



Institución Universitaria

**Identificación de barreras para la  
implementación de medidas de  
eficiencia energética en procesos de  
alta temperatura en diferentes  
regiones de Colombia**

**Sergio Andrés Estrada Mesa**

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2017



# **Identificación de barreras para la implementación de medidas de eficiencia energética en procesos de alta temperatura en diferentes regiones de Colombia**

**Sergio Andrés Estrada Mesa**

Trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Gestión Energética Industrial**

Director:

MSc. Bernardo Argemiro Herrera Múnera

Línea de Investigación:

Eficiencia Energética

Grupo de Investigación:

Materiales Avanzados y Energía

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2017



*Con todo mi amor y gratitud a mi esposa Clara Mileidy Valladales Ramírez. Quien me apoyo incondicionalmente en la adversidad y en los tiempos duros, debido a la ausencia de mi presencia por dedicarle el tiempo a este estudio que hoy será nuestro logro, y será compartido con ella y mi bebe Valery Estrada Valladales con todo el gusto desde mi alma.*

*A mi madre María Teresa Mesa Arenas, quien nunca falla y siempre está brindándome su apoyo, y diciéndome “nunca te rindas que solo quien persevera logra lo que los demás no pueden”*

*Ellas son las mujeres de mi vida las amo con todo mí ser.*



# Agradecimientos

Al profesor Bernardo Argemiro Herrera Munera; Ingeniero Químico, Magister en Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

Por su apoyo, colaboración y paciencia, en la enseñanza en los temas relacionados con: redacción, metodología, búsqueda y análisis. Su aporte como director fue invaluable.

**Muchas gracias de todo corazón.**

A la red de investigación INCOMBUSTION, quienes suministraron la información complementaria realizada mediante los diagnósticos energéticos para el desarrollo de la tesis.

A COLCIENCIAS, quienes aportaron los fondos para realizar la maestría en modalidad de pasantía.

Al ITM, quien presto su colaboración en equipos y locaciones para tareas extracurriculares, que beneficiaban el desarrollo de la tesis.



## Resumen

El objetivo principal de este estudio fue Identificar barreras tecnológicas, comportamentales y normativas para la implementación de mejoras energéticas en los procesos de alta temperatura de cemento y cerámicos en diferentes regiones de Colombia. Para llegar a esto se partió de la identificación de la población por medio de la base de datos de SIREM (Superintendencia de sociedades) y usos de la energía térmica en empresas dentro de los sectores de cemento y cerámicos, en diferentes regiones de Colombia. Se establecieron las brechas tecnológicas, mediante diagnósticos energéticos realizados en las empresas seleccionadas, las brechas comportamentales se establecieron mediante el diseño de una encuesta taxonómica basada en métodos aplicados en otros países y la brechas normativas se establecieron mediante la comparación directa de la regulación colombiana contra regulaciones internacionales. Para determinar las barreras tecnológicas y normativas que deben superarse para la implementación de medidas energéticas en los procesos de alta temperatura de los sectores estudiados, se calculó un factor de barrera con base en las respuestas planteadas por los encargados de los procesos en las empresas intervenidas.

Los resultados muestran que la industria del cemento posee una brecha muy baja con respecto al desarrollo tecnológico a nivel mundial, mientras que la industria cerámica aún tiene un potencial considerable para mejorar. Así mismo, para ambos sectores, los costos ocultos fueron la principal barrera encontrada para la implementación de soluciones de mejora de eficiencia energética y se pudo comprobar que la regulación ambiental en Colombia aún no es lo suficientemente estricta para favorecer la penetración de nuevas tecnologías de uso eficiente de la energía en los sectores estudiados.

**Palabras clave:** Barreras, eficiencia energética, obsolescencia tecnológica, diagnósticos energéticos; cemento, cerámicos

## Abstract

The main objective of this study was to identify technological, behavioral and normative barriers for the implementation of energy improvements in high temperature cement and ceramic processes in different regions of Colombia. In order to reach this, identification of the population was done by means of the SIREM database. Use of thermal energy in companies within the cement and ceramic sectors in different regions of Colombia was also identified. Technological barriers were established through energy diagnostics carried out in the selected companies. Behavioral gaps were established through the design of a taxonomic survey based on methods applied in other countries, and the regulatory gaps were established through direct comparison of Colombian regulation against international regulations. In order to determine the technological and regulatory barriers that must be overcome for the implementation of energy measures in the high temperature processes of the sectors studied, a barrier factor was calculated based on the answers raised by the process managers in the companies under investigation.

