and can be used for future business decision.

In **Chapter IV** The conclusions and recommendations of this research are presented.

Índice general

Introducción	1
1. Marco Teórico Conceptual	9
1.1. Consideraciones Generales	10
1.2. Proceso de Producción del Cemento	10
1.3. Química de la Producción del Cemento	11
1.4. Avances Tecnológicos en el Ahorro Energético	12
1.5. Clasificación de Cementos	15
1.6. Conceptos básicos de Combustión/Incineración	17
1.6.1. Propiedades de los combustibles	17
1.7. Tipos de Combustibles	18
1.7.1. Gas Natural - GN	19
1.7.2. Combustibles Alternativos	22
1.8. Co-Proceso en la industria del Cemento	25
1.9. Escenarios comparativos en la emisión de CO_2	26
1.9.1. Escenario I: Quema de RS en Incinerador	27
1.9.2. Escenario II: Quema de RS en un Horno de Cemento	29
2. Diagnóstico Situacional del Proceso de Calcinación y Residuos Sólidos	32
2.1. Análisis de Variables	33
2.2. Variables Externas	34
2.2.1. Costo del Gas Natural	34

2.3. Variables del Proceso	34
2.3.1. Consumo del GN	34
2.3.2. Temperatura y Tiempo de Residencia	37
2.3.3. Granulometría del Material	39
2.4. Variables Cuantitativas y Cualitativas de las AFRs	40
2.4.1. Residuos Sólidos en el Municipio de Sucre	40
2.4.2. Poder Calorífico de Materiales	40
2.5. Residuos Sólidos en el Municipio de Sucre	41
2.5.1. Generación de RS	41
2.5.2. Composición de los RS	42
2.5.3. Costos de los RS	42
2.5.4. Residuos Sólidos Mayores y Tóxicos	43
2.6. Resumen del Diagnóstico Situacional	44
3. Propuesta para el Co-Proceso en la Cementera Local	45
3.1. Análisis Técnico Económico	46
3.2. Análisis Técnico	46
3.2.1. Pruebas de Laboratorio	47
3.2.2. Preparación Granulométrica de los RS	49
3.2.3. Pruebas de Ingreso de RS	50
3.2.4. Equipo e instalaciones requeridos	54
3.3. Análisis Económico	56
3.3.1. Cálculo Teórico de Costos por Consumo de GN	56
3.3.2. Cálculo de Volúmenes de AFRs en el Co-Proceso	59
3.3.3. Costo Referencial de Consumo GN	59
3.3.4. Cálculo del Return of Investment - ROI	60
4. Conclusiones y Recomendaciones	62
4.1. Conclusiones	63

4.2. Recomendaciones	65
Bibliografía	66
Anexos	68
Anexo I: EMAS - Resumen Residuos Sólidos	69

Índice de Figuras

1.	Relleno Sanitario “Lechugillas”	3
2.	Captura de Lixiviado en “Lechugillas”	4
3.	Riesgos Medioambientales en “Lechugillas”	4
4.	Residuos Solidos presentes en “Lechugillas”	5
1.1.	Proceso de Producción del Cemento	10
1.2.	Flujograma cuantitativo para la Producción del Cemento	12
1.3.	Minerales producto de las reacciones químicas	13
1.4.	Avances Tecnológicos en el Ahorro Energético	14
1.5.	Cemento Portland Norma ASTM C-150	15
1.6.	Norma ASTM C-595 (cementos con adiciones)	16
1.7.	Norma UNE-EN 197-1:2000	16
1.8.	Combustibles Primarios Ventajas/Desventajas	19
1.9.	Liberación de CO_2 - GN vs Otros Combustibles	20
1.10.	Desarrollo del uso de AFRs - Austria	23
1.11.	Diagrama de Flujo Incineración: Material Sintético, Harina de Carne y Hueso	24
1.12.	Jerarquía de Residuos Sólidos Normativa Europea	26
1.13.	Co-Proceso en la Industria del Cemento	27
2.1.	Puntos de Consumo de GN	35
2.2.	Consumo Referencial de G.N. en $[Nm^3/h]$ para 2000 tdc	36
2.3.	Consumo Referencial de G.N. en $[Nm^3/h]$ para 760 tdc	37
2.4.	Puntos de Alimentación Considerados	38

2.5. Temperaturas y Tiempos de Residencia Proceso de Calcinación	38
2.6. Granulometría recomendada de los Residuos Sólidos	39
3.1. Horno Rotatorio - Torre DOPOL y SLC	47
3.2. Flujograma Horno Rotatorio - Torre DOPOL y SLC	47
3.3. Pruebas de Combustión a 350 °C con Quemador Bunsen	48
3.4. Pruebas de Combustión a 900 °C con Horno de Inducción	48
3.5. Pruebas de Combustión a 1500 °C con Horno de Inducción	49
3.6. Coloración del Cemento vs Concentración AFRs	49
3.7. Recepción de AFRs	50
3.8. Plano de Diseño de la Trituradora	51
3.9. Diseño de las Cuchillas de Corte	51
3.10. Trituradora de Materiales Blandos	52
3.11. Cuchillas - Trituradora de Materiales Blandos	52
3.12. Ingreso de AFRs Cabezal de Salida	53
3.13. Ingreso AFR Cabezal de Salida	53
3.14. Flujo de Aire Terciario	54
3.15. Alimentación de AFRs por Ducto Terciario	54
3.16. Diagrama de Flujo Planta Seleccin de RS	55

Índice de Tablas

1.1. Transformaciones Químicas	12
1.2. Ahorro Energético en Proceso de Calcinación	13
1.3. Análisis GN y su poder calorífico	21
1.4. GN Relación Volumen y Peso	22
1.5. Resumen de Datos Considerados	27
1.6. Resumen de Emisiones de CO_2 Incinerador Vs H.C.	31
2.1. Consumo Referencial de G.N. en $[Nm^3/h]$ para 2000 tdc	35
2.2. Consumo Referencial de GN en $[Nm^3/h]$ para 760 tdc	36
2.3. Temperaturas & Tiempos de Residencia	39
2.4. Valorización Económica-Medioambiental-Social de AFRs	40
2.5. Valor Calorífico Neto de AFRs	41
2.6. Fuentes de Generación de RS	42
2.7. Composición Física de los RS	42
2.8. Costo de Reciclaje por tipo de RS	43
2.9. Valor Recuperado Aproximado de RS	43
3.1. Consumos y Costos Referenciales de GN	60

Introducción

INTRODUCCIÓN

El cemento es un producto esencial con el cual se pueden satisfacer las necesidades básicas a nivel personal/familiar como ser una vivienda o a un nivel macro con una moderna infraestructura nacional e.g. carreteras, puentes, represas, aeropuertos solo para citar algunas de sus aplicaciones. Estos factores lo convierten en el segundo producto más usado a nivel mundial después del agua [1].

La producción del cemento involucra un alto consumo energético, el proceso propio de transformación del carbonato de calcio $CaCO_3$ (Caliza) en Clinker se realiza a altas temperaturas en un promedio de 1450 °C. Para este fin se utilizan combustibles fósiles como: carbón, petróleo, Gas Natural (GN). La disponibilidad de reservas gasíferas en el país hacen que el GN sea empleado en la industria cementera nacional. La producción de cemento viene también acompañada de altas emisiones de CO_2 , llegando a valores de 825 kilogramos de CO_2 por tonelada de Clinker producida [1]. Esto equivaldría por día aproximadamente a 3,8 veces la contaminación ambiental por CO_2 del total del parque automotor del Municipio de Sucre con sus 51 621 unidades registradas [2]. Esta estimación se basa tomando como promedio 235 g CO_2/km [3]

El Co-Proceso en la industria del cemento es la forma más óptima de aprovechar la energía calorífica de materiales presentes en los desechos sólidos (basura). Esta acción repercute en el cuidado del medio ambiente, consumo racional de combustibles fósiles no renovables sin afectar la calidad del producto final [4].

El Municipio de Sucre actualmente con sus 259 388 Habitantes [5] genera diariamente 170 t de basura [6]. Este alto volumen de materiales sólidos ya ha sobrepasado la capacidad de una “eliminación” a cielo abierto en botaderos municipales denominados “Rellenos Sanitarios” (Ver Figura 1). Sin un control y tratamiento adecuado, no exentos de costos económicos, se corre el riesgo de daños al medio ambiente (Ver Figura 2 y Figura 3). La administración de estos rellenos sanitarios está a cargo del departamento de Manejo de Residuos Sólido dependiente del Gobierno Municipal de Sucre.

Dentro de estos residuos sólidos existen materiales con poder calorífico suficiente como para ser utilizados como fuente de energía en la producción del cemento (Ver Figura 4).

La capacidad nominal de producción actual de la cementera local FANCESA es de 2760 toneladas día de Clinker, con dos hornos rotatorios: Polysius con 2000 tdc y Kawasaki con 760 tdc. En los próximos años se espera que la planta Cal-Orcko llegue a una capacidad nominal de 3330 tdc. Actualmente se tiene proyectada una nueva línea de 2000 tdc, alcanzando en los próximos años una producción de 5330 tdc en el Municipio de Sucre. El Co-Proceso permite la sustitución de hasta el 100% de combustibles fósiles no



Figura 1: Relleno Sanitario “Lechugillas”

renovables. Considerando un rango del 10 % a un máximo de 25 %, debido a la curva de aprendizaje local actual con estos combustibles, la sustitución representaría cantidades significativas en toneladas de AFRs. Esto permitirá al Municipio de Sucre la eliminación de sus desechos sólidos en una sinergia entre el municipio y la cementera FANCESA que promueva un desarrollo sostenible del municipio con la aplicación de conocimiento tecnológico. Esto puede resumirse en una situación win/win/win: Industria (Beneficios), Ecología (Planeta) y la sociedad (Población).

Esta iniciativa de un trabajo conjunto entre el Municipio de Sucre y la cementera FANCESA para la solución tecnológica de un problema de la sociedad, puede ser replicado en otras regiones donde esté presente la industria cementera.

En el Municipio de Sucre, a la fecha no se tiene registros oficiales en la industria cementera local (FANCESA) de experiencias en la utilización de combustibles alternativos así como tampoco avances inter-institucionales entre el Municipio de Sucre y FANCESA sobre el tema desechos sólidos/combustible alternativo. A continuación se presenta una breve reseña de eventos que marcaron el inicio del Co-Proceso en la industria cementera Alemana y Austriaca que son consideradas las más eficientes en la administración de recursos energéticos.

A mediados de la década de los 70s del siglo XX, la industria cementera alemana inicia las primeras experiencias en la utilización de combustibles alternativos con el objetivo principal de reducir costo y volúmenes de combustibles fósiles no renovables utilizados en el proceso de transformación de caliza a Clinker.



Figura 2: Captura de Lixiviado en “Lechugillas”



Figura 3: Riesgos Medioambientales en “Lechugillas”

A principio de la década de los 80s, del mismo siglo, la industria cementera austriaca comienza con la utilización de neumáticos usados como combustible. A principios de la década de los 90s plantas austriacas inician la utilización de desechos sólidos como plásticos, papel y textiles. Logrando un trabajo conjunto inter-institucional entre municipios, compañías administradoras del recojo de desechos sólidos llegando a la implementación de plantas de pre-acondicionado de materiales que cumplan las especificaciones de combustibles alternativos utilizados en la industria cementera.

En el año 2003 del presente siglo la cámara 5 de la Corte Europea de Justicia determina que la utilización de desechos sólidos como combustible en los hornos cementeros debe ser clasificado como recuperación [7]. En noviembre del 2008 el Parlamento Europeo por



Figura 4: Residuos Sólidos presentes en “Lechugillas”

medio de la directiva 2008/98/CE regula en un marco jurídico la gestión de RS incluyendo la recuperación y reciclado para de esta forma reducir el impacto sobre el medio ambiente cuidando recursos y administrándolos de forma más eficiente y tecnológica.

La situación problemática se plantea bajo los siguientes aspectos:

Gobierno Municipal de Sucre

- El Botadero municipal “La Esperanza” ha sobrepasado su capacidad de recepción.
- Alrededor de 247 botaderos clandestinos fuera de toda reglamentación y control sanitario.
- Los Residuos Líquidos pueden alcanzar corrientes de agua subterránea.
- Los riesgos medioambientales ante situaciones no controladas.
- Existe peligro de explosiones por altas concentraciones de metano en las capas enterradas.
- Hay pocas reglamentaciones municipales para separación de desechos sólidos.
- Existe poca motivación de aplicación de tecnología en la administración de desechos sólidos.
- Hay desconocimiento del potencial energético/económico en materiales presentes en los desechos sólidos.

Población del Municipio de Sucre

- Hay escasa conciencia del cuidado del medio ambiente en la población.
- Existe baja responsabilidad del individuo en el manejo de desechos sólidos.

De forma genérica Planta de Producción de Cemento:

- El proceso de producción de cemento requiere un alto consumo energético.
- La producción de cemento genera altos valores de contaminación de CO_2 .
- El combustible utilizado en la industria de cemento local es un recurso no renovable.
- La disponibilidad de un combustible tan noble y puro como el Gas Natural frena el crecimiento tecnológico en la industria del cemento en la región.

El presente trabajo de investigación se justifica debido a que el crecimiento demográfico y geográfico del Municipio de Sucre puede alcanzar un desarrollo sostenible estable en una sinergia con la principal industria regional FANCESA, con una adecuada administración de los residuos sólidos y los recursos tecnológicos presentes en la cementera.

Este trabajo en equipo Municipio/FANCESA/Población repercutirá en una mejor calidad de vida de la población, consumo racional de un combustible puro y noble como el Gas Natural y ahorro económico en la producción del cemento. Todo esto enmarcado en una alta conciencia del cuidado del medio ambiente.

Además se debe mencionar que La industria cementera local puede beneficiarse con la emisión de “Bonos de Carbón” al disminuir la contaminación de CO_2 con la utilización de Combustibles Alternativos, acción que es promovida por el Banco Interamericano de Desarrollo [8] y Asamblea Legislativa Plurinacional de Bolivia (Cámara de Diputados) [8]. El factor social también estaría presente con la generación de nuevas fuentes de trabajo.

Por lo que el problema de investigación es:

“¿Cuál será la viabilidad del Co-Proceso de desechos sólidos generados en el Municipio de Sucre en la industria cementera local (FANCESA)?”

Objetivos

El presente trabajo de investigación se desarrollaron los siguientes objetivos:

General

- Determinar la viabilidad del Co-Proceso de desechos sólidos generados en el Municipio de Sucre en la industria cementera local.

Específicos

- Analizar teorías, conceptos, modelos sobre el Co-Proceso de RS en la industria del cemento.
- Analizar el consumo energético en el proceso de producción del cemento.
- Identificar volúmenes y características de desechos producidos por la Ciudad.
- Determinar el poder calorífico de los materiales encontrados en los Residuos Sólidos.
- Determinar el ahorro económico de la utilización de Combustibles Alternativos.
- Identificar los requerimientos necesarios para la implementación del Co-Proceso.
- Analizar Técnico-Económica-Financiera-Social las ventajas y riesgos de la utilización de Combustibles Alternativos.

La Hipótesis que se plantea en el presente trabajo de investigación es:

“El Co-Proceso de desechos sólidos generados en el Municipio de Sucre es viable en la industria cementera local siendo cuantitativa y cualitativamente suficientes y permitiendo un ahorro significativo de gasto energético”

Los principales métodos teóricos que se emplearon en la presente investigación son:

- a) **El método inductivo deductivo:** Es decir que se partió de aspectos particulares, para arribar a un contexto general y viceversa.
- b) **El Método Histórico-Lógico:** se hizo un análisis de la evolución del empleo y grados de sustitución de AFR en países que tiene desarrollada esta tecnología. La situación anterior/actual del manejo de RS y su futuro manejo basado en su poder calorífico. Las capacidades de producción y consumo de energía y su relación causa-efecto: volúmenes de combustible y ahorro energético desde la perspectiva económica. En el ámbito local se hizo un análisis de desarrollo tecnológico, consumos energéticos, en la cementera local en base a las Memorias Anuales publicadas en la última década. Situación similar con el manejo de Residuos Sólidos a cargo de Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre (EMAS). Ver Anexo I.