The results show that the cement industry has a very low gap with respect to technological development worldwide, while the ceramic industry still has considerable potential for improvement. Also, for both sectors, hidden costs were the main barrier found for the implementation of energy efficiency improvement solutions and it was verified that the environmental regulation in Colombia is still not strict enough to favor the penetration of new technologies for efficiency in energy use in the sectors studied.

**Keywords:** Barriers, energy efficiency, technological obsolescence, energy diagnosis, cement, ceramics

# Contenido

	Pág.
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Marco Teórico y Estado del Arte .....</b>	<b>7</b>
1.1 Definiciones.....	7
1.1.1 Eficiencia energética.....	7
1.1.2 Brecha .....	8
1.1.3 Barrera .....	8
1.2 Industria del cemento .....	9
1.3 Industria de cerámicos .....	9
1.4 Tecnologías utilizadas para la producción de cemento .....	9
1.4.1 Identificación de procesos para la producción de cemento .....	9
1.4.2 Tecnologías para el aprovechamiento el mejoramiento de la eficiencia energética en la producción de cemento .....	11
• Precalentadores – precalcinadores.....	11
• Ahorro de energía y otros beneficios del precalentador - precalcinador.....	13
• Hornos de lecho fluidizado.....	15
1.5 Tecnologías empleadas para la producción de cerámicos .....	18
• Quemadores de tubo radiante .....	19
1.5.1 Cocción .....	20
• Horno túnel de rodillos .....	20
• Horno túnel de vagonetas.....	23
1.5.2 Nuevas tecnologías y configuraciones en gasificación.....	25
• Lecho fluidizado de presión compensada .....	25
1.6 Revisión de estudios de barreras para la eficiencia energética en sectores industriales .....	27
<b>2. Metodología .....</b>	<b>35</b>
2.1 Consolidación de la muestra .....	35
2.1.1 Identificación de sectores productivos con temperaturas iguales o superiores a 400°C	35
2.1.2 Cantidad de empresas por sectores en las zonas centro, suroccidente, noroccidente y norte de Colombia .....	36
2.2 Identificación de brechas y barreras.....	39
2.2.1 Brechas y barreras tecnológicas.....	39
2.2.2 Brechas y barreras comportamentales .....	40
2.2.3 Brecha y barreras normativas .....	45
<b>3. Resultados.....</b>	<b>47</b>
3.1 Identificación de brechas tecnológicas sector cemento .....	47
3.2 Identificación de brechas tecnológicas sector cerámico .....	53
3.3 Identificación de brechas y barreras comportamentales en el sector cemento .	57
3.4 Identificación de brechas y barreras comportamentales en el sector cerámico	61
3.5 Brechas y barreras normativas ambientales.....	63
3.5.1 Brechas normativas en plantas nuevas .....	63