- c) **El Método Hipotético-Deductivo:** Utilizado en la determinación de los poderes caloríficos de los materiales presentes en los Residuos Sólidos y ubicación de lugar óptimo para la introducción de AFR en un Co-Proceso en la industria del cemento.
- d) **El Método Empírico:** En el análisis matemático de los consumos energéticos en un sistema de calcinación, la evaluación de poderes caloríficos del Gas Natural para ser comparados con AFRs y costos de la energía consumida.
- e) **El Método Criterio/Juicio de Expertos:** A lo largo del desarrollo del tema de investigación se consultó a expertos en el área de implementación de Co-Proceso y ahorro de consumos energéticos. La selección de los mismos se basa en el desarrollo e implementación tecnológica de Residuos Sólidos en la Industria cementera, tales como Polysius (Alemania), Vecoplan (Alemania), Refratechnik (Alemania), FLSmidth (USA). El experto de Polysius en base a su amplia experiencia en evaluación económica colaboró con los procedimientos de cálculo de rentabilidad económica y el experto de Vecoplan con el cálculo aproximado de una planta recicladora. La implementación de AFRs como fuente energética alternativa, en la industria local en general (Incluida la cementera local FANCESA), con bajos y altos volúmenes no cuenta con experiencias significativas para un aporte al presente estudio de investigación. Para la administración de los Residuos Sólidos se hizo consultas a EMAS.

El tipo de estudio es descriptivo. Las variables de estudio fueron: características y volúmenes de los desechos sólidos, propiedades físicas de los materiales, valor económico, consumo energético en la producción del cemento, ahorro económico en la sustitución de combustibles alternativos para citar algunas de las variables estudiadas. Y tiene un componente analítico porque se realizó el análisis matemático de consumos energéticos, costos, volúmenes de sustitución por AFRs.

Capítulo 1

Marco Teórico Conceptual

1.1. Consideraciones Generales

La producción del cemento es un proceso complejo que agrupa varias ramas de la ingeniería. En el presente trabajo se hace un análisis a un punto específico de la cadena de producción que es el uso de combustibles para el proceso de calcinación en el Horno rotatorio. Para mayor información sobre el proceso productivo se recomienda la lectura de la referencia bibliografía que es específica para la industria del cemento.

1.2. Proceso de Producción del Cemento

Básicamente el proceso de producción del cemento consiste en la conversión de la piedra Caliza ($CaCO_3$) en un material nuevo que es el Cemento. Este al ser mezclado con otros materiales inertes y en combinación con H_2O sufre un proceso químico por el cual llega a endurecer y permanece en un estado sólido (Concreto). Las propiedades del producto final cemento dependerán de los aditivos con los cuales el clinker sea molido así como de la finura requerida.

En la Figura 1.1 se presenta de forma genérica esquemática la producción de cemento, cada una de las etapas será descrita de forma resumida [9] [10].

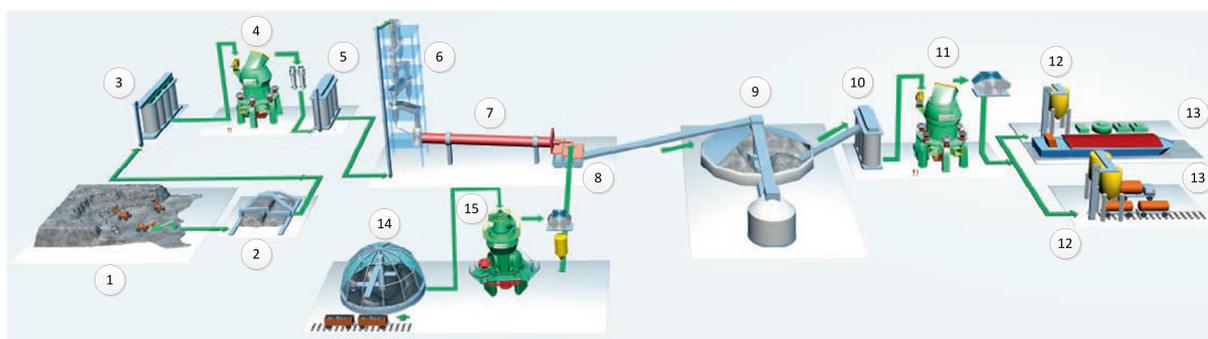


Figura 1.1: Proceso de Producción del Cemento

Preparación de la Materia Prima

1. **Trituración:** El material será reducido a un tamaño de cascajo.
2. **Almacenamiento, Mezcla:** El material triturado será almacenado en hangares o en camas de mezclado (prehomogenizado).
3. **Dosificación:** Una estación dosificadora alimenta la composición correcta al sistema de molienda.

4. **Molienda:** El material será molido a la granulometría deseada y al mismo tiempo secado.
5. **Homogenización:** En silos el material ahora llamado Harina de Crudo será almacenado y desde aquí se procederá a la alimentación dosificada al pre-calentador.

Producción de Clinker

6. **Pre calentamiento y Calcinación:** En la torre de pre calentamiento por ciclones, con o sin Calcinador, se procederá al pre calentamiento y calcinación de la Harina de Crudo adelantando el proceso de descarbonatización.
7. **Quemado:** La harina de crudo será quemada aproximadamente a 1500 °C para convertirse en Clinker.
8. **Enfriamiento:** El Clinker obtenido a la salida del Horno rotatorio será enfriado para un proceso posterior. El calor liberado en este proceso es recuperado y vuelto a insertar en el sistema de calcinación.

Producción de Cemento

9. **Almacenamiento:** El clinker será almacenado para su posterior molienda.
10. **Molienda:** El Clinker será molido con componentes adicionales en función al cemento a producir.
11. **Almacenado, Empacado y Despacho:** El cemento será transportado y almacenado en Silos. El empaque dependiendo del requerimiento será por medio de Bolsa, camiones silos y Big-Bag.

La transformación de la materia en la producción de cemento se muestra en la Figura 1.2 esquematizando el flujo de materia para la producción de 1,25 t de cemento compuesto [11].

1.3. Química de la Producción del Cemento

La transformación química de la materia básicamente se realiza en el proceso de calcinación, donde ocurren una serie de reacciones químicas que se dan a lo largo del Horno Rotatorio y a temperaturas bien demarcadas, estas son presentadas en la Tabla 1.1 y de forma esquemática en la Figura 1.3 [4].

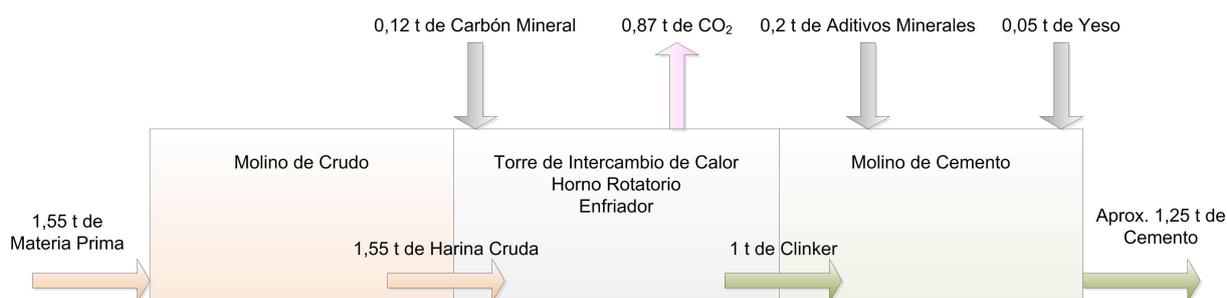


Figura 1.2: Flujograma cuantitativo para la Producción del Cemento

Tabla 1.1: Transformaciones Químicas

[°C]	Proceso	Química	Calor
<100	Secado y eliminación de agua de superficie	$H_2O (l) \rightarrow H_2O (g)$	Endotermico
100 - 400	Eliminación de Agua estructural		Endotermico
400 - 750	La descomposición de la arcilla con la formación de meta-caolinita	$Al_4(OH)_8 \cdot Si_4O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4H_2O$	Endotermico
600 - 900	La descomposición de la meta-caolita a una mezcla de óxidos libres reactivos	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$	Endotermico
600 - 1000	La descomposición de la caliza y la formación de CS y CA	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	Endotermico
800 - 1300	La unión de la cal por CS y CA con formación de C_2S , C_3A y C_4AF	$3CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$ $CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 2CaO \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$	Exotermico
1250 - 1450	Mas unión de Cal con C_2S a formar C_3S	$CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	
1300 - 1380	Formación de la fase fundida de clinker de los aluminatos y ferritas	$2CaO_2 \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$	Exotermico
1250 - 1500	Formación de Alita C_3S		Exotermico
<1250	Enfriamiento de los minerales		

La reacción de interés para el presente trabajo es la des-carbonatación (600 - 1000 °C) o descomposición de la Caliza. En esta reacción es donde se genera la mayor cantidad de CO_2 en todo el proceso de producción del cemento. Esta reacción es presentada a continuación:



Esta reacción se desarrolla en el calcinador a una temperatura de 850 °C. De esta ecuación se obtiene:

$$1 \text{ t de caliza} = 0.56 \text{ t de CaO} + 0.44 \text{ t de } CO_2$$

1.4. Avances Tecnológicos en el Ahorro Energético

La producción del cemento es un proceso con un alto consumo de energía. Normativas internacionales así como desarrollos tecnológicos llevados a cabo por los principales pro-

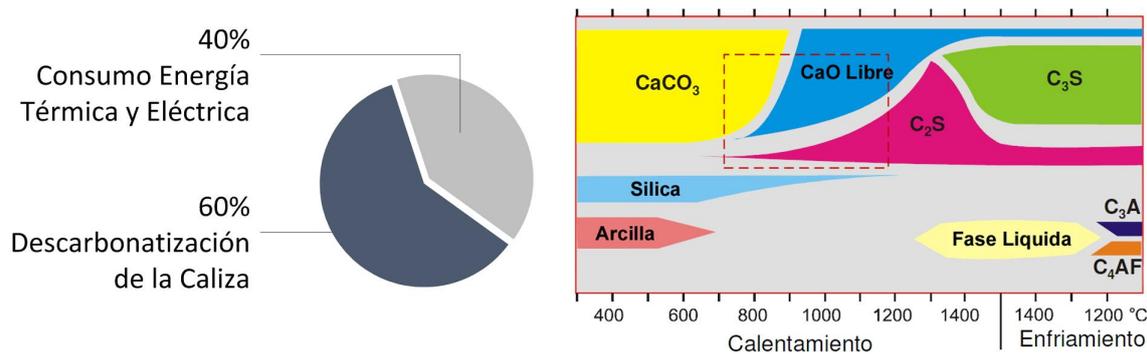


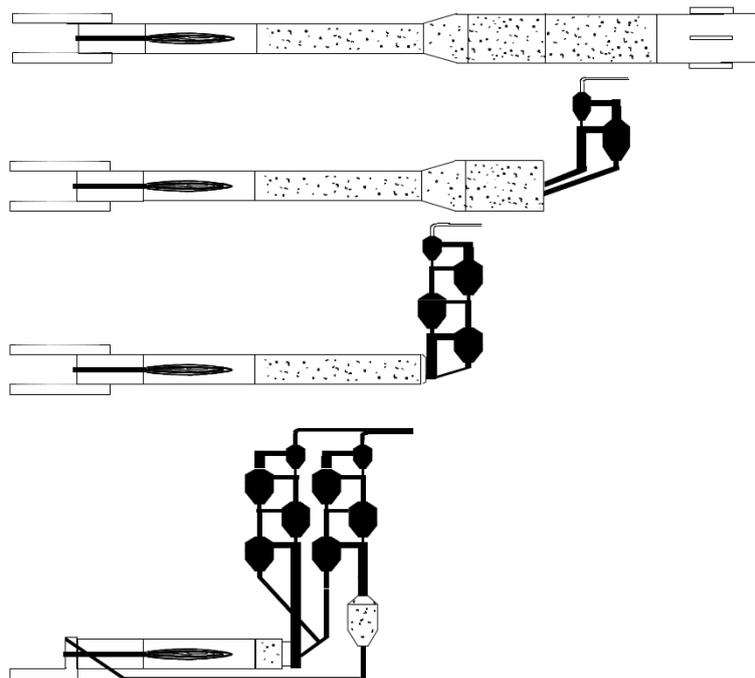
Figura 1.3: Minerales producto de las reacciones químicas

veedores de maquinaria para esta industria han logrado que a lo largo del tiempo los consumos energéticos vayan disminuyendo (Ver Tabla 1.2) [4].

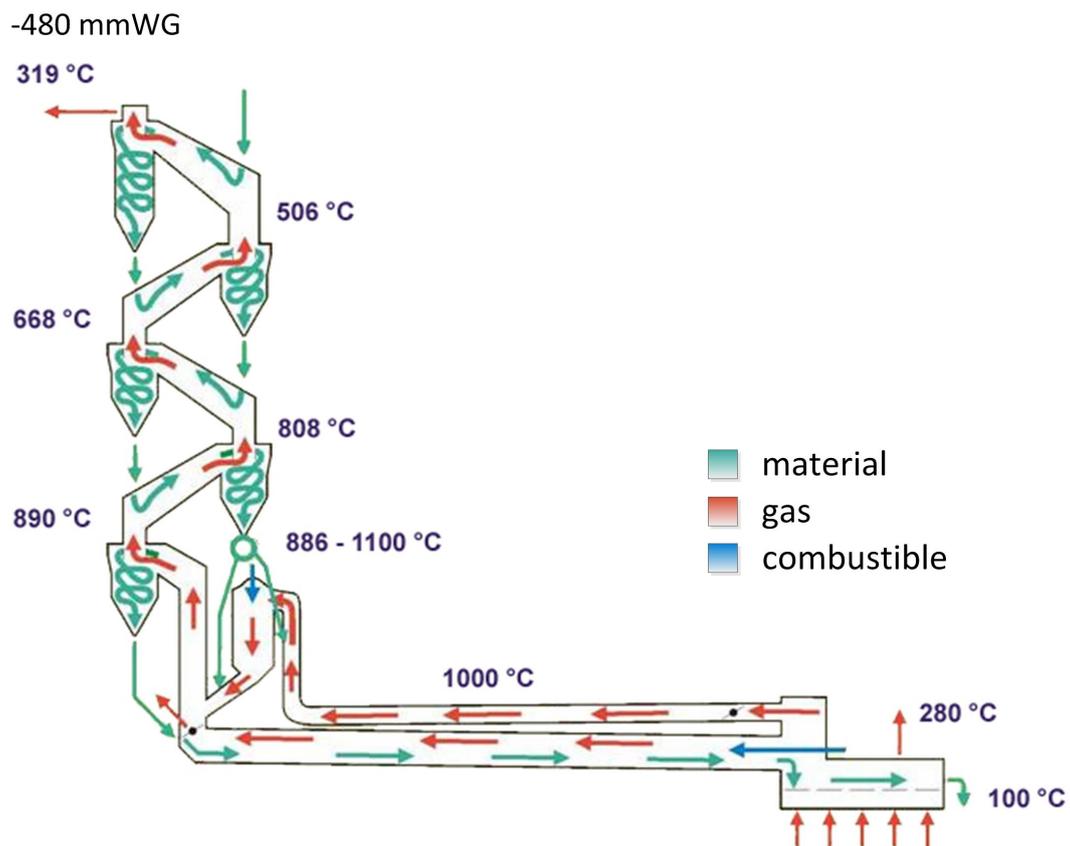
Tabla 1.2: Ahorro Energético en el Proceso de Calcinación

Tecnología en Calcinación	[Kcal/kg]
Horno de proceso húmedo con elementos internos	1400
Horno largo de proceso seco con elementos internos	1100
Precalentador de ciclones de 1 Etapa con elementos internos de horno	1000
Precalentador de ciclones de 2 Etapas sin elementos internos	900
Precalentador de ciclones de 4 Etapas sin desviación	800
Planta moderna de proceso semi-seco con precalentador y calcinador	950
Sistema moderno de precalentador/calcinador de 5 Etapas sin desviación, con enfriador planetario o tradicional de parrilla para el clinker	725
Sistema moderno de precalentador/calcinador de 5 Etapas sin desviación, con enfriador de parrilla de alta eficiencia (tercera generación)	690

Algunos de estos avances tecnológicos son presentados en la Figura 1.4 [4]. La implementación de Torres de Precalentamiento afectó drásticamente en la reducción de la longitud de los hornos consiguiendo una decarbonatización anticipada antes de que la Harina de Crudo ingrese al Horno. Diseños posteriores recuperan calor del sistema para someterlo a una recirculación y propiedades físicas del Clinker son mejoradas con enfriadores de alto rendimiento.



(a) Reducción de la longitud con Torres de Pre calentamiento



(b) Recuperación y Recirculación de Calor

Figura 1.4: Avances Tecnológicos en el Ahorro Energético

1.5. Clasificación de Cementos

Los cementos en base a Clinker se pueden clasificar en dos categorías [12] [13]:

- Cemento Portland.
- Cemento con adiciones hidráulicas o potencialmente hidráulicas.

Los Cementos Portland: Resultan de la molienda del componente principal Clinker y Yeso. Este último es usado para el fraguado. Las características dependerán principalmente de la composición química del cemento e.g. contenido de Alita (C_3S), Belita (C_2S) y Aluminato (C_3A). En base a estos tres componentes la Norma Americana ASTM C-150 clasifica los Cementos Portland en cinco tipos, los cuales son presentados en la Figura 1.5.

Cemento Portland Norma ASTM C-150	
Tipo I	Cemento Portland común, apto para toda obra que no requiera cementos con requisitos especiales.
Tipo II	Cemento Portland de moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos, con un contenido máximo de 8% de C_3A .
Tipo III	Cemento Portland de alta resistencia inicial.
Tipo IV	Cemento Portland de bajo calor de hidratación, con contenidos máximos de 35% de C_3S y 7% de C_3A .
Tipo V	Cemento Portland resistente a los sulfatos, con un contenido máximo de 5% de C_3A y la suma de $C_4AF + 2C_3A$, menor o igual a 20%.

Figura 1.5: Cemento Portland Norma ASTM C-150

Los Cementos con adiciones Hidráulicas: Resultan de la molienda del componente principal clíinker con yeso y una o más adiciones hidráulicas o potencialmente hidráulicas. En la Figura 1.6 se presenta la clasificación de los tipos de cemento con adiciones según norma americana ASTM C-595. El Comité Europeo de Normas según la norma EN 197-1, clasifica 27 tipos de cemento que son presentados en la Figura 1.7.

Norma ASTM C-595 (cementos con adiciones)			
Cemento tipo	Descripción	Escoria de alto horno	Puzolana
SM	Portland modificado con escoria de alto horno	hasta 25%	-
IS	Portland de escoria de alto horno	25 a 70%	-
PM	Portland modificado con puzolana	-	hasta 15%
IP	Portland puzolánico	-	15 a 40%
P	Portland puzolánico	-	15 a 40%

Figura 1.6: Norma ASTM C-595 (cementos con adiciones)

Norma UNE-EN 197-1:2000														
Tipo de Cemento	Designación	Notación	Clíker K	Escoria de Alto Horno S	Humo de Sílice D ⁽¹⁾	Puzolana		Cenizas Volantes calcicas		Esquistos calcinados T	Calizas		Const. minirit. adic.	
						natural P	natural calcinada Q	V	W		L	LL		
I	Cemento Portland	I	95-100										0-5	
	Cemento Portland - escoria	II/A-S	80-94	6-20										0-5
II/B-S		65-79	21-35										0-5	
II	Cemento Portland - humo de sílice	II/A-D	90-94		6-10								0-5	
	Cemento Portland - puzolana	II/A-P	80-94			6-20								0-5
		II/B-P	65-79			21-35								0-5
		II/A-Q	80-94				6-20							0-5
		II/B-Q	65-79				21-35							0-5
	Cemento Portland - ceniza volante	II/A-V	80-94						6-20					0-5
		II/B-V	65-79						21-35					0-5
		II/A-W	80-94							6-20				0-5
		II/B-W	65-79							21-35				0-5
	Cemento Portland - esquistos calcinados	II/A-T	80-94								6-20			0-5
II/B-T		65-79								21-35			0-5	
Cemento Portland - caliza	II/A-L	80-94									6-20		0-5	
	II/B-L	65-79									21-35		0-5	
	II/A-LL	80-94										6-20	0-5	
	II/B-LL	65-79										21-35	0-5	
Cemento Portland - compuestos (2)	II/A-M	80-94						6-20					0-5	
	II/B-M	65-79						21-35					0-5	
III	Cemento de alto horno	III/A	35-64	36-65									0-5	
		III/B	20-34	66-80									0-5	
		III/C	5-19	81-95									0-5	
IV	Cemento puzolánico (2)	IV/A	65-90				10-35						0-5	
		IV/B	45-64				36-55						0-5	
V	Cemento compuesto (2)	V/A	40-64	18-30				18-30					0-5	
		V/B	20-38	30-50				31-50					0-5	

Figura 1.7: Norma UNE-EN 197-1:2000

1.6. Conceptos básicos de Combustión/Incineración

La combustión es una oxidación rápida de la materia combustible con desprendimiento de calor, el calor generado permite a su vez la continuidad de la reacción. Para esto es necesario una relación adecuada entre combustible y comburente (aire). El aire es una mezcla que presenta los siguientes componentes: Nitrógeno (N_2) en un 78 %, Oxígeno (O_2) en un 21 % y Varios en un 1 %. Para efectos de cálculo en el presente trabajo se asumirá la relación de N/O_2 en 79/21 siendo esta una buena aproximación. Para la densidad se trabajara con el valor de $\rho_{aire} = 1,2928 [kg/m^3]$

El material a ser usado como combustible deberá poder reaccionar con el Oxígeno del aire, para esto es necesario que contenga C (Carbono), H (Hidrogeno) o S (Azufre). En el caso específico de los residuos sólidos, por lo general con bajo poder calorífico e inflamabilidad, la temperatura mínima recomendada para tener una combustión por combinación química entre combustible y comburente es de 850 °C.

A continuación se hará una breve descripción de las etapas que se presentan en proceso de combustión/incineración:

Temperatura ambiente hasta 300 °C: Fase de eliminación del agua y comienzo de la volatilización. Componentes cuyo punto de ebullición es inferior a 300 °C pasan de un fase solida/liquida a una gaseosa. Es en esta fase donde comienzan las reacciones de combustión.

Temperatura 300 ° hasta 1000 °C: Fase de oxidación orgánica con la formación de sulfuros SO_x y CO_2 . Hacia los 700 °C existiendo fundentes se producirán sinterizaciones. En función de las condiciones reductoras serán más notorias, provocando CO y SO_x . A partir de los 900 °C se inicia la formación de NO_x de origen térmico a partir del Nitrógeno del aire.

Temperatura a partir de los 1000 °C: Fase de volatilización de los metales pesados e.g. Cd , Ni , Zi . Con la continuidad de formación de NO_x . En este proceso se caracteriza por la reducción en volumen de los materiales usados. Materiales tóxicos quedan sino eliminados; reducidos o atrapados en la formación de otros compuestos.

1.6.1. Propiedades de los combustibles

A continuación se hará un breve resumen de las propiedades físicas que poseen los combustibles [14].

Poder Calorífico: Es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión,

referida a la unidad empleada de combustible (kg , $Kmol$, m^3) De acuerdo a como se expresa el estado del agua en los productos de reacción se puede dividir en :

- Poder Calorífico Superior (PCS): Expresa la cantidad de calor que se desprende en la reacción completa de la unidad de combustible con el agua de los humos en forma líquida a $0\text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm .
- Poder Calorífico Inferior (PCI): Expresa la cantidad de calor que se desprende en la reacción completa de la unidad de combustible con el agua de los humos en estado de vapor.

Límite de inflamabilidad: Esta propiedad es característica a los combustibles gaseosos y establece la proporción de gas y aire necesaria para que se produzca la combustión, indicando un límite superior y uno inferior. Ejemplo: PROPANO Límite inferior: $2,4\%$ y Límite superior: $9,5\%$

Punto de inflamación: Temperatura mínima necesaria para iniciar la reacción entre combustible y comburente.

Temperatura de combustión: Temperatura alcanzada en la combustión “llama máxima”

1.7. Tipos de Combustibles

Los combustibles tradicionales o primarios son:

- Sólidos: Carbón, Coque de Petróleo
- Líquidos: Petróleo y sus derivados i.e. Combustóleo
- Gaseosos: Gas Natural (GN), Gas Licuado de Petróleo (GLP)

Todos aquellos combustibles que no son tradicionales se consideran como alternativos.

Combustibles Secundarios:

- Residuos/Desechos sólidos, líquidos o gaseosos
- Coque, Carbón Vegetal, Alcoholes, Aceites de nafta y Benzol.

En la Figura 1.8 se presenta las ventajas y desventajas del uso de los combustibles así como sus poderes caloríficos [4]



Figura 1.8: Combustibles Primarios Ventajas/Desventajas

1.7.1. Gas Natural - GN

El combustible más utilizados en la industria del cemento, en la región, es el Gas Natural. Es considerado como el más limpio dentro de los combustibles fósiles, y al estar en estado gaseoso favorece la mezcla con el aire facilitando la combustión. La denominación de más limpio se basa en la relación Hidrógeno/Carbono que es mayor que en el resto de combustibles con la consiguiente reducción de CO_2 de hasta un 50 % como se muestra en la Figura 1.9 [15] [16].

- Gas natural (Metano): $H/C = 4/1 = 4$
- Petróleo (Decano): $H/C = 22/10 = 2,2$
- Carbón (Coroneno): $H/C = 12/24 = 0,5$

Los principales componentes del GN son:

- Metano $\rightarrow CH_4$
- Etano $\rightarrow C_2H_5$

Los hidrocarburos:

- Propano $\rightarrow C_3H_8$
- Butano $\rightarrow C_4H_{10}$
- Pentano $\rightarrow C_5H_{12}$
- Hexano $\rightarrow C_6H_{14}$

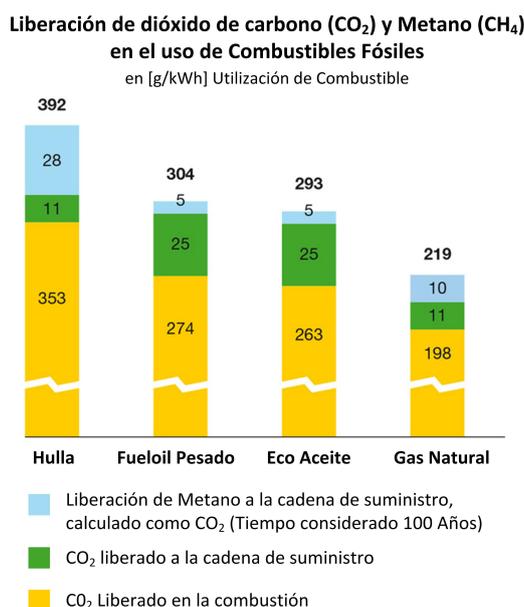


Figura 1.9: Liberación de CO₂ - GN vs Otros Combustibles

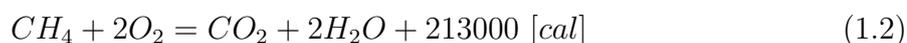
están presentes en menor cantidad. Cuando Pentano y Hexano estén presentes se denominara como GN mojado.

Los hidrocarburos pesados serán normalmente denominados como normal (n) i.e. n-Butano mientras que el resto se denominara como i-Butan. En ambos casos la formula química es la misma, el prefijo iso simplemente hace referencia que el orden de las moléculas es diferente. En el GN natural puede también encontrarse azufre en forma de sulfuro de hidrogeno H_2S , en un 10% pueden también ser encontrados gases inertes como dióxido de carbono CO_2 , Nitrógeno N_2 y Helio He . El poder calorífico del GN está entre 8000 - 10000 $kcal/m^3$ [17].

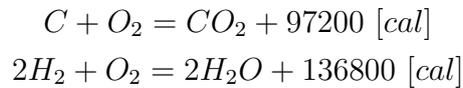
Poder Calorífico

El poder calorífico de un compuesto es la suma de sus poderes caloríficos individuales. En caso de que el combustible este en forma de un compuesto químico el poder calorífico será la suma de sus compuestos individuales menos la energía térmica necesaria para la disociación de las moléculas del compuesto.

Para el GN se requiere aproximadamente un 9% del poder calorífico total como energía térmica para la disociación de Hidrogeno y Carbono en las moléculas de hidrocarburos. El poder calorífico del Metano será [17]:



Sin embargo si C y H_2 son quemados por separado se obtiene:



Haciendo un total de 23400 cal. De acuerdo con la ley de Hess la separación de una molécula de Metano requerirá:



Obteniéndose: $234000 - 20900 = 213100 \text{ [cal]}$

Lo cual es casi similar al valor obtenido cuando se quema Metano en el calorímetro. Expresado en porcentaje el calor requerido para la disociación será:

$$\frac{20900 \cdot 100}{234000} = 8,93 \%$$

Este calor requerido para la disociación se manifiesta en la temperatura de la llama en el quemador que es menor entre 70 - 150 °C más baja que si se usara una llama con carbón en polvo. A continuación se desarrollará el cálculo de la combustion con GN basado en el analisis cromatografico de la Tabla 1.3.

Tabla 1.3: Análisis GN y su poder calorífico

Componente	Vol. %	BTU/cf	PCS
N_2	0,5	0	0
CO_2	0,88	0	0
CH_4	94,39	1012,3	956
C_2H_6	2,89	1773,1	51
C_3H_8	0,79	2522,8	20
$i - C_4H_{10}$	0,16	3260,5	5
$n - C_4H_{10}$	0,18	3269,5	6
$i - C_5H_{12}$	0,07	4009,3	3
$n - C_5H_{12}$	0,05	4018,3	2
C_6H_{14+}	0,09	5355,1	5
TOTAL	100		1048 <i>Btu/scf</i> 9323 <i>kcal/Nm³</i>

El medidor de gas mide el GN con vapor saturado de agua, por lo tanto es necesario restar 1,73% del volumen de gas por la presencia de agua. Resultando en $9162 \text{ kcal}/\text{Nm}^3$. El GN de la Tabla 1.3 tiene la siguiente composición por peso:

Tabla 1.4: GN Relación Volumen y Peso

Componente	[l]	Equivalencia	[g]
CH_4	943,9	$\frac{943,9 \cdot 16}{22,4}$	674
C_2H_6	28,9	$\frac{28,9 \cdot 30}{22,4}$	39
C_3H_8	7,9	$\frac{7,9 \cdot 44}{22,4}$	15
C_4H_{10}	3,4	$\frac{3,4 \cdot 58}{22,4}$	9
C_5H_{12+}	2,1	$\frac{2,1 \cdot 72}{22,4}$	7
N_2	5,0	$\frac{5,0 \cdot 28}{22,4}$	6
CO_2	8,8	$\frac{8,8 \cdot 44}{22,4}$	17
	$1l = 1m^3$		767

Algunas veces expresado en kg, resultando en 1 kg de GN = 11945 kcal

1.7.2. Combustibles Alternativos

Lo fundamental para la conservación del medio ambiente en coexistencia con el desarrollo industrial es la búsqueda de tecnologías limpias. Citar como ejemplo a seguir la Industria Cementera Alemana, que desde 1995 se auto obliga a la reducción del consumo específico energético del combustible usado y muy ligada a esta acción la reducción de CO_2 [18]. Esta acción es lograda con la utilización de AFRs. En noviembre del año 2000 esta auto obligación se extiende a las emisiones indirectas de CO_2 relacionadas con el consumo de electricidad.

Los residuos sólidos a ser usados como AFRs se presentan de forma general como mezclas con una diversidad de componentes, y a su vez los componentes pueden presentar compo-

siones químicas complejas. Durante un proceso de combustión/incineración se pueden presentar compuestos que no han sido identificados al inicio del proceso. El tamaño del residuo sólido a ser usado como combustible juega un rol importante, una mayor superficie específica permitirá una combustión exitosa. Se debe tener presente que todas las reacciones de combustión tienen lugar entre gases y vapores.

Desde 1990 la industria del cemento en Alemania ha reducido sus emisiones de CO_2 en un 49 % llegando a 178 kg CO_2 /kg de Cemento producido. Este logro es gracias a la producción de cemento con muchos componentes así como a la amplia utilización de combustibles alternativos. El uso de los mismos se a incrementado desde un 7,4 % a un 61 %, reduciendo de forma paralela el consumo de energía en un 14 %. En el año 1995 esta industria conjuntamente con otras industrias inicia una auto obligación para la protección del medio ambiente, reduciendo el consumo energético desde 1987 hasta el 2005 en un 20 % [19].