3.5.2 Brechas normativas en plantas existentes.....	65
<b>4. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>70</b>
4.1 Conclusiones .....	70
4.2 Recomendaciones .....	72
<b>Bibliografía .....</b>	<b>93</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1-1: Diagrama ilustrativo del principio de (a) Calcinación, (b) Precalcinador de bajo NOx (c) precalentador/precalcinador de varias etapas. ....	13
Figura 1-2: Consumo específico de varias tecnologías de producción de cemento. ....	14
Figura 1-3: Horno de lecho fluidizado (a) Planta piloto (b) esquema general. ....	17
Figura 1-4: Esquema horno túnel de rodillos .....	21
Figura 1-5: Curva de cocción típica .....	21
Figura 1-6: Esquema del horno túnel de vagonetas .....	24
Figura 1-7: Esquema gasificador de lecho.....	26
Figura 2-1: Detalle de la cantidad de empresas pertenecientes a los sectores de cemento y cerámica.....	36
Figura 2-2: Fabricantes del producto básico en los sectores cemento y cerámico.....	37
Figura 2-3: Filtro por tamaño de empresas.....	37
Figura 2-4. Filtro por regiones seleccionas.....	38
Figura 3-1: Consumos específicos de las empresas intervenidas y los consumos específicos reportados por la literatura.....	48
Figura 3-2: Factor de brecha tecnológica entre las plantas intervenidas en Colombia....	49
Figura 3-3: Consumos específicos de Colombia y los países con mayor eficiencia en producción de cemento del mundo.....	50
Figura 3-4: Porcentaje de brecha existente entre Colombia y la India .....	51
Figura 3-5: Nivel de obsolescencia en el sector cemento. ....	52
Figura 3-6: Relación entre nivel de obsolescencia y consumo específico en las plantas diagnosticadas .....	53
Figura 3-7: Consumo específico de cada uno de los hornos empleados para la fabricación de cerámicas.....	54
Figura 3-8: Nivel de obsolescencia tecnológica en la fabricación de pisos y baldosas. ..	55
Figura 3-9: Consumos específicos empleados por los diferentes hornos utilizados en las empresas intervenidas y los consumos específicos reportados en la literatura .....	56
Figura 3-10: Nivel de obsolescencia tecnológica en la producción de cerámica de uso eléctrico.....	57
Figura 3-11: Análisis cualitativo de barreras en el sector cemento .....	58
Figura 3-12: Análisis de barreras percibidas en las empresas intervenidas.....	62
Figura 3-13. Emisiones máximas permitidas de dióxido de azufre en diferentes países para plantas nuevas.....	64
Figura 3-14: Emisiones máximas permitidas de dióxido de nitrógeno en diferentes países. ....	65
Figura 3-15: Niveles máximos permisibles de emisión de dióxido de azufre para plantas de producción de cemento y cerámica existentes. ....	66
Figura 3-16: Niveles máximos permisibles de emisión de dióxido de nitrógeno para plantas de producción de cemento y cerámica existentes. ....	66

XIV Identificación de barreras para la implementación de medidas de eficiencia energética en procesos de alta temperatura en diferentes regiones de Colombia

---

Figura 3-17: Brecha entre las regulaciones de Colombia, India y China para plantas nuevas. ....68

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1-1: Tipos de tecnologías utilizadas en la producción de clínker y su respectivo consumo específico.....	10
Tabla 1-2: Consumo específico de energía térmica en un proceso de fabricación de clínker .....	10
Tabla 1-3: Comparación entre horno rotatorio convencional y horno de lecho fluidizado.	18
Tabla 1-4: Tipos de hornos y consumos específicos .....	19
Tabla 1-5: Encuestas y estudios de casos sobre la investigación de las barreras para la eficiencia energética.....	28
Tabla 2-1: Muestra seleccionada y porcentaje representativo .....	39
Tabla 4-1: Resumen productores internacionales de secadores horizontales de rodillos.	73
Tabla 4-2: Resumen productores internacionales de secadores verticales.....	74
Tabla 4-3: Resumen productores internacionales de hornos de cocción. ....	74
Tabla 4-4: Especificaciones hornos de rodillos monocapa. ....	76
Tabla 4-5: Especificaciones hornos de rodillos bicanal.....	77
Tabla 4-6: Consumo específico horno de rodillos B&T. ....	80
Tabla 4-7: Resumen de consumos específicos de hornos túnel y rodillos. ....	81
Tabla 4-8: Catálogo quemadores de alta velocidad.....	82
Tabla 4-9: Tipos de quemadores Esa Pyronics. ....	82
Tabla 4-10: Productos y Consumo Energético estimado. ....	84
Tabla 4-11: Especificaciones quemadores de combustible gaseoso. ....	84
Tabla 4-12: Ponderación de preguntas para determinación de barreras económicas, comportamentales y organizacionales.....	87

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$F_B$	Factor de barrera	Adimensional	Ecuación 1
$n$	Número de empresas visitadas en el sector	Adimensional	Ecuación 1
$F_{P,k}$	Factor de ponderación de la pregunta k	Adimensional	Ecuación 1
$C_{i,k}$	Valor de codificación para la empresa i en cada pregunta k	Adimensional	Ecuación 1