La industria cementera de Austria en forma análoga presenta un desarrollo incremental del uso de AFRs, los mismos son presentados en la Figura 1.10 [20]

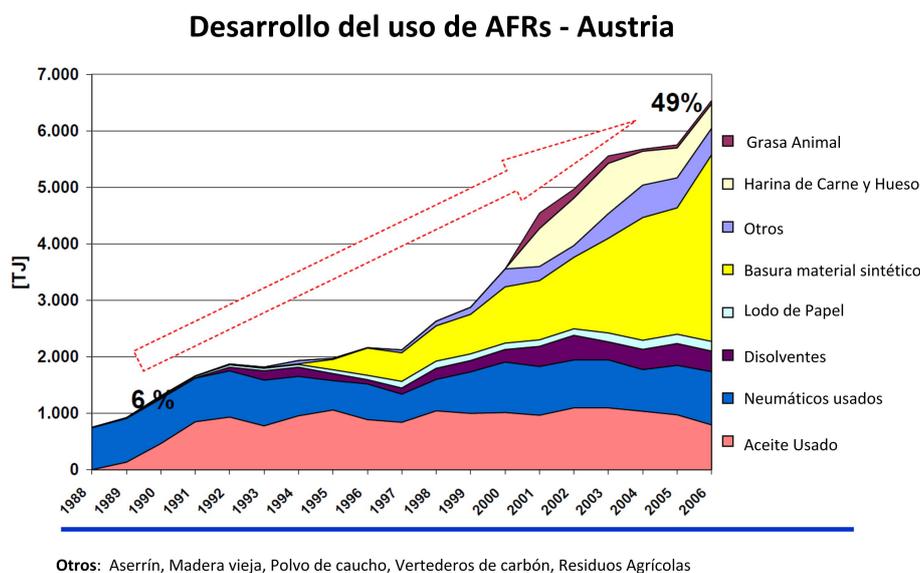


Figura 1.10: Desarrollo del uso de AFRs - Austria

A continuación se hará un breve resumen cronológico de la utilización de diversos tipos de Residuos Sólidos en la industria cementera austriaca [21].

Material sintético

En 1991 se usan por primera vez en Austria residuos sólidos de materiales sintéticos. Preguntas como el efecto que podría tener a la emisiones en la salida de aire así como el producto mismo fueron aclaras por un instituto. En la Figura 1.11 se muestra un diagrama de flujo de la preparación, reducción de material así como de las áreas de transporte,

almacenamiento y dosificación. Por lo general la alimentación del combustible secundario se lo realiza por el quemador principal. Se deberá tener todas las precauciones necesarias para evitar la quema del material antes de que este haya alcanzado el quemador.

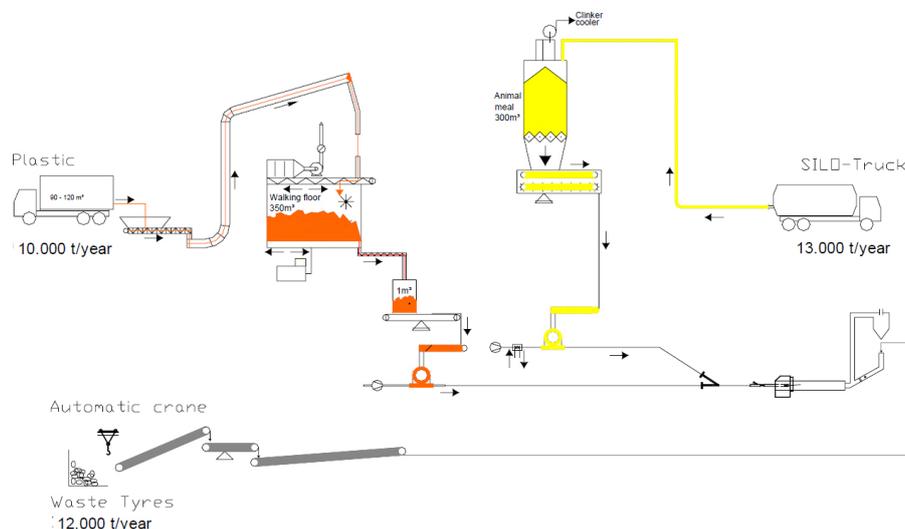


Figura 1.11: Diagrama de Flujo Incineración: Material Sintético, Harina de Carne y Hueso

Aceite Usado y Sol-disolventes

En 1987 la planta Gmuden es la primera en Austria que busca la autorización para el uso de combustibles secundarios líquidos. El uso de este material en calidades requeridas no conlleva cambios en las emisiones así como las del producto final. La alimentación y la dosificación de combustible secundario líquido se lleva a cabo de forma similar a las de un combustible líquido, vale decir por el quemador principal. Siendo una ventaja adicional que no se requiere como para el Fueloil una unidad adicional de precalentamiento para alcanzar la viscosidad necesaria para lograr una buena pulverización.

Papel Usado

Desde 1991 restos de papel son usados en la Cementera Wopfing bajo una patente registrada. El principio de funcionamiento es relativamente sencillo: la humedad remanente en el resto de papel será eliminada con los gases de salida de la torre de intercambio de calor reduciendo está a un 10-15 %. El material preparado es introducido en la cabecera de entrada del horno por medio de una esclusa. Un componente importante del proceso es la utilización de la ceniza resultante en un componente secundario en la producción del cemento. Un análisis de la ceniza mostro que componentes de relleno tienen su origen en fuentes altamente puras de Piedra Caliza y Caolín. En 1999 la utilización de restos de papel llegó a ser del orden de 38000 t/a.

Harina de Carne y Hueso

A principios de los años 2000 a raíz del problema de la Encefalopatía Espongiforme Bovina

(enfermedad de las vacas locas) debido a la aplicación de restos óseos en la preparación de alimento balanceado para el ganado vacuno, dentro la comunidad europea se generan leyes que prohíben la utilización de estos restos. A raíz de estas leyes por año quedan 80000 t/a a 100000 t/a en Austria y 700000 t/a en Alemania para ser eliminadas así como restos grasos. El proceso de calcinación debido a sus particularidades específicas e.g. altas temperaturas hasta 2000 °C, presión negativa, tiempo largo de residencia del material; se adecua de manera excepcional para la utilización de los restos anteriormente mencionados como una fuente energía. Una de las naciones con muchos años de experiencia en el uso de este material en la industria cementera es Francia. Para la provisión, almacenamiento y transporte hasta el quemador deben ser considerados los siguientes parámetros, tamaño de partícula, contenido de grasa y contenido de agua.

Ruedas Usadas

En la actualidad aproximadamente la mitad de las ruedas usadas son quemadas en Hornos cementeros. Esto pone a Austria en el primer en toda Europa. La forma típica de utilización de este material es la introducción por pieza en el ingreso del horno. En este caso el diámetro permitido es de 1,2 a 1,3 m. En algunas instalaciones se hace uso de trituradoras donde la eliminación de ruedas más grandes es posible. Mediante el uso de ruedas usadas como quema secundaria se puede por razones de procesos técnicos y dependiendo del sistema del horno ahorrar hasta un 25 % del combustible principal. El uso energético directo en un horno cementero es al momento una solución práctica desde el punto de vista ecológico y económico al problema de las ruedas usadas.

1.8. Co-Proceso en la industria del Cemento

El primer objetivo de una fábrica de cemento es el de producir y vender alta calidad de cemento. El cemento ha contribuido al bienestar de la sociedad por generaciones, contribuyendo de manera significativa a la economía de las regiones donde esté ubicada la planta de producción. La industria del cemento está en condiciones de usar combustibles alternativos y materia prima para reforzar su competitividad y al mismo tiempo contribuir a la solución a algunos problemas de la sociedad en la administración de los desechos sólidos valorizando los RS y su apoyo al medio ambiente manteniendo la calidad del cemento.

El uso de RS en la industria del cemento tiene beneficios medio ambientales como:

- Reducción del uso de combustibles fósiles (recursos no renovable).
- Reducción de emisiones de CO_2 .

- Recuperación de poder energético en los RS.
- Los constituyentes orgánicos son completamente destrozados debido a las altas temperaturas y largo tiempo de residencia y condiciones favorables de oxidación.

El Co-Proceso nace de la necesidad de la reducción de costos en el consumo energético, a esto se suma las normativas como la la Europea en el manejo de la basura que tiene una escala jerárquica que es presentada en Figura 1.12 [22]:

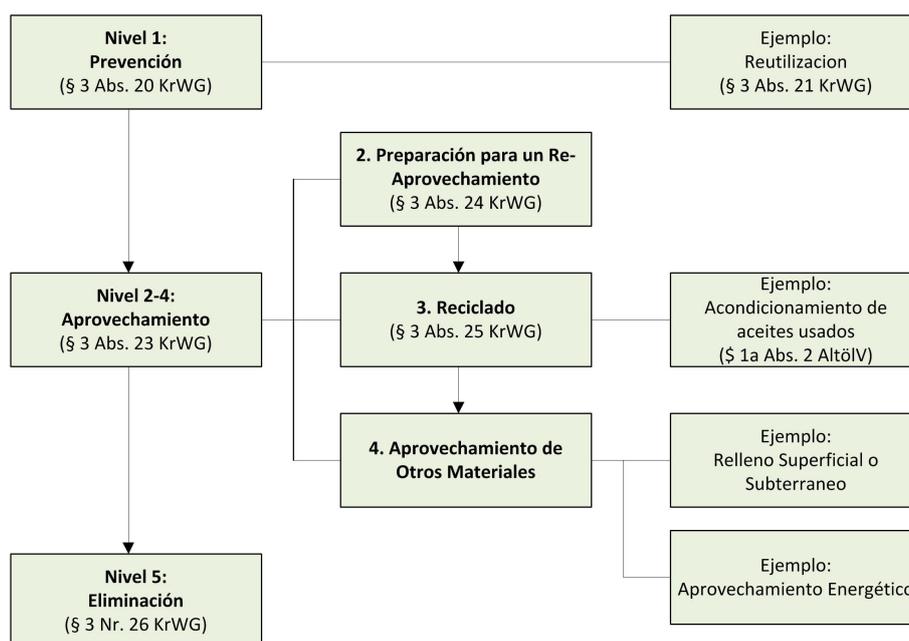


Figura 1.12: Jerarquía de Residuos Sólidos Normativa Europea

Los RS usados como combustibles alternativos en hornos cementeros podían haber sido eliminados en Rellenos Sanitarios o destruidos en incineradores con la consiguiente generación de emisiones al medio ambiente. El Co-Proceso permite el uso de estos materiales en un horno cementero reduciendo las emisiones al medio ambiente en forma esquemática lo dicho anteriormente se reduce en el Figura 1.13 [23].

En la siguiente sección se realizará el Análisis comparativo de uso de RS en un Incinerador Vs un Horno Cementero.

1.9. Escenarios comparativos en la emisión de CO_2

A continuación se cita un análisis con técnicas Life Cycle Approach (LCA) para comparar los efectos al medio ambiente cuando se procesa los residuos sólidos en un Horno de

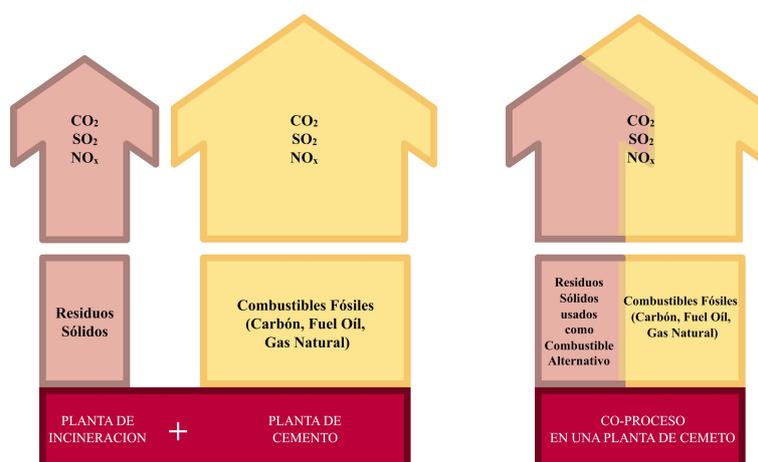


Figura 1.13: Co-Proceso en la Industria del Cemento

Cemento que cuando estos son quemados en un incinerador dedicado [24]. Los valores necesarios para el cálculo están resumidos en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5: Resumen de Datos Considerados

	Cont. de Calor	CO_2 Emitido	Planta
Biofuel	16 [GJ/t]	110 [kg/t]	
Solventes	26 [GJ/t]	70 [kg/t]	
Carbón	26 [GJ/t]	93 [kg/t]	
Explotación de Carbón		23,4 [kg/MWh]	
Transporte de Carbón		0,045 [$kg/km/t$]	
Eficiencia del Incinerador			23 %
Eficiencia de Planta			37 %

1.9.1. Escenario I: Quema de RS en Incinerador

Para el Escenario I se asumirá lo siguiente:

- 1 tonelada de RS es quemado en un incinerador dedicado
- El horno cementero utiliza Carbón como combustible primario
- La electricidad de la incineradora compensado una cantidad equivalente de electricidad producida en la planta de energía, lo que permite la planta de energía para funcionar a carga reducida.

Dos situaciones serán consideradas:

- Quema de Biofuel en un incinerador dedicado.
- Quema de residuos de solvente en un incinerador dedicado.

La carga de CO_2 emitida a la atmosfera es considerada de la siguiente manera:

- (A) Generación de CO_2 durante el proceso de explotación y transporte.
- (B) Generación de CO_2 durante la quema de carbón en el horno de cemento.
- (C) Generación de CO_2 durante la quema de RS en el incinerador.
- (D) Generación de CO_2 en la planta de poder cuando el incinerador esta en línea.

La carga total de CO_2 será: $A + B + C + D$, donde no es necesario el calculo de D.

Generación de CO_2 durante el proceso de explotación y transporte

Con un factor de emisión de 24,3 kg CO_2 /MWh en electricidad por la explotación de Carbón, 0,045 kg CO_2 /km/t para el transporte por tren con una distancia de 300 km hasta la planta cementera. Las cargas CO_2 son las siguientes:

- Escenario 1a: Emisiones de CO_2 para la explotación de 0,62 t de Carbón son 110kg, su transporte genera 9 kg haciendo un total de 119 kg.
- Escenario 1b: Emisiones para la explotación de 1 t de Carbón son 117 kg, su transporte genera 13,7 kg haciendo un total de 191 kg.

Generación de CO_2 durante el proceso de quema de Carbón en un HC

Con un factor de emisión de 93 kg CO_2 /GJ, la carga de CO_2 son las siguientes:

- Escenario 1a: La emisión de CO_2 por combustión de 0,62 t de Carbón es 1500 kg.
- Escenario 1b: La emisión de CO_2 por combustión de 1 t de Carbón es de 2418 kg.

Generación de CO_2 por la quema de RS en un Incinerador

Con un factor de emisión de 110 kg CO_2 /GJ para Biofuel y 70 kg CO_2 /GJ para el Residuo solvente, la carga de CO_2 es la siguiente:

- Escenario 1a: CO_2 emitido por la combustión de 1 t de Biofuel es de 1760 kg.
- Escenario 1b: CO_2 emitido por la combustión de 1 t residuo solvente es de 1820 kg.

Por tanto la carga total de CO_2 emitida sera:

- Escenario 1a: $119 + 1500 + 1760 + D = (3379 + D)$ kg.
- Escenario 1b: $191 + 2418 + 1820 + D = (4429 + D)$ kg.

En la Tabla 1.6 se presenta los resultados obtenidos donde se puede apreciar una reducción de en la emisión de CO_2 favorable en un horno cementero.

1.9.2. Escenario II: Quema de RS en un Horno de Cemento

Para el presente escenario se asumirá lo siguiente:

- RS serán quemados en un H.C. desplazando un equivalente térmico de Carbón.
- El incinerador no está en funcionamiento. Un monto equivalente de energía es producida en la planta de poder para explotación, transporte y combustión de Carbón.

Dos situaciones serán consideradas:

- Escenario 2a: Quema de Biofuel en el H.C.
- Escenario 2b: Quema de residuo solvente en el H.C.

La carga de emisiones de CO_2 a la atmosfera estará dada por:

- (D) Emisiones de CO_2 cuando la planta de poder opera como en el Escenario 1.
- (D) Emisiones generadas durante la quema de Carbón adicional en la planta de poder.
- (D) Emisiones generadas durante la explotación y transporte de Carbón adicional.
- (D) Emisiones generadas durante la quema de Residuos en el H.C.

La carga total de emisiones de CO_2 estara dada por: $D+E+F+G$.

CO_2 Adicional en la planta de poder

- Escenario 2a: 1 t de Biofuel generara 1030 kWh de energía eléctrica, igual a 0,39 t de Carbón en la planta de poder, resultando en una carga adicional de CO_2 de 943 kg en la planta de poder.
- Escenario 2b: 1 t de residuo solvente generara 1647 kWh de energía eléctrica, igual a 0,63 t de Carbón en la planta de poder, resultando en una carga adicional de CO_2 1523 kg en la planta de poder.

CO_2 adicional por el uso de Carbón en la planta de poder

- Escenario 2a: 1 t de Biofuel es equivalente a 0,39 t de Carbón. Emisiones de CO_2 por explotación y transporte será 69 kg y 5.3 kg respectivamente. La emisión total de CO_2 es 75 kg.
- Escenario 2b: 1 t de residuo solvente es equivalente a 0,63 t de Carbón. Emisiones de CO_2 por explotación y transporte será 110 kg y 9 kg respectivamente. La emisión total de CO_2 es 119 kg.

Emisiones de CO_2 por la quema de RS en un H.C.

Estas emisiones son idénticas a las generadas durante la combustión de residuos en un incinerador dedicado.

- Escenario 2a: CO_2 debido a la combustión de 1 t de Biofuel en un H.C. es 1760 kg.
- Escenario 2b: CO_2 debido a la combustión de 1 t de Residuo solvente en un H.C. es 1820 kg.

Por lo tanto la carga total de emisiones de CO_2 será:

- Escenario 2a: $D + 943 + 75 + 1760 = (2778 + D)$ kg
- Escenario 2b: $D + 1523 + 119 + 1820 = (3462 + D)$ kg

La carga neta de CO_2 emitida en ambos escenarios es obtenida substrayendo la carga emitida en el Escenario 2 de la carga del Escenario 1.

Los beneficios de reducción de CO_2 por la quema de RS en un H.C. comparadas con la quema en un Incinerador dedicado son presentados en la Tabla 1.6

Tabla 1.6: Resumen de Emisiones de CO_2 Incinerador Vs H.C.

	Biofuel [16GJ/t]	Residuos Disolventes[26GJ/t]
Incineracion en un Incinerador	$3379 + D$ kg CO_2	$4429 + D$ kg CO_2
Combustion en un H.C.	$2778 + D$ kg CO_2	$3462 + D$ kg CO_2
Beneficio Neto	601 kg CO_2/t	967 kg CO_2/t

Capítulo 2

Diagnóstico Situacional del Proceso de Calcinación y Residuos Sólidos

El Municipio de Sucre actualmente con sus 259 388 Habitantes [5] genera diariamente 170 t de basura [6]. Este alto volumen de materiales sólidos ya ha sobrepasado la capacidad de una “eliminación” a cielo abierto en botaderos municipales denominados “Rellenos Sanitarios” (Ver Introducción Figura 1). Sin un control y tratamiento adecuado, no exentos de costos económicos, se corre el riesgo de daños al medio ambiente (Ver Introducción Figura 2 y Figura 3). La administración de estos rellenos sanitarios está a cargo del departamento de Manejo de Residuos Sólido dependiente del Gobierno Municipal de Sucre.

La producción del cemento involucra un alto consumo energético, el proceso propio de transformación del carbonato de calcio $CaCO_3$ (Caliza) en Clinker se realiza a altas temperaturas en un promedio de 1450 °C. Para este fin se utilizan combustibles fósiles como: carbón, petróleo, Gas Natural (GN). La disponibilidad de reservas gasíferas en el país hacen que el GN sea empleado en la industria cementera nacional. Es importante mencionar que el costo interno para el sector industrial tiene una subvención de acuerdo a La Ley de Hidrocarburos. La disponibilidad, pureza como combustible, bajas emisiones de CO_2 y muy especialmente costos del GN han hecho que se entre en un especie de aletargamiento en el desarrollo de nuevas fuentes de energía, que ayuden a conservar/prolongar un recurso no renovable como el GN. Y a la fecha no se ha considerado la posibilidad de utilizar la energía calorífica que podría otorgar el co-proceso de residuos sólidos que en la actualidad está siendo ampliamente utiliza por industrias cementeras a nivel mundial con énfasis en cementeras Europeas.

2.1. Análisis de Variables

Las variables a ser consideradas pueden ser separadas en cuatro grupos:

1. Aquellas que son externas al proceso.
2. Aquellas que son inherentes al proceso de producción del cemento.
3. Aquellas que forman parte de las propiedades físicas de los materiales a ser tomados como residuos sólidos.
4. Aquellas referentes a la cantidad y disponibilidad de los residuos sólidos.

El conjunto de estas variables requiere una evaluación técnico administrativa. Factores externos como el costo del GN o internos como el tiempo de residencia de los materiales en el proceso de calcinación incluyendo aquellos materiales (mezcla/puro) a ser usados como fuente alternativa de energía que como variables que añaden al proceso son el grado

de homogeneidad e.g. tamaño de partícula, capacidad calorífica y en especial el contenido de agua tal que tenga un parecido con combustibles tradicionales. Estas variables juegan un rol muy importante ya que permite alcanzar la utilización máxima del poder calorífico. En las siguientes secciones se hará un análisis de estas variables.

2.2. Variables Externas

2.2.1. Costo del Gas Natural

El combustible primario utilizado en todas las cementeras nacionales es el Gas Natural debido a que Bolivia es productor y exportador de este combustible. A esto se suma un bajo costo del mismo comparado con otros países de la región e.g. Chile 22,4 USD/MPC y en Brasil 15,8 USD/MPC [25]. Es importante también mencionar que el costo interno para el sector industrial tiene una subvención de acuerdo a La Ley de Hidrocarburos que en su Artículo 87 indica: “En ningún caso los precios del mercado interno para el Gas Natural podrán sobrepasar el cincuenta por ciento (50 %) del precio mínimo del contrato de exportación” [26]. Para el año 2014 el precio mínimo de exportación fue de aproximadamente de 8 USD/MPC, siendo el costo actual para su comercialización 1,70 USD/MPC para la industria nacional.

2.3. Variables del Proceso

2.3.1. Consumo del GN

Una planta moderna como la mostrada en la Figura 2.1 [27] con cuatro fuentes de suministro de energía (GN, Carbón, Residuos de Aceites, Neumáticos usados) tiene dos puntos establecidos para la utilización del combustible primario: **Quemador Principal** y **Quemador en el Calcinador**. La relación de consumo en promedio es de 40 % y 60 % respectivamente [28].

El consumo de GN será determinado para los siguientes escenarios de producción de clinker:

- Una línea de producción de 2000 tdc
- Una línea de producción de 760 tdc

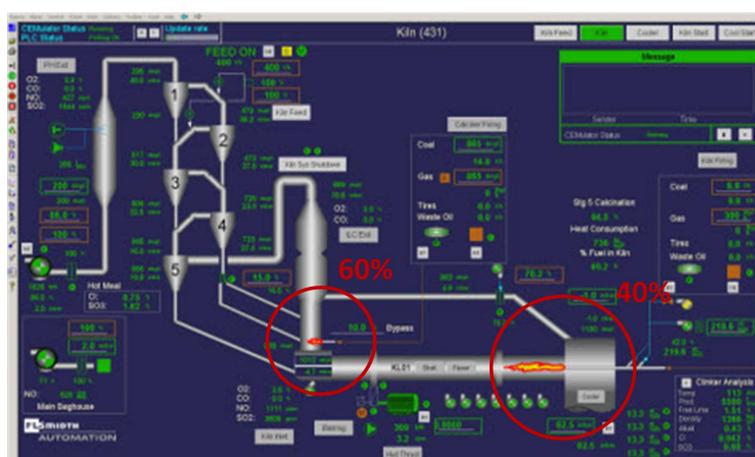


Figura 2.1: Puntos de Consumo de GN

En la Tabla 2.1 se presenta un consumo anual representativo de una planta de 2000 tdc, en forma gráfica los mismos están mostrados en la Figura 2.2. Los valores muestran el consumo referencial de 60% Quemador Principal y 40% Quemador en el Calcinador situación inversa a la teórica .

Tabla 2.1: Consumo Referencial de G.N. en $[Nm^3/h]$ para 2000 tdc

Mes	Quemador Principal	Quemador Calcinador
Gestión 2014		
Abril	3187042	2232693
Mayo	3353989	2349809
Junio	1768520	1089289
Julio	2655911	1671428
Agosto	3394927	2383205
Septiembre	3278890	2264184
Octubre	2352449	1503473
Noviembre	3148444	2083266
Diciembre	3336925	2197041
Gestión 2015		
Enero	2711595	1571395
Febrero	1425713	885851
Marzo	1953201	1157120
TOTAL	32567606	21388754

Para un horno con una producción de 760 tdc, se tiene que una relación de 60/40 de

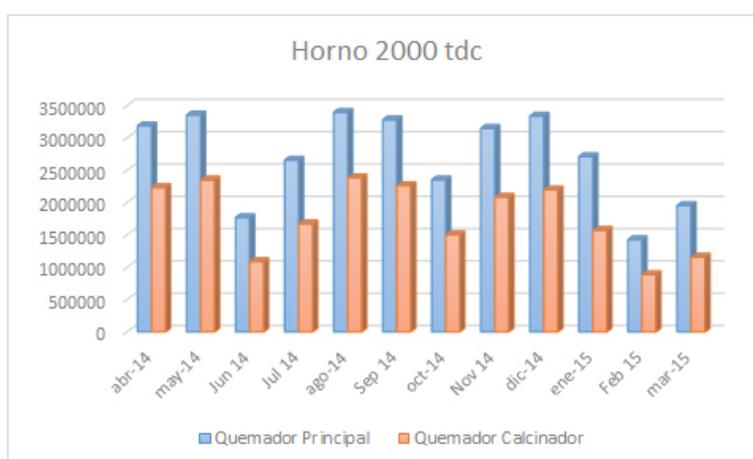


Figura 2.2: Consumo Referencial de G.N. en $[Nm^3/h]$ para 2000 tdc

consumo de GN ya no es válida, tendiendo a ser esta próxima a 50/50. En la Tabla 2.2 se presenta un consumo anual representativo de una planta de 760 tdc, en forma gráfica los mismos están mostrados en la Figura 2.3.

Tabla 2.2: Consumo Referencial de GN en $[Nm^3/h]$ para 760 tdc

Mes	Quemador Principal	Quemador Calcinador
Gestión 2014		
Abril	795222	844051
Mayo	499639	417458
Junio	529237	393304
Julio	463682	383666
Agosto	877325	868987
Septiembre	967630	973949
Octubre	799170	803502
Noviembre	897285	832602
Diciembre	541673	514375
Gestión 2015		
Enero	963435	805545
Febrero	717970	752786
Marzo	434039	429960
TOTAL	8486307	8020185

En líneas generales un consumo referencial de una línea de producción de 2000 tdc está por el orden de 7400 $[Nm^3/h]$, equivalentes a 4600 $[Nm^3/h]$ en el Quemador Principal

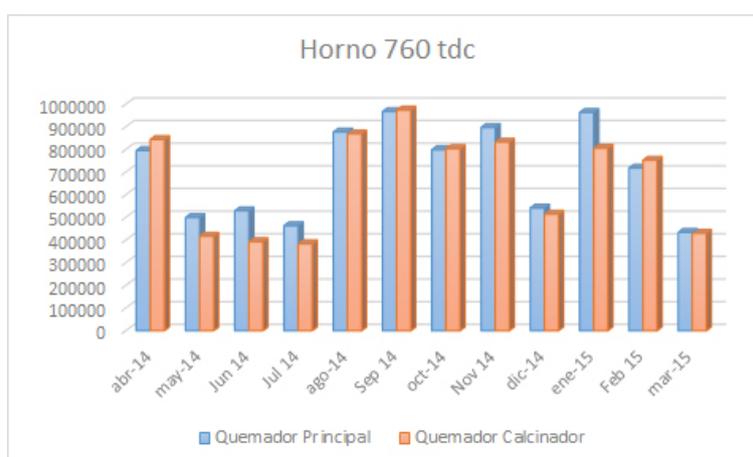


Figura 2.3: Consumo Referencial de G.N. en $[Nm^3/h]$ para 760 tdc

y 2800 $[Nm^3/h]$ en el Quemador del Calcinador. Para una línea de producción de 760 $[Nm^3/h]$ está por el orden de 2900 $[Nm^3/h]$, equivalentes a 1400 $[Nm^3/h]$ en el Quemador Principal y 1500 $[Nm^3/h]$ en el Quemador del Calcinador. De la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 se tiene un consumo anual para una producción de 2000 tdc de 53 956 360 $[Nm^3]$ y para una producción de 760 tdc se tiene un consumo anual de 16 506 492 $[Nm^3]$.

2.3.2. Temperatura y Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia es considerado como el lapso de tiempo que requiere la harina de crudo desde su ingreso en el cabezal de entrada del horno rotatorio hasta su salida en el cabezal de salida del mismo. Es en este tiempo que la materia prima, la harina de crudo, llega a transformarse en Clinker. Parámetros tales como longitud del horno, velocidad de rotación influyen que tan rápido se mueve el material desde su ingreso hasta su salida. Por otro lado las temperaturas de operación para la transformación de la Harina de Crudo son elevadas y que se distribuyen en tiempo y espacio (longitud) dentro del horno.

Temperatura y Tiempo de residencia juegan un rol importante en la combustión de materiales que puedan ser usados como combustibles secundarios. En la Figura 2.4 tres posibles puntos son considerados como los más favorables para el ingreso de materiales con un aporte energético i.e. sustitución de GN.

En la Figura 2.5 se presenta las curvas de temperatura del Fluido Gaseoso así como de las temperaturas que llega a alcanzar el material (Harina de Crudo) hasta lograr su transformación en Clinker. Se presentan también los tiempos de residencia de ambos flujos, se debe tener presente que estos flujos son en dirección opuesta entre sí. Las altas temperaturas de operación garantizan que aun los compuestos orgánicos más estables

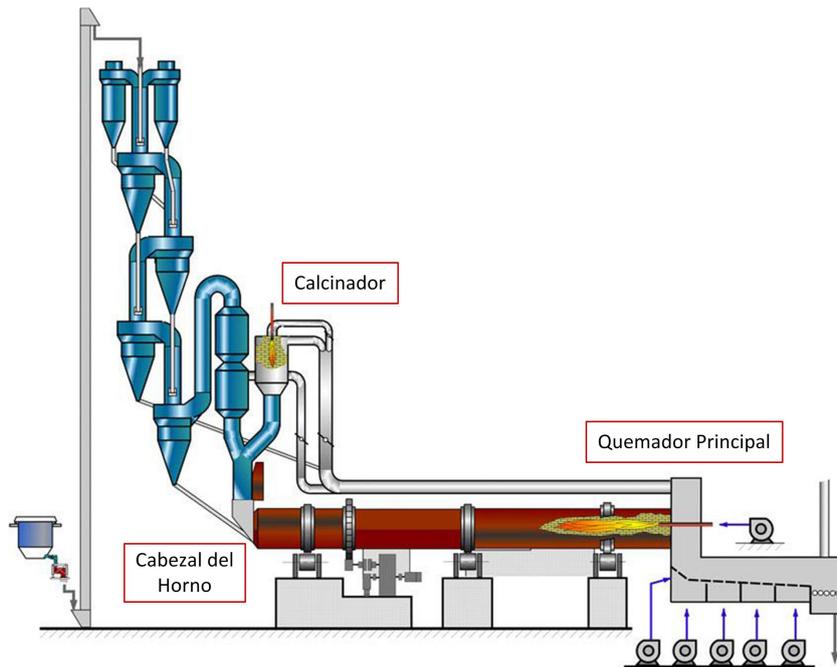


Figura 2.4: Puntos de Alimentación Considerados

serán eliminados [29]. Esto también es posible gracias a los tiempos de residencia del material en el proceso.

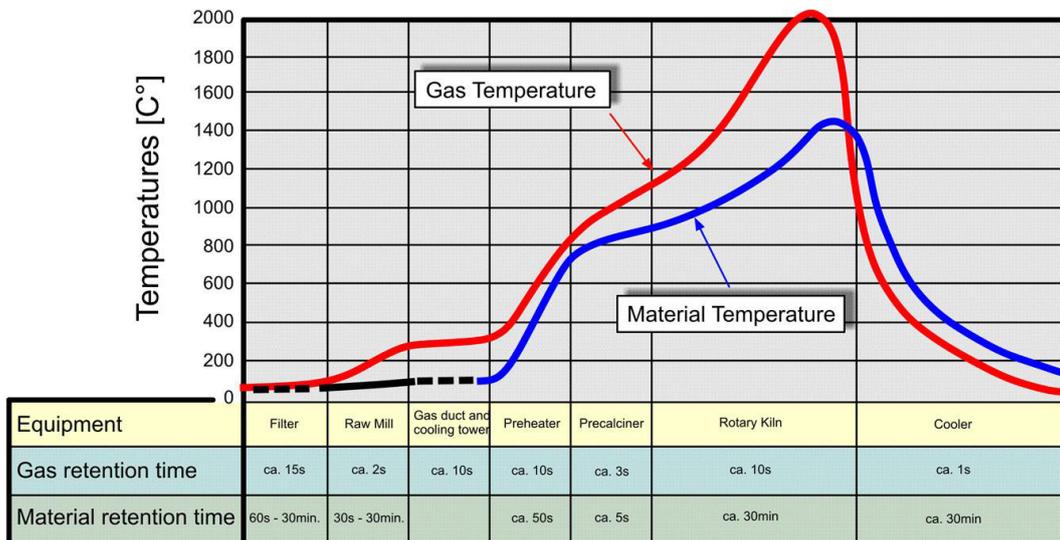


Figura 2.5: Temperaturas y Tiempos de Residencia Proceso de Calcinación

El tiempo de residencia del fluido gaseoso y del *material* en el proceso permitirá tener un parámetro de partida del tiempo disponible para lograr un aprovechamiento energético del AFRs.