Subíndice	Término
k	Pregunta de la encuesta
i	Empresa encuestada

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
MEE	Medida de eficiencia energética

# Introducción

La eficiencia energética juega un papel fundamental en la sostenibilidad ambiental, desempeño económico y seguridad energética de diferentes industrias, sectores y países. Esto ha impulsado a los gobiernos e industrias manufactureras a nivel mundial a plantearse numerosas políticas y medidas destinadas a mejorar la eficiencia energética de sus procesos productivos. Sin embargo, debido a diversos obstáculos, la adopción de estas medidas se han visto frenadas originando con ello una brecha en el potencial de eficiencia energética.

La identificación de barreras a nivel tecnológico, normativo y comportamental en los sectores industriales macro consumidores de energía de un país, constituye el punto de partida para la identificación del estado industrial del mismo, teniendo presente que la falta de actualización tecnológica, ya sea por motivos económicos o psicológicos como; el miedo, resistencia al cambio, falta de interés o intereses alternos, más una regulación ambiental laxa, conlleva a un consumo indiscriminado de los recursos energéticos, y al incremento de emisiones contaminantes al ambiente, dando como resultado baja eficiencia en el proceso y el aumento en los costos de producción. No obstante si a esto le sumamos la preocupación mundial por el cambio climático, y las reformas a las regulaciones ambientales existentes, en relación a la reducción de las emisiones de gases contaminantes por los países tecnológicamente desarrollados como punto de referencia, se obtiene un cambio de regulación más estricta en países con menor desarrollo industrial, lo que constituye un factor negativo para reducir la barreras tecnológicas y comportamentales existentes, ya que este tipo de iniciativas no son fundamentadas en situaciones reales por los países con menor desarrollo tecnológico, sino que parten de ejemplos internacionales, sometiendo a los empresarios a buscar medidas de desahogo, las cuales pueden llevar a la disertación o cierre de las empresas.

El estudio de brechas y barreras tecnológicas tiene una gran importancia para determinar el estado industrial de un país, convirtiéndose en punto de referencia para contemplar las falencias de los procesos productivos comparados con las tendencias tecnológicas utilizadas a nivel mundial, sin omitir la preocupación gubernamental por el uso racional y eficiente de la energía, ya que es un recurso que cada vez se hace más necesario por la creciente demanda industrial, el cual se ve afectado por la utilización de tecnología y

procesos obsoletos, desactualizados o en mal funcionamiento por desconocimiento, bajo poder adquisitivo del empresario o fundamentado en la falta de regulación normativa (Cagno & Trianni, 2014)

Las barreras para el mejoramiento de la eficiencia energética en procesos industriales pueden ser de tipo económico, tecnológico, comportamental y normativo. La correcta identificación y evaluación de las barreras que obstaculizan la eficiencia energética de una empresa, sector o país determinado, mejora la tasa de adopción de las diferentes medidas a considerar. Normalmente, la metodología para identificar las causas por las cuales estas medidas no son adoptadas, consiste en la elección de un objeto o una serie de preguntas de investigación, un método para la recolección de los datos (cuestionarios, entrevistas y estadísticas), y finalmente un análisis que puede ser cualitativo, cuantitativo o mixto (Thollander & Palm, 2013a).

Los sectores macro consumidores de energía térmica como son la producción de cemento y cerámica en Colombia, han realizado reportes de consumo específico y desempeño energético ante la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2006) (UPME, 2013). Sin embargo, debido a los cambios tecnológicos de los últimos años, esta información debe ser actualizada y puesta en comparación con respecto a procesos similares en otros países, especialmente aquellos que producen las mayores cantidades de cemento y cerámicos alrededor del mundo. A partir de esta comparación, es posible determinar la brecha existente y así determinar las barreras para la reducción de la misma en los sectores industriales previamente mencionados.