En la Tabla 2.3 se presentan valores referenciales ¹ estos variarán de una planta cementera a otra [30].

Tabla 2.3: Temperaturas & Tiempos de Residencia

	Precalentador	Calcinador	Horno	Enfriador
TFG [°C]	350-880	880-1100	1100-1200	1100-Ta
TRFG [s]	≈ 5-10	≈ 3-4	≈ 5-10	≈1
TM [°C]	100-780	780-900	900-1450	1400-100
TRM [s]	≈ 50	≈ 5	15-30 min	30 min

2.3.3. Granulometría del Material

La liberación del poder calorífico de los residuos sólidos en cualquiera de los tres posibles puntos de ingreso dependerá de su granulometría. Si bien el punto tres considerado en la Sección 2.3.2 permite el ingreso de volúmenes grandes por sus características: cabezal de ingreso al horno y un largo tiempo de residencia del material, para los otros dos puntos la granulometría del material debe ser considerada con mucha atención. En la Figura 2.6 se presenta la granulometría recomendada para alimentación de AFRs en el Quemador Principal y Quemador Calcinador.



Figura 2.6: Granulometría recomendada de los Residuos Sólidos

¹TFG=Temperatura Fluido Gaseoso, TRFG=Tiempo de Residencia Fluido Gaseoso, TM=Temperatura Material y TRM=Tiempo de Residencia Material

2.4. Variables Cuantitativas y Cualitativas de las AFRs

2.4.1. Residuos Sólidos en el Municipio de Sucre

El suministro de AFRs debe ser constante, garantizando la fuente energética. Para esto es necesario conocer la cantidad y los componentes de los residuos sólidos orgánicos e inorgánicos e.g. plásticos, papel, cartón, neumáticos usados, etc. que se generan en el Municipio de Sucre. Para esto se hará referencia a datos estadísticos de la Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre (EMAS).

En el presente trabajo serán considerados materiales inorgánicos que puedan ser usados en el proceso de la combustión. En la Tabla 2.4 se presenta una valorización Económica-Medioambiental-Social de los RS.

Tabla 2.4: Valorización Económica-Medioambiental-Social de AFRs

N	Económico	Medioambiental	Social
1	Grasa Animal Harina de Huesos	Residuos de Madera	Residuos de Madera
2	Plásticos	Grasa Animal Harina de Huesos	CRD
3	Residuos de Madera	CRD	Grasa Animal Harina de Huesos
4	CRD	Neumáticos, Plásticos	Neumáticos, Plásticos
5	Alfombras/Textiles		

2.4.2. Poder Calorífico de Materiales

La cantidad de energía que puede liberar un material en la reacción química de oxidación permitirá determinar la cantidad de combustible primario que puede ser reemplazado, valores altos involucran menor volumen requerido en la sustitución con alta reducción de los costos energéticos y de disposición de residuos sólidos. Por lo general se trabajará con un combustible heterogéneo que alcance poderes caloríficos óptimos para ser utilizados en proceso de combustión. En la Tabla 2.5 se presenta los poderes caloríficos individuales de diversos materiales conocidos [29].

Tabla 2.5: Valor Calorífico Neto de AFRs

Combustible	Valor Calorífico Neto [MJ/kg]
Polietileno	46
Fuel oil ligero / Diesel (para comparación)	42
Fuelóleo pesado	40
Alquitrán	38
Grasa de animal	37
Caucho	36
Aceites usados, Residuos de refinería	30 a 40
Petcoke	33
Neumáticos Usados	28 a 32
El carbón bituminoso	27
Líquido de sustitución Combustible	20 a 30
Plástico triturado	18 a 22
El gas de vertedero	16 a 20 (por Nm^3)
Harinas animales	18
La madera seca, la cáscara de arroz	16
Aserrín impregnado	10 a 13
Lodos de depuradora secos	10
Residuos domésticos sin clasificar	8,5

2.5. Residuos Sólidos en el Municipio de Sucre

La Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre (EMAS) es la empresa encargada del recojo y eliminación de la basura en el Mancipo de Sucre es EMAS. La cuantificación y clasificación de R.S. se detallará en las siguientes secciones en base a información proporcionada por esta empresa.

2.5.1. Generación de RS

En la gestión 2014 con una población demográfica de 267440 Habitantes, se genero alrededor de 160463,82 kg/día (aprox. 160 t/d) con una cobertura de recogo de RS del 87%. La distribución por grupos generadores es presentado en la Tabla 2.6. La proyección para el año 2020 es de 198 t/d con un crecimiento poblacional de 3,7%.

Tabla 2.6: Fuentes de Generación de RS

Grupos de Generación	%	t/d
Domiciliario	77	123,56
Empresas (Grande, Mediana, Pequeña)	13	20,86
Mercados	7	11,23
Residuos Hospitalarios	3	4,81
TOTAL	100	160,46

2.5.2. Composición de los RS

La segregación de los RS en materia orgánica e inorgánica permitirá determinar las cantidades posibles a usar como recurso energético, siendo de importancia para el presente estudio los materiales inorgánicos. La composición de R.S. es presentada en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Composición Física de los RS

Grupos de Generación	[%]
Materia Orgánica	48
Plásticos	15
Papel y Cartón	14
Metales y Tóxicos	3
Vidrios	4
Otros	16
TOTAL	100

2.5.3. Costos de los RS

Los materiales presentes en los RS tienen un doble valor: energético y económico. Desde el punto de vista económico algunos materiales como los plásticos o papel pueden ser reciclados y ser reutilizados en industrias que requieran de esta materia prima. El costo por kg es presentado en la Tabla 2.8

La cantidad representativa en t/d y su valor aproximado por día es presentada en la Tabla 2.9. Al no disponerse de datos específicos de segregación en porcentaje de los cuatro tipos de plásticos presentado se asumirá el menor valor. En metales si bien se tiene listado al

Tabla 2.8: Costo de Reciclaje por tipo de RS

Materiales Segregados	[Bs/kg]
Plástico Blando	2,10
Plástico Duro	1,20
Nylon	2,10
Botellas PET	1,30
Aluminio	5,50
Papel	1,30

Aluminio, y es un material usado en la industria del cemento no se puede realizar una relación directa de costo y cantidad.

Tabla 2.9: Valor Recuperado Aproximado de RS

Material	[%]	[kg/d]	[Bs/kg]	[USD/d]
Materia Orgánica	48	77022,63		
Plásticos	15	24069,57	1,3	4495,75
Papel y Cartón	14	22464,93	1,3	4196,04
Metales y Tóxicos	3	4813,91		
Vidrios	4	6418,55		
Otros	16	25674,21		
Total	100	160463,82		8691,79

2.5.4. Residuos Sólidos Mayores y Tóxicos

Por residuos sólidos se entenderá los neumáticos usados tanto de unidades pequeñas así como de transporte pesado. A la fecha no se dispone de datos estadísticos de cantidades de este material depositados por día en los botaderos municipales. Un aprovechamiento energético de este material no se está realizando en la actualidad, pero si usos alternativos que no involucren su destrucción o reciclaje para recuperar materias primas usadas en su producción.

El tratamiento de residuos líquidos provenientes de cambio de aceite en unidades de transporte así como aceite usado en la gastronomía tiene un tratamiento especial para su deposición en el botadero municipal de Sucre. La cantidad aproximada de aceites

recolectados oscila por las 2 t/mes.

En los últimos años la Aduana Nacional ha intensificado su labor de control del contrabando registrándose confiscación de sólidos y líquidos que deben ser eliminados. En la actualidad el procedimiento a seguir es la destrucción y posterior deposición en los botaderos e.g. procedimiento que se aplica a licores si un aprovechamiento energético del fluido.

2.6. Resumen del Diagnóstico Situacional

De cara a los resultados del estudio que demostraron que la sustitución de 20% de GN permite el Co-Proceso de 42,6 t/d de RS generando un valor aproximado de energía de 20 MW para una producción de 2760 tdc. Se concluye que la utilización de los residuos sólidos generados en el Municipio de Sucre que cada vez son mayores por el crecimiento demográfico de la población puede ser muy bien utilizados en el Co-Proceso del cemento en FANCESA

La generación de RS, cada vez más con mayores valores energéticos residuales o en el mejor de los casos reciclables genera la problemática de la administración de los mismos, esto conlleva a un desafío tecnológico que ayude a sacar rédito de los mismos así como un cuidado del medio Ambiente.

Continuar con una eliminación de RS en Botaderos Municipales sin un aprovechamiento energético de los mismos, con los riesgos medioambientales de contaminación de tierra/venas hidrológicas por lixiviados y el no aprovechamiento de infraestructura (planta cementera) para la eliminación de los mismos es un escenario que el Municipio de Sucre debe superar. El Co-Proceso de RS en la industria cementera es una opción para la eliminación de los mismos en el Municipio de Sucre. Donde no solo factores medioambientales juegan un rol importante, también y en gran medida factores económicos y tecnológicos que aportarían al desarrollo sostenible del Municipio de Sucre.

Capítulo 3

Propuesta para el Co-Proceso en la Cementerera Local

3.1. Análisis Técnico Económico

La corriente tecnológica en la industria cementera basada en la utilización de la materia prima Carbonato de Calcio se basa en la reducción de consumos energéticos que involucran directamente gastos económicos y la protección del medio ambiente desde dos puntos de vista: el uso racional y optimizado de los recursos naturales y la reducción de efectos al medio ambiente por la emisión de CO_2 . Esta protección al medio ambiente está regulada con normativas muy estrictas a nivel internacional y apoyada con la emisión de Certificados de CO_2 (Bonos de Carbón) que ya tiene una función a nivel Global.

En el presente capítulo se analizará las posibilidades técnicas actuales de la cementera local así como los costos y gastos inmersos en la implementación del Co-Proceso.

3.2. Análisis Técnico

El Co-Proceso en uno de sus sentidos es la utilización de RS como fuente energética, En una línea de producción de cemento esto solo es posible en la sección Calcinación que es donde se produce el consumo de GN necesario para llegar a las altas temperaturas que se requiere para transformar la materia prima en Clinker, componente principal en la producción del cemento.

El análisis se basará en el siguiente escenario de producción de Clinker: Un horno rotatorio, dos torres de precalentamiento DOPOL (Polysius) y SLC (FLSmidth). Capacidad de producción nominal de la línea 2000 tdc. En la Figura 3.1 se presenta la distribución física de un horno con estas características. Una distribución esquemática de la línea de producción es presentada en la Figura 3.2.

En esta pueden ser identificados cuatro posibles puntos para el ingreso de AFRs.

Línea DOPOL

1. Quemador principal
2. Ingreso Horno Rotatorio

Línea SLC

3. Ducto Aire Terciario
4. Calcinador



Figura 3.1: Horno Rotatorio - Torre DOPOL y SLC

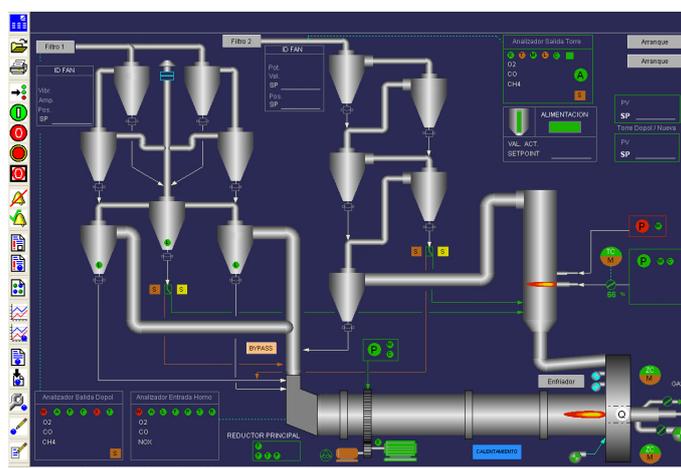


Figura 3.2: Flujograma Horno Rotatorio - Torre DOPOL y SLC

Dadas las características actuales del Quemador Principal la posibilidad de uso de AFRs por este medio queda descartada. Ante ese escenario quedan solo dos posibles puntos de ingreso de AFRs: antes del calcinador a través de modificaciones en el ducto terciario o en el calcinador que implicaría modificaciones físicas del mismo.

3.2.1. Pruebas de Laboratorio

La disponibilidad de equipos permitió hacer realizar pruebas en dos niveles de temperatura. La primera llegar a temperaturas hasta los 350 °C, que son aquellas que comúnmente son alcanzadas cuando se somete a un sólido a combustión e.g. cartón, madera, papel. La segunda temperaturas de operación del sistema de calcinación en las zonas en las que se ofrecen como las más favorables que están por el orden de los 900 °C. Para lograr estas

temperaturas se trabajó inicialmente con un Quemador Bunsen que nos permite someter al material a un proceso de combustión, con la característica que al material no se aplica llama directa sino que por medio de transferencia de calor se logra que este inicie una auto-ignición como se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Pruebas de Combustión a 350 °C con Quemador Bunsen

Debe recordarse AFRs se presentan como un compuesto heterogéneo, con componentes que no tienen el mismo punto de ignición. Esto genera residuos sólidos que requieren aun mayor temperatura para poder liberar su poder calorífico lo cual no es posible con un quemador Bunsen.



Figura 3.4: Pruebas de Combustión a 900 °C con Horno de Inducción

Esta limitante fue subsanada en un horno de inducción de laboratorio (temperatura máxima alcanzable 1500 °C). La muestra se la preparo para hacer el análisis de someter el material a una temperatura de 900 °C y medir la ceniza y coloración resultante como se muestra en la Figura 3.4.

Durante el Co-Proceso no se debe olvidar el objetivo principal de una cementera que es el de producir cemento garantizando estándares de calidad y características físicas que asocien estos estándares. Una vez que un producto ha alcanzado la confianza del



Figura 3.5: Pruebas de Combustión a 1500 °C con Horno de Inducción

cliente, este asocia las características físicas a un grado de calidad que está acostumbrado a recibir. En el presente trabajo se realizó pruebas de variación de coloración en función a la relación de AFRs y Harina de Crudo. En la Figura 3.6 puede verse altas y bajas concentraciones AFR con sus remantes solidos e.i. cenizas influyen en la coloración del cemento, la variación de coloración puede afectar en la percepción de calidad que tiene el cliente. Por otra parte no puede generalizarse los valores iniciales, relación AFRs/Harina de Crudo, así como resultados finales de la prueba a otro tipo de AFRs.



Figura 3.6: Coloración del Cemento vs Concentración AFRs

Al tratarse solo de pruebas iniciales con bajas cantidades de AFR no se llegó a realizar cromatografías y menos aún pruebas cristalográficas (equipo no disponible en cementeras nacionales) del producto final.

3.2.2. Preparación Granulométrica de los RS

Un factor importante es lograr que los materiales a ser usados como AFR liberen todo su poder calorífico en los puntos de introducción al sistema dejando como único residuo cenizas las cuales ya no pueden ser combustionadas. Este residuo en un porcentaje será captado en filtros o saldrán con el producto final. Por lo tanto se debe evitar residuos

sólidos no combustionados circulando en el sistema que puedan ocasionar obstrucciones. Esto solo puede ser logrado si la granulometría de los AFRs está por debajo de los 30 mm. Esto por argumentos explicados en la Sección 2.3.3 y por las recomendaciones realizadas por VECOPLAN. En el presente trabajo se tuvo AFRs con dimensiones de partida de 600 x 800 x 900 mm, 20 x 55 x 85 mm valores que están por encima del límite recomendado (Ver Figura 3.7).



Figura 3.7: Recepción de AFRs

Para poder reducir el material dentro del rango permitido se procedió al diseño y construcción de una trituradora apta para materiales blandos e.g. papel, cartón y cajas de envases. La trituradora es mostrada en la Figura 3.7, consta de los siguientes componentes básicos:

- Una tolva de recepción de materiales.
- Cuchillas trituradoras.
- Motor eléctrico de accionamiento 3-Fases.
- Tolva de recepción material triturado.
- Ducto de salida para ingreso al Sistema.

En las Figura 3.10 y se muestra la construcción e implementación provisoria y experimental de la trituradora.

3.2.3. Pruebas de Ingreso de RS

El sistema de calcinación en el presente trabajo permite el ingreso sin ninguna modificación al equipo original en solo dos secciones las cuales las iremos analizando a continuación.

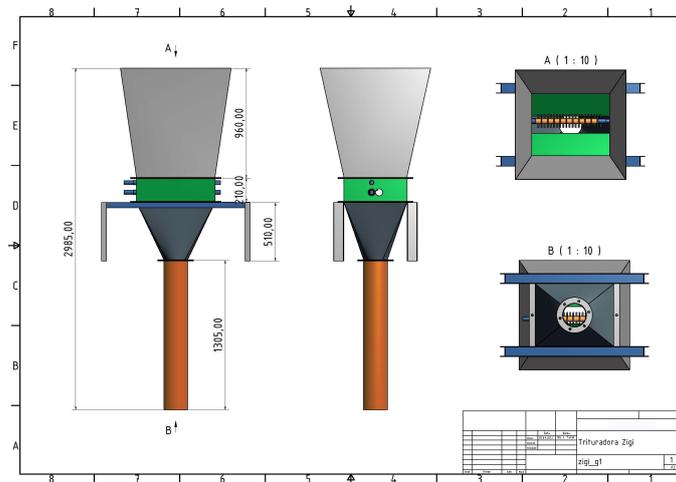


Figura 3.8: Plano de Diseño de la Trituradora

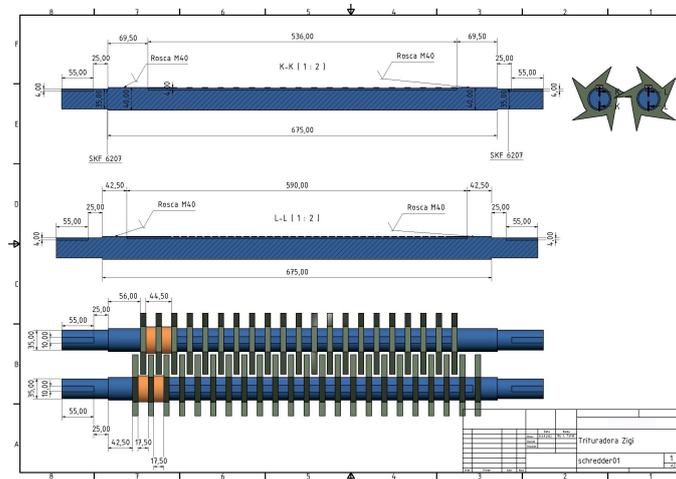


Figura 3.9: Diseño de las Cuchillas de Corte

Cabezal de Salida del Horno

En el cabezal de salida del horno es donde se tiene el producto final de la calcinación: el Clinker. En esta zona nos encontramos por detrás de la llama generada por el Quemador Principal, las condiciones para el ingreso del material permite la introducción del orden de 300 x 300 x 500 mm, subdividió en elementos de 300 x 300 x 100 mm como se muestra en la Figura 3.12.

Las temperaturas de ingreso en esta sección llegan a un máximo de 1350 °C, si bien esta temperatura permite la auto ignición del material este cae rápidamente a las parrillas de enfriamiento donde la temperatura es rápidamente reducida a los 200 °C para fijar la formación de Belita (favorable en el Cemento) y evitar la formación de Alita que en procesos posteriores incrementa el consumo de energía en la molienda.



Figura 3.10: Trituradora de Materiales Blandos



Figura 3.11: Cuchillas - Trituradora de Materiales Blandos

En la Figura 3.13 puede apreciarse como estos materiales caen por la acción de la gravedad a las parrillas de enfriamiento, el naranja intenso muestra los bloques de AFRs en el proceso de combustión. Las parrillas tienen un movimiento translatorio oscilatorio longitudinal sometido a corrientes de aire transversales a su movimiento con el objetivo de bajar rápidamente la temperatura del Clinker. En situaciones extraordinarias se tiene previsto chorros de agua para coadyuvar a lograr este objetivo. Debido a estas medidas de reducción de la temperatura, AFRs introducidos por este ingreso no son combustiónados totalmente quedando residuos sólidos de tamaño considerable. Bajo este escenario el producto final se ve drásticamente afectado al presentar residuos sólidos y en cantidades más allá de cenizas resultantes si la misma cantidad de AFRs hubiera sido completamente combustiónado. Otra de las desventajas que se presenta es la no liberación total del poder calorífico, oxidación total de material, por lo tanto el aporte energético es casi nulo.



Figura 3.12: Ingreso de AFRs Cabezal de Salida

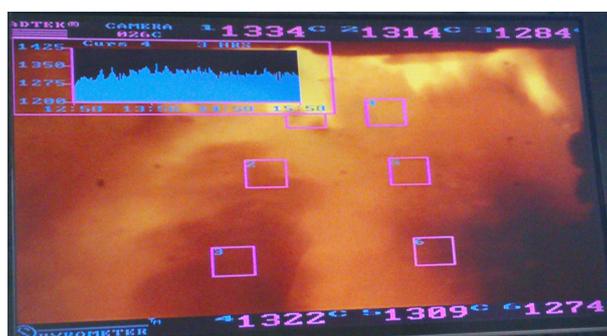


Figura 3.13: Ingreso AFR Cabezal de Salida

Ducto de Aire Terciario

El ducto Terciario reingresa gases calientes en el sistema provenientes del Cabezal de Salida del Horno, vale decir gases calientes por detrás de la llama principal. La temperatura de circulación de dichos gases bordea los 900 °C. Estos gases calientes cruzan el Calcinador donde a la temperatura que poseen se suma la temperatura de la combustión del GN que se produce en el Calcinador. En la Figura 3.14 se muestra de forma esquemática el flujo de los gases calientes, así como el punto de ingreso de AFRs sin modificaciones al sistema original.

Con base en los análisis de combustión, en los cuales se determinó temperaturas de auto ignición de 350 °C y combustión completa de los residuos remanentes a temperaturas superiores a esta, el punto de ingreso por el Ducto de Aire Terciario se ve como el punto de ingreso de AFRs más favorable. El tamaño de los AFRs no debe exceder los 30 mm, al entrar en contacto con los gases calientes a 900 °C se procede a una auto ignición y al

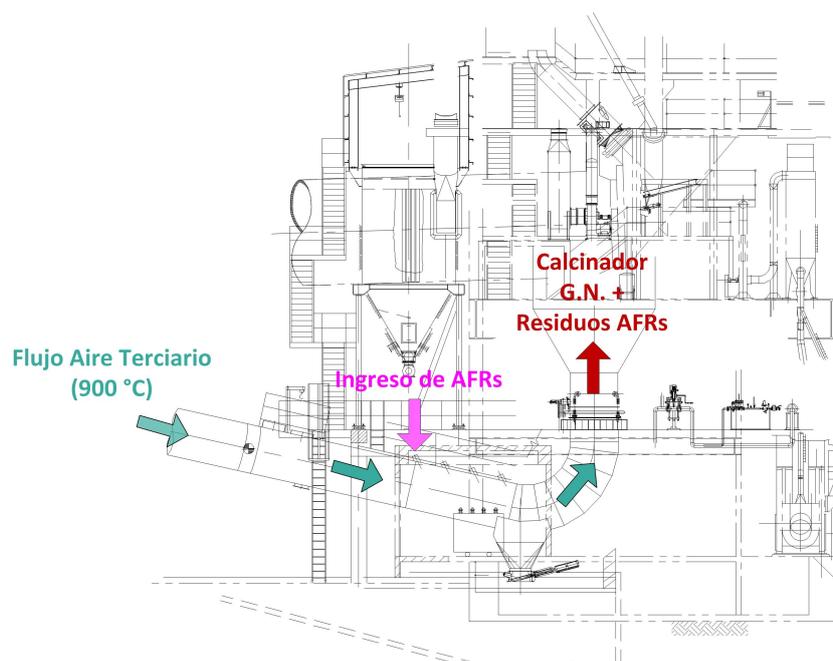


Figura 3.14: Flujo de Aire Terciario

hacer su recorrido hacia el calcinador se tiene un tiempo de residencia de 4 - 5 s, suficientes como para combustionar completamente el material residual a temperaturas mayores a los 900 °C. Las cenizas pueden seguir dos caminos, separación del proceso por medio del Filtro By-Pass o salir con el Clinker en cantidades menores. En la Figura 3.15 se presenta la auto ignición del materia a los 900 °C y la introducción manual de AFRs en el Ducto de Aire Terciario.



(a) Combustión a 900



(b) Ingreso Material Triturado

Figura 3.15: Alimentación de AFRs por Ducto Terciario

3.2.4. Equipo e instalaciones requeridos

La obtención de material que pueda ser utilizado como combustible alternativo requiere un proceso previo de segregación y selección de los residuos sólidos. Actualmente la eli-

minación de RS en GMS es en botaderos sanitarios. Existiendo el reciclado directamente en el Botadero Municipal de materiales que pueden ser fácilmente reutilizados en la industria. Este procedimiento se lo realiza en condiciones inseguras, poca higiene, riesgos físicos, peligro de entrar en contacto con objetos tóxicos por contacto directo o inhalación.

La acción de segregación previa de materiales se ve restringida aún más con la poca concientización a la población de las posibilidades de materiales que pueden ser reciclados para fines de re-uso en la industria o con fines energéticos. Y la poca acción de EMAS en políticas económicas estratégicas en proveer los medios para que una conciencia social de revalorización de lo usado nazca en la población.

Para la cantidad de RS recolectados por la empresa EMAS que está entre los 160 *t/d* y una proyección de 180 *t/d* para el año 2020 una planta como la mostrada en la Figura 3.16 puede cubrir los requerimientos para re-utilización de materiales y preparación de materiales para el Co-Proceso.

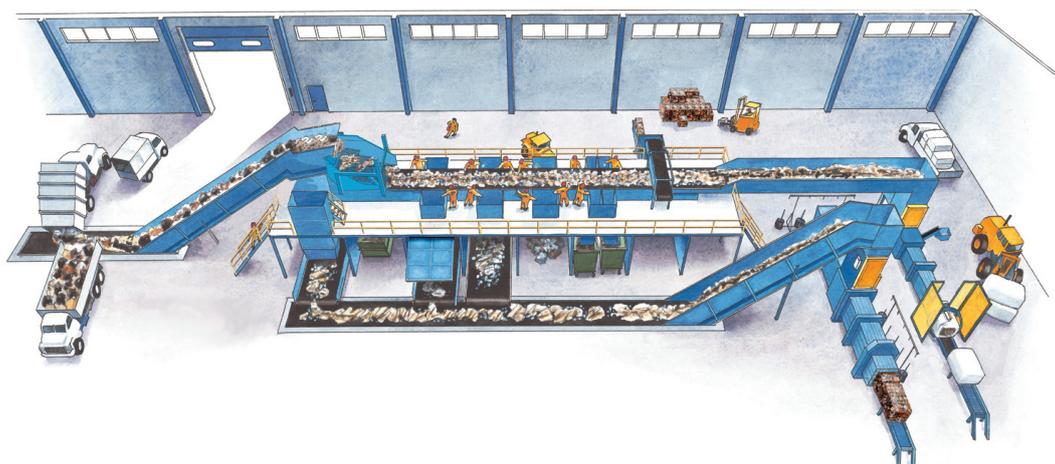


Figura 3.16: Diagrama de Flujo Planta Selección de RS

Esta nueva planta de selección y preparación de materiales constaría de los siguientes componentes básicos fuera y dentro de la planta Cal-Orcko:

1. Línea de preparación de RS fuera de Planta.
2. Trituradora de Neumáticos usados en la Planta.
3. Equipo adicional para el Co-Proceso en la Planta.

El equipo tendría un costo entre tres a cuatro Millones de Euros (3 000 000 - 4 500 000 €), según estimaciones iniciales por parte de VECOPLAN. Este costo excluye instalaciones de obras civiles así como costos de transporte e internación de la maquinaria desde Alemania hasta Sucre.

La línea de separación de materiales tendrá un requerimiento estimado de 8 puestos de trabajo con una capacidad de procesamiento de 20 t/d , equivalentes a aproximadamente 200 kg/h por puesto de trabajo.

3.3. Análisis Económico

En la presente sección se hará un cálculo demostrativo de los consumos y costos de GN con una sustitución de AFRs en base a los siguientes datos de partida:

- Capacidades de producción de Clinker
- Horas de trabajo 7500 h/a , equivalentes a 312 días
- Poder calorífico de los AFRs: 18 000 kJ/kg

La producción de Clinker hará referencia a las líneas de Calcinación. Las 7500 h/a contempla una parada de 45 días que normalmente es usada para efectos de mantenimiento, vale decir no existe producción de Clinker en este periodo de tiempo. El poder calorífico es un promedio de una mezcla homogenizada, poderes caloríficos más altos pueden ser obtenidos en caso de usar elementos individuales i.e. neumáticos usados 28 000 kJ/kg a 32 000 kJ/kg (Ver Tabla 2.5).

3.3.1. Cálculo Teórico de Costos por Consumo de GN

El cálculo demostrativo de los consumos y costos de GN con una sustitución de AFRs se realizara en base a una planta de producción de 2000 tdc, con un consumo energético de 40 % en el Quemador Principal y 60 % en el Quemador del Calcinador.

Cálculo de Energía por hora Quemador Principal

$$2000 \frac{t \cdot cl}{dia} \cdot 355 \frac{kcal}{kg \cdot cl} \cdot \frac{1000}{24} = 29583333 \frac{kcal}{h}$$

Consumo de GN en el Quemador Principal

$$29583333 \frac{kcal}{h} / 9520 \frac{kcal}{m^3} = 3107,49 \frac{m^3}{h}$$

Cálculo de Energía por hora Quemador Calcinador

$$2000 \frac{t \cdot cl}{dia} \cdot 531 \frac{kcal}{kg \cdot cl} \cdot \frac{1000}{24} = 44250000 \frac{kcal}{h}$$

Consumo de GN en el Calcinador considerando un 20 % de sustitución de AFRs

$$0,2 \cdot 44250000 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} / 9520 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} = 3718,49 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Gastos anuales de GN en el Quemador Principal

$$3107,49 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,0537 \text{ €} \cdot 7500 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 1\ 251\ 310 \text{ €}$$

Gastos anuales de GN en el Calcinador

$$3718,49 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,0537 \text{ €} \cdot 7500 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 1\ 497\ 342 \text{ €}$$

Costos anuales de AFR substituido en el Calcinador

$$1 \frac{\text{€}}{\text{t}} \cdot 1,7 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 7500 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 12\ 641 \text{ €}$$

El ahorro anual estará dado por la diferencia de costo anual bajo una producción únicamente con GN y costo total incluida la sustitución por AFR en el sistema de calcinación resultando:

$$\text{Ahorro} = 2761293 \text{ €} - 3122987 \text{ €} = 361694 \text{ €}$$

Según los datos de la Sección 2.3.1, la producción actual de la cementera tiene un consumo energético inverso al teórico, vale decir que el 60 % del GN llega a ser consumido en el Quemador Principal y 40 % en el Quemador del Calcinador. Bajo este escenario y siguiendo el procedimiento de cálculo anterior se llega a un ahorro de 241 811 €.

La segunda línea de producción con 760 tdc presenta los siguientes datos técnicos de partida: un consumo energético específico de $937 \text{ kcal/kg} \cdot \text{cl}$ y un consumo energético de 49 % en el Quemador principal y 51 % en el Quemador del Calcinador.

Cálculo de Energía por hora Quemador Principal

$$760 \frac{\text{t} \cdot \text{cl}}{\text{dia}} \cdot 460 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{cl}} \cdot \frac{1000}{24} = 14566667 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Consumo de GN en el Quemador Principal

$$14566667 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} / 9520 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} = 1530,11 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Cálculo de Energía por hora Quemador Calcinador

$$760 \frac{t \cdot cl}{dia} \cdot 477 \frac{kcal}{kg \cdot cl} \cdot \frac{1000}{24} = 15105000 \frac{kcal}{h}$$

Consumo de GN en el Calcinador considerando un 20% de sustitución de AFRs

$$0,2 \cdot 15105000 \frac{kcal}{h} / 9520 \frac{kcal}{m^3} = 1269,33 \frac{m^3}{h}$$

Gastos anuales GN en el Quemador Principal

$$1530,11 \frac{m^3}{h} \cdot 0,0537 \text{ €} \cdot 7500 \frac{h}{a} = 616\,138 \text{ €}$$

Gastos anuales GN en el Calcinador

$$1269,33 \frac{m^3}{h} \cdot 0,0537 \text{ €} \cdot 7500 \frac{h}{a} = 511\,127 \text{ €}$$

Costos anuales de AFR sustituido en el Calcinador

$$1 \frac{\text{€}}{t} \cdot 0,7 \frac{t}{h} \cdot 7500 \frac{h}{a} = 5274,00 \text{ €}$$

El ahorro anual estará dado por la diferencia de costo anual bajo una producción únicamente con GN y costo total incluida la sustitución por AFR en el sistema de calcinación resultando:

$$\text{Ahorro} = 1\,255\,046 \text{ €} - 1\,132\,538,57 \text{ €} = 122\,507 \text{ €}$$

El escenario actual contempla 2 líneas de producción de 2000 tdc y 760 tdc. Se tiene prevista la implementación de una nueva línea de producción, con sección de calcinación a 18 km de distancia de la Planta Cal-Orcko. Esta nueva línea tendrá una capacidad de 2000 tdc, con las características propias del consumo energético vale decir 40% Quemador Principal y 60% Quemador Calcinador, siendo los resultados a obtener aquellos del primer análisis.