Consciente de esta necesidad, la Red de Investigación e Innovación en Combustión de Uso Industrial - INCOMBUSTION, integrada por grupos de investigación de la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de Antioquia, la Universidad del Valle y el Instituto Tecnológico Metropolitano han venido desarrollando proyectos enfocados hacia la realización de diagnósticos energéticos en la industria colombiana y la mejora de la eficiencia energética en el sector industrial a través de la implementación de nuevas tecnologías y el mejoramiento de las existentes. Desde hace dos años, INCOMBUSTION ha estado ejecutando el proyecto “Diagnóstico energético en los sectores industriales colombianos”, en el cual se busca diagnosticar los sistemas de combustión y calentamiento de los sectores industriales con mayor intensidad energética térmica en las

regiones de Antioquia, Valle y Cundinamarca, para identificar su estado actual en cuanto eficiencia energética, productividad, emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero, obsolescencia y brecha tecnológica con respecto a nuevas tendencias, así mismo identificar las principales barreras para la modernización y transferencia tecnológica, como también promover programas de transferencia, adaptación y demostración de proyectos pilotos en la industrias de las nuevas tecnologías de combustión y calentamiento. Es así como surge la necesidad de realizar un Trabajo de Investigación a nivel de Maestría en el marco de dicho proyecto con el propósito de analizar las brechas y barreras para el mejoramiento de la eficiencia energética en dos de los sectores más intensivos en el uso de energía térmica en procesos de alta temperatura, tales como la producción de cemento y cerámicos.

Para llevar a cabo la identificación de las brechas y barreras, se seleccionó una muestra representativa de los sectores productivos de cemento y cerámicos en distintas regiones de Colombia. Una vez definidas las muestras por sector, se realizaron los diagnósticos energéticos preliminares y una encuesta con el fin de recopilar información relacionada con el uso energético actual, descripción concreta de los procesos en cada sector, tipo de energéticos que utilizan, consumo de energía, nivel de producción, actitudes y posibilidades económicas frente al cambio tecnológico y percepción frente a la normativa ambiental actual. Así mismo se determinó el grado de obsolescencia tecnológica de las tecnologías de combustión y calentamiento utilizadas.

Los diagnósticos energéticos realizados en las empresas se llevaron a cabo mediante la norma ISO 13579-1, con el fin de aplicar un proceso de mediciones estandarizadas, obteniendo de esta forma, una información más acertada en las diferentes plantas de producción intervenidas en los sectores seleccionados.

Las barreras comportamentales fueron determinadas bajo otra metodología, ya que estas barreras son de carácter cualitativo y no cuantitativo, por ello se diseñó una encuesta taxonómica empleando estudios realizados en otros países, y aplicando una ponderación de valores numéricos a las respuestas por parte de una mesa de expertos, de esta forma se obtuvieron resultados numéricos para determinar las barreras comportamentales más influyentes en los empresarios colombianos. Las barreras normativas se establecieron

bajo una comparación directa entre la regulación ambiental colombiana y las regulaciones ambientales internacionales,

Teniendo presente la importancia de la identificación del estado tecnológico, comportamental y normativo del sector empresarial, este trabajo se establece como un punto de partida para la estructuración de programas de transferencia tecnológica y reformas normativas que contribuyan a la disminución de las emisiones de gases contaminantes al ambiente y el uso racional de la energía.

### **Objetivos**

Dado que actualmente no se cuenta con un estudio oficial de barreras tecnológicas en los sectores de cemento y cerámicos, que sirva como punto de referencia para determinar el estado tecnológico de la industria colombiana en comparación con los avances tecnológicos a nivel mundial y bajo la hipótesis de que es posible identificar las barreras tecnológicas, normativas y comportamentales en la producción de cemento y cerámicos, en las regiones centro, suroccidente, y noroccidente de Colombia, por medio de la ejecución de un proyecto de diagnóstico energético térmico, se plantean los siguientes objetivos para el presente Trabajo de Investigación:

#### *Objetivo general*

Identificar barreras tecnológicas, comportamentales y normativas para la implementación de mejoras energéticas en los procesos de alta temperatura de los sectores cemento y cerámicos, en diferentes regiones de Colombia.

#### *Objetivos específicos*

- Identificar la población y usos de la energía térmica en empresas dentro de los sectores de cemento y cerámicos, en diferentes regiones de Colombia.
- Establecer las brechas tecnológicas, comportamentales y normativas de los procesos de alta temperatura seleccionados con respecto a las tendencias mundiales de eficiencia energética.