Por lo tanto el ahorro económico anual bajo el escenario actual sería de:

$$241811\text{€} + 122507\text{€} = 364318\text{€}$$

Considerando la nueva línea de producción:

$$241811\text{€} + 122507\text{€} + 361694\text{€} = 726012\text{€}$$

3.3.2. Cálculo de Volúmenes de AFRs en el Co-Proceso

El volumen requerido para una sustitución inicial de 20 % de GN por AFRs tiene estrecha relación con los cálculos realizados en la Sección 3.3.1.

Para una línea de producción de 2000 tdc se tiene:

$$8850000 \frac{kcal}{h} / \left[5251 \frac{kcal}{kg} \cdot 1000 \right] = 1,7 \frac{t}{h}$$

Por lo tanto el volumen total de AFRs por día será del orden de:

$$V_{AFR} = 1,7 \frac{t}{h} \cdot 18 \frac{h}{d} = 30 \frac{t}{d}$$

Para una línea de producción de 760 tdc se tiene:

Volumen de AFRs en el Calcinador

$$3021,00 \frac{kcal}{h} / \left[4296 \frac{kcal}{kg} \cdot 1000 \right] = 0,7 \frac{t}{h}$$

Por lo tanto el volumen total de AFRs por día será del orden de:

$$V_{AFR} = 0,7 \frac{t}{h} \cdot 18 \frac{h}{d} = 12,6 \frac{t}{d}$$

En el escenario actual con una producción de 2760 tdc en el Municipio de Sucre, con un 20 % de sustitución inicial de GN por AFR, pueden ser Co-Procesados 42,6 t/d de R.S. Con una nueva línea de 2000 tdc se obtendrían, teóricamente, 30 t/d adicionales de RS que pueden ser Co-Procesados haciendo un total de 72,6 t/d.

3.3.3. Costo Referencial de Consumo GN

Los costos anuales referenciales en el consumo de GN para una producción de 2760 tdc, toman como datos de partida las Tablas 2.1 y Tabla 2.2 (Consumo de GN FANCESA Planta Cal Orcko). Los resultados son presentados en la Tabla 3.1.

Los valores referenciales de los meses de Agosto y Septiembre se aproximan a los valores teóricos obtenidos en la Sección 3.3.1.

Tabla 3.1: Consumos y Costos Referenciales de GN

Mes	[m ³]	[BOB]	[USD]	[EUR]
Gestión 2014				
Abril	7059008	2949558	423787	380232
Mayo	6620895	2766496	397485	356634
Junio	3780350	1579593	226953	203628
Julio	5174687	2162208	310662	278734
Agosto	7524444	3144038	451730	405303
Septiembre	7484653	3127411	449341	403160
Octubre	5458594	2280836	327706	294026
Noviembre	6961597	2908856	417939	374985
Diciembre	6590014	2753592	395631	354970
Gestión 2014				
Enero	6051970	2528774	363330	325989
Febrero	3782320	1580417	227071	203734
Marzo	3974320	1660642	238598	214076
TOTAL	70462852	29442422	4230233	3795472

3.3.4. Cálculo del Return of Investment - ROI

Con una inversión inicial de 4500000 € (3.2.4) en equipos requeridos para la preparación de AFRs que cumplan las condiciones para el Co-Proceso en la industria cementera, y asumiendo unos 4 000 000 € necesarios para el transporte, costos de importación, maquinaria adicional e.g. volquetas y palas e infraestructura en obras civiles; se tiene una inversión que bordea los 10 000 000 €.

Teniendo una inversión inicial de 10 000 000 € y un ahorro anual de 726 012 € puede ser calculado el ROI Primario [31]:

$$\text{ROI Primario} = \frac{10000000 \text{ €}}{726012 \text{ €}} = 13,77 \text{ a}$$

El resultado nos indica que la inversión se amortizará en 13 años y 9 meses.

Por lo que se puede concluir que los volúmenes de Residuos Sólidos cualitativamente como cuantitativamente permiten su uso como un combustible alternativo. Inicialmente en el ahorro de costos en la producción del cemento.

Los materiales en los RS del Municipio de Sucre pueden ser segregados en Orgánicos

e Inorgánicos. La restricción de considerar a los RS como un recurso natural, involucra una segregación de materiales en Papel, cartón, Plásticos, neumáticos usados y metales donde serán revalorizados para un reciclado o de acuerdo a su poder calorífico. Una vez segregados, se propone el Co-Proceso de material inorgánico en la planta cementera local. Con una capacidad instalada de 2760 tdc y una proyección de 5330 tdc en los próximos años permitirá la eliminación por Co-Proceso de una 30 toneladas/día de RS.

El presente análisis propone un estudio intensivo de la utilización de RS en la industria cementera, específicamente: el grado de influencia en el proceso de producción de cemento, vale decir tipos y cantidades de materiales a usar así como desgaste y fluctuaciones de producción.

El trabajo fue desarrollado teniendo como partida las instalaciones del proceso de calcinación de una cementera, es decir la maquinaria ya instalada y que cumple con todos los requerimiento tecnológico para el Co-Proceso. Sin embargo, el poder energético es equivalente a 20 MW, de no existir una predisposición al Co-Proceso, se propone un estudio complementario de la implementación de Incineradores dedicados para la generación de energía eléctrica.

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

- El Municipio de Sucre actualmente genera **83,2 t/d** de material inorgánico. Mientras más moderna es la ciudad los RS que produce son de mayor calidad. Tras un proceso de reciclaje existe material suficiente y necesario para poder ser Co-Procesado en la industria del Cemento.
- En las líneas de Producción de cemento actuales, en la cementera local (FANCESA), sin modificaciones mayores, puede iniciarse un Co-Proceso de RS a pequeña escala. Haciendo énfasis en el aprovechamiento energético de Neumáticos Usados. Los bajos volúmenes iniciales pueden ayudar al proceso de curva de aprendizaje en la estabilización del Horno Rotatorio cuando se trabaja con este tipo de combustibles.
- El Consumo Volumétrico de 7,5 Millones m^3/mes de GN a un costo subvencionado de 1,70 USD/MPC, para una Producción Óptima de la capacidad total instalada en la cementera local, equivale a 450 000 USD/Mes. Un Benchmarking internacional bajo este escenario daría resultados erróneos en referencia a ahorros energéticos y desarrollo tecnológico. La Industria Cementera Local (FANCESA), no ha considerado (aún) establecer nuevas Estrategias empresariales de sostenibilidad, con una visión prospectiva de sustitución del GN.
- El Co-Proceso de RS en la Industria Cementera local significaría un ahorro aproximado de 725 000 €/Anual incluida la nueva línea Producción a una sustitución inicial de 20 % del GN considerando el precio subvencionado del mismo con un valor energético de 20 MW. Con un precio de GN igual al precio de venta internacional fijado a 8 USD/MPC se tiene un ahorro anual de 3 300 000 USD/año. Los RS son considerados como fuente alternativa de energía y en ninguna instancia como material alternativo adicional para la fabricación del cemento, por lo tanto no es necesaria una re-clasificación del tipo de cemento que actualmente se produce en la cementera local (FANCESA). La implementación del Co-Proceso permitiría a FANCESA ser acreedora de “Bonos de Carbón” emitidos por el BID como premio a empresas que mejoren tecnológicamente la reducción de CO_2 . Estas están en el orden de 5 € a 29 € por tonelada de CO_2 .
- Un ROI de 13 años y 9 meses, para accionistas estatales de la cementera local, es un tiempo razonable, si se toma en cuenta los beneficios sociales y la protección al medio ambiente que se obtendría (reducción de RS a eliminar y CO_2). El ROI baja radicalmente su valor a menos de 4 años si se considera la eliminación de la subvención del GN.

- Para garantizar el suministro constante con poderes caloríficos del orden de 22 000 Kcal/kg es necesaria una planta de selección de materiales de los RS. Para la curva de aprendizaje actual VECOPLAN calcula 20 t/d incluidas llantas usadas a ser trituradas.
- Según figuras jurídicas nuevas (internacionales) los RS son considerados como Recursos Naturales y en el ámbito local los estamos desaprovechando siendo que estos pueden ser utilizados de una manera eficiente para la generación de energía en la industria local.

4.2. Recomendaciones

- La utilización de RS en la industria cementera involucra factores adicionales que deben ser considerados, como ser: Desgaste de los ladrillos refractarios, desgaste de la virola del Horno Rotatorio para citar algunos. Estabilidad óptima de producción del Horno.
- La planta de manejo de Residuos Sólidos, puede ser analizada en sus componentes, costos y generación de puestos de trabajo en forma más detallada en otro trabajo a ser desarrollado en la Universidad Andina Simón Bolívar i.e. Un plan de negocio.
- Dada la cercanía del actual Botadero Municipal “Lechuguillas” a la Planta Cal-Orcko y la implementación de la nueva línea de calcinación por la Zona de la Zapatera, se recomienda hacer un análisis detallado de la ubicación óptima de la Planta de Manejo de RS.
- Por la envergadura del presente estudio se recomienda tener a este como un punto de partida para futuros estudios en referencia a la Industria Cementera y AFRs (RS) o alternativas de generación de Energía Eléctrica en base a AFRs.
- Se recomienda a las instituciones copropietarias de la Cementera Local, la utilización de RS que permita una autosuficiencia Energética, lo que significaría un avance tecnológico en el ahorro de combustibles fósiles tradicionales y permitiría además que Sucre sea considerada una Ciudad Verde Ecológica a niveles internacionales.

Bibliografía

- [1] H. Ludwig, *Gegenwärtige und zukünftige Zemententwicklungen vor dem Hintergrund der CO₂-Reduzierung*. INFRAKON - Universität Weimar, 2013.
- [2] L. Guevara, *En tres años, el parque automotor creció 35 %*. Correo del Sur, 2014.
- [3] DEKRA, *CO₂ Rechner*. DEKRA SE, 2014.
- [4] FLSmidth, *Pyro Processing Operations and Maintenance*. FLSmidth Institute, 2013.
- [5] INE, *BOLIVIA Crecimiento intercensal municipios*. Instituto Nacional de Estadística, 2013.
- [6] EMAS, *Servicio y Seguridad*. Entidad municipal de aseo urbano Sucre, 2014.
- [7] TJUE, *Sentencia del tribunal de Justicia (Sala Quinta) Asunto C-228/00*. Tribunal de Justicia de la UE, 2003.
- [8] BID, *Informe Anual 2010*. Banco Interamericano de Desarrollo, 2011.
- [9] Loesche, *Loesche Automatisierungstechnik*. Loesche, 2009.
- [10] Polysius, *Polysius Zement Engineering made by Polysius*. Polysius, 2008.
- [11] G. Stein, *Umwelt und Technik im Gleichklang: Technikfolgenforschung und Systemanalyse in Deutschland*. Springer, 2003.
- [12] BioBio, *Cementos, Fabricación y Clasificación*. Cementos Bio Bio, 2009.
- [13] R. Bosold, D. y Pickhardt, *Zemente und ihre Herstellung*. Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2014.
- [14] O. Danilin, *Combustión*. INFRAKON - Universität Weimar, 1999.
- [15] VSG, *Valores de Emision*. Verband der Schweizerischen Gasindustrie, 2015.

- [16] D. Lübbert, *CO₂ Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich*. Deutscher Bundestag, 2015.
- [17] W. Duda, *Internationale Verfahrenstechniken in der Zementindustrie*. Bauverlag BV GmbH, 1985.
- [18] BDZ, *Zement Jahresbericht 2000-2001*. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V., 2001.
- [19] VDZ, *Deutsche Zementindustrie erfüllt CO₂ Minderungsziel deutlich*. Vereins Deutscher Zementwerke e.V., 2013.
- [20] S. Spaun, *Auswirkungen des Emissionshandel auf die Zementindustrie*, vol. 1. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, 2007.
- [21] H. Braun, *Sekundärbrennstoffeinsatz in der Zementindustrie - vom Altreifen bis zum Tiermehl*, vol. 1. Lafarge Centre Technique Europe Centrale GmbH, 2002.
- [22] O. Kropp, *§ 6 KrWG - Abfallhierarchie*, vol. 1. Weka Media GmbH & Co. KG, 2012.
- [23] CEMBUREAU, *Sustainable Cement Production Co-Processing of Alternative Fuels and Raw Materials in the European Cement Industry*, vol. 1. CEMBUREAU, 2009.
- [24] CEMBUREAU, *Environmental Benefits of using Alternative Fuels in Cement Production*, vol. 1. CEMBUREAU, 2000.
- [25] J. Espinoza, *Gas natural. Derivados, usos y precios*. El Diario, 2015.
- [26] HNC, *Ley de Hidrocarburos 3058*. Honorable Congreso Nacional, 2005.
- [27] FLSmidth, *Process Training Simulation*. FLSmidth, 2013.
- [28] FLSmidth, *Preheater Calciner Systems*. FLSmidth, 2011.
- [29] K. Karstensen, *Co-processing of alternative fuels and raw materials and treatment of organic hazardous wastes in Cement kilns International experiences and best practice*. SINTEF, 2012.
- [30] A. Nilsen, *Combustion of large solid fuels in cement rotary kilns*. Technical University of Denmark, 2012.
- [31] W. Mensing, *Erfolgreiches Projektmanagement ohne externe Berater in KMUs*. Springer Gabler, 2015.

Anexos

Anexo I

EMAS - Resumen Residuos Sólidos



Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre

- Generación de residuos sólidos y su procedencia:

Año	Población de Sucre	Producción diaria Kg/hab.	Procedencia de Residuos		Total Kg/día	Cobertura
			Domiciliario /Industrial	Hospitalarios		
2014	267.439,70	0,60	160.463,82	2.000,00	162.463,82	87%

- Tipo de Basura:

Sucre. Composición física de residuos sólidos	
Tipo de Residuo	%
Materia orgánica	48%
Plásticos	15%
Papel y cartón	14%
Metales y tóxicos	3%
Vidrios	4%
Otros	16%
Total	100%



Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre

- Capacidad y metodología:

El municipio de Sucre no cuenta con un vertedero, con lo que cuenta es con una celda de emergencia que llega a ser el botadero semi controlado de Lechuguillas y su capacidad es hasta fines de este año que llegaría a ser el cierre técnico de la misma. Aclarando que se podría prolongar este cierre si fuera necesario.

La metodología que se usa es el de cobertura de tierra a los residuos sólidos, con un control de lixiviados mediante balsas cubiertas con geotextil y bombeo. Y el control de gases de los residuos mediante chimeneas.

- Manejo de residuos emergentes:

En la ciudad de Sucre se tiene un tratamiento especial con los residuos sólidos hospitalarios, estos se recogen con un carro especial para este tipo de residuos, al llegar al botadero se depositan en una celda específica y se realiza la cobertura con tierra y luego se ejecuta el tratamiento con cal viva cumpliendo las normas Bolivianas.

- Proyectos en curso o futuros para la re-valorización de residuos sólidos:

Por el momento solo se cuenta con un proyecto que está en proceso de inicio que es de la planta de compostaje y lombricultura de residuos orgánicos. Y se realiza el reciclaje de residuos sólidos reciclables.



Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre

- Trabajos en conjunto con otras entidades:

Solo se trabaja conjunto al Gobierno Autónomo Municipal de Sucre, no se realiza trabajo en conjunto con otras entidades.

- Costo de reciclaje por tipo de residuos sólidos:

MATERIALES SEGREGADOS	Precio / Kg. en Bs.
Plástico Blando	2,10
Plástico Duro	1,20
Nylon	2,10
Botellas PET	1,30
Aluminio	5,50
Papel	1,30

- Cooperaciones con Organismos Internacionales:

En la actualidad EMAS trabaja con la cooperación de la Agencia de Cooperación de Cataluña, los cuales apoyaron en la planta de compostaje y lombricultura.



Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre

- Proyecto de concientización social:

Se está iniciando el taller de capacitación para recolección de residuos sólidos diferenciados, esto para poder dar inicio en la planta de compostaje y lombricultura ya que necesitamos los residuos orgánicos. La idea es comenzar a realizar el taller en el mercado campesino para iniciar y en un futuro expandir a diferentes mercados para disminuir los desechos en el botadero de Lechuguillas esto junto a la mitigación de la contaminación ambiental.