- Determinar las barreras tecnológicas y normativas que deben superarse para la implementación de medidas energéticas en los procesos de alta temperatura de los sectores estudiados.



# **1. Marco Teórico y Estado del Arte**

La producción de cemento y cerámicos involucra procesos en los que el calentamiento se realiza a temperatura mayor a 400 °C. A continuación se describen los procesos de fabricación y los estudios de eficiencia energética y de brechas y barreras realizados en la literatura de estos sectores.

## **1.1 Definiciones**

### **1.1.1 Eficiencia energética**

La eficiencia energética hace referencia al uso adecuado y racional de la energía en los procesos productivos, teniendo como finalidad optimizar el recurso energético, de esta forma se busca utilizar solo la energía necesaria en el proceso sin malgastarla, teniendo presente que para un buen uso de la energía se recurre a la optimización de los procesos productivos por medio de buenas prácticas, implementación de tecnología de punta, repotenciación o actualización de equipos o sustitución de combustibles contaminantes por fuentes alternativas amigables con el ambiente.

La preocupación por la eficiencia energética se inicia entre los años 1973 y 1979, contemplada por la crisis de petróleo que surgió en esta década, iniciando una preocupación académica en torno a la existencia de medidas de eficiencia energética viables tanto técnica como económicamente. Estas medidas no han sido implementadas,

lo cual ha iniciado el concepto de brechas de eficiencia energética (IEA, 2012). El uso racional y eficiente de la energía es un punto focal de las innovaciones tecnológicas, normativas y económicas del mundo, teniendo presente que la optimización de los recursos en los procesos macro consumidores de energía en forma térmica, no solo constituyen un potencial de ahorro, sino también una tendencia de cambio ecológico (Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España, 2011).

### **1.1.2 Brecha**

Es un término empleado para hacer referencia a las diferencias que existe entre comunidades, contemplando factores económicos y culturales entre otras. También se refiere a las desigualdades que se reflejan en todas las nuevas tecnologías (Cagno & Trianni, 2014), por ello se emplea para describir la diferencia que existe entre los procesos de fabricación de cemento y cerámica entre Colombia y otros países, teniendo presente las normativas que regulan estos procesos tanto en Colombia como en el mundo.

### **1.1.3 Barrera**

Se denomina barrera a todos los factores que dificultan la adopción de tecnologías de eficiencia energética rentables o ralentizan su difusión (Tobias et al, 2011). El estudio de barreras tecnológicas tiene gran importancia para determinar el estado industrial de un país, convirtiéndose en punto de referencia para contemplar las falencias de los procesos productivos comparados con las tendencias tecnológicas utilizadas a nivel mundial, sin omitir la preocupación gubernamental por el uso racional y eficiente de la energía, ya que es un recurso que cada vez se hace más necesario por la creciente demanda industrial, el cual se ve afectado por la utilización de tecnología y procesos obsoletos, desactualizados o en mal funcionamiento por desconocimiento, bajo poder adquisitivo del empresario o fundamentado en la falta de regulación normativa (Cagno & Trianni, 2014).

## **1.2 Industria del cemento**

El cemento es un compuesto de piedra caliza, mineral de hierro, arcilla calcinada hasta el punto fundente llamada clínker, y yeso (sulfato de calcio), tomando el nombre de cemento al mezclar el clínker con el yeso. El cemento es el aglutinante del concreto u hormigón, el cual tiene múltiples aplicaciones en la industria, ya sea como agente refractario en procesos térmicos, o como el principal material en obras civiles (UPME, 2007).

## **1.3 Industria de cerámicos**

Los cerámicos son materiales inorgánicos poli-cristalinos obtenidos generalmente de materia prima de alta pureza, consolidando su conformado con grandes presiones, y obteniendo su estado sólido a partir de altas temperaturas (UNIOVI, 2007).

## **1.4 Tecnologías utilizadas para la producción de cemento**

La industria fabricante de cemento se caracteriza por ser macro consumidora de energía térmica, por consiguiente, el consumo energético versus producción, y las emisiones de gases al medio ambiente, se han convertido en el punto focal de estudio para la implementación de medidas de eficiencia energética.

### **1.4.1 Identificación de procesos para la producción de cemento**

La utilización de diferentes tecnologías y métodos para fabricar cemento en la actualidad a nivel mundial, se resumen en cuatro procesos, los cuales son: fabricación de cemento por vía húmeda, semi-húmeda, semi-seca y seca, teniendo una diferencia en su respectivo consumo específico. Los consumos específicos de energía térmica en la producción de cemento por los cuatro métodos difieren en su rango estableciendo como punto de referencia el menor consumo específico, el cual se logra con la producción de

cemento por vía seca, teniendo un consumo específico que oscila entre 2.900 a 3300 MJ/ton. En la Tabla 1-1 se muestran los consumos específicos utilizados por los diferentes procesos (Pardo et al, 2011).

**Tabla 1-1:** Tipos de tecnologías utilizadas en la producción de clínker y su respectivo consumo específico (Pardo et al, 2011).

Tipo de tecnología en el horno	Consumo específico en MJ/ton
Horno rotatorio seco con pre-calentador y pre-calcinador	3000 – 4000
Horno rotatorio seco con pre-calentador	3100 – 4200
Horno giratorio largo seco	5000
Horno rotatorio semi-seca	3300 – 5400
Horno rotatorio Semi-húmedo	3000 – 5400
Horno rotatorio húmedo	5000 – 6400
Horno de cuba	3100 - 6500

En la fabricación de cemento por vía seca se utilizan diversos métodos, los cuales difieren en la cantidad de etapas aplicadas al proceso, dando como resultado una diferencia en consumos específicos, tal como se muestra en la Tabla 1-2.

**Tabla 1-2:** Consumo específico de energía térmica en un proceso de fabricación de clínker (Madlool et al, 2011).

Proceso del horno	Consumo de energía térmica (MJ / tonelada de clínker)
Proceso largo y seco	4600
Ciclón 1 etapa pre-calentador	4180
Ciclón 2 etapas pre-calentador	3770
Ciclón de 4 etapas pre-calentador	3550
4 etapas ciclón pre-calentador más calcinador	3140
5 etapas pre-calentador más calcinador más enfriador de alta eficiencia	3010
6 etapas pre-calentador más calcinador más enfriador de alta eficiencia	Menos de 2930

En los hornos secos con pre-calentador y pre-calcinador, se instala una cámara de combustión adicional entre el pre-calentador y el horno, llamada pre-calcinador, en la

cual se consume alrededor del 60% del combustible utilizado en el horno, y entre el 80 y 90 % de la calcinación ocurre en esta cámara, aumentando la eficiencia hasta un 11,8 %, y reduciendo las emisiones de NOx debido a la temperatura inferior de la combustión, y brindando la posibilidad de aumentar la capacidad hasta 12000 ton/día, mediante la reducción de la relación longitud/diámetro (Madlool et al, 2011).

### **1.4.2 Tecnologías para el aprovechamiento el mejoramiento de la eficiencia energética en la producción de cemento**

La entrada del horno rotatorio utilizado para la calcinación de clínker posee un gran potencial de recuperación de calor residual, debido a que los gases producidos por la combustión salen a contra flujo, esto hace que la materia prima pueda ser precalentada antes de entrar al horno. A continuación, se describirán las tecnologías utilizadas para aprovechar la energía contenida en los gases de combustión.

- **Precalentadores – precalcinadores**

Un precalcinador es una cámara del horno introducida dentro del precalentador en la cual 50-65% de la cantidad total de combustible ingresa, en conjunto con aire caliente canalizado desde el enfriador de clínker. El combustible en el precalcinador es quemado a baja temperatura y el calor transferido al crudo, el cual es casi completamente por convección, es muy eficiente. El material permanece en la zona más caliente algunos segundos y sale a una temperatura alrededor de 870°C. Aproximadamente del 90 al 95% de la calcita es descompuesta en el precalcinador (Joint research centre, 2013).

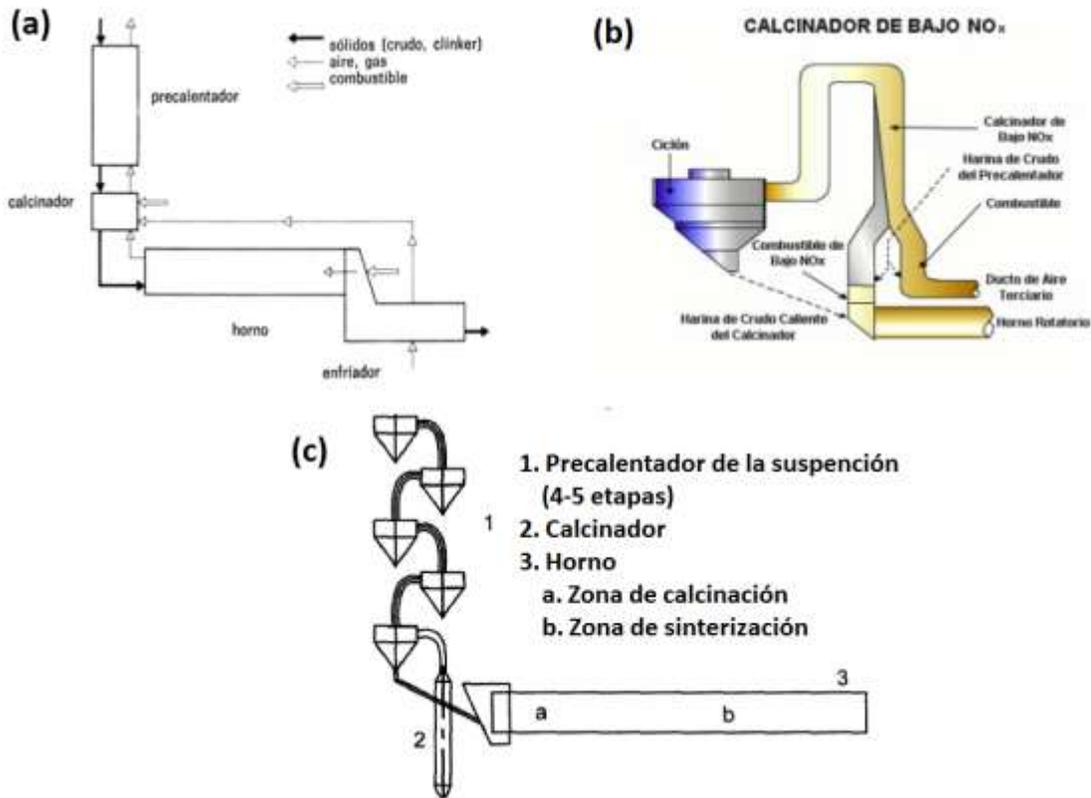
La cantidad de calor suministrada al horno utilizando precalcinador es menor, alargando la vida del revestimiento refractario. Por otro lado, menos NOx es formado ya que la mayor parte del combustible es quemado a baja temperatura. Un pre calcinador puede ser también económicamente factible ya que hace frente al problema de formación de depósitos en el ducto que lleva los gases calientes desde el horno al precalenador. Una característica común a todos los sistemas de precalcinadores es la de dividir la entrada

de combustible entre dos unidades de quemadores, una en el horno y otra en los precalentadores de suspensión, principio que se representa esquemáticamente en la Figura 1-a (Taylor et al, 1997).

El proceso presenta la gran ventaja de permitir el uso de combustible de bajo poder calorífico y de alto contenido de cenizas para su quema en el precalcinador, (Labahn & Kohlhaas, 1985).

La Figura 1-1b, muestra el diseño principal del precalcinador de bajo NOx. El calcinador tiene dos quemadores con diferentes funciones, y la harina del ciclón que proviene de la etapa 3 se divide para introducirla en dos puntos separados. El quemador principal del calcinador distribuye la mayor parte del combustible dentro de la porción de aire fresco del calcinador. El segundo quemador (de bajo NOx) alimenta el combustible exclusivamente en los gases de escape del horno. Los gases de escape del horno contienen el NOx formado a altas temperaturas en el horno (Tecnologías limpias, 2016).

**Figura 1-1:** Diagrama ilustrativo del principio de (a) Calcificación, (b) Precalcalinador de bajo NOx (c) precalentador/precalcalinador de varias etapas (Tecnologías limpias, 2016).



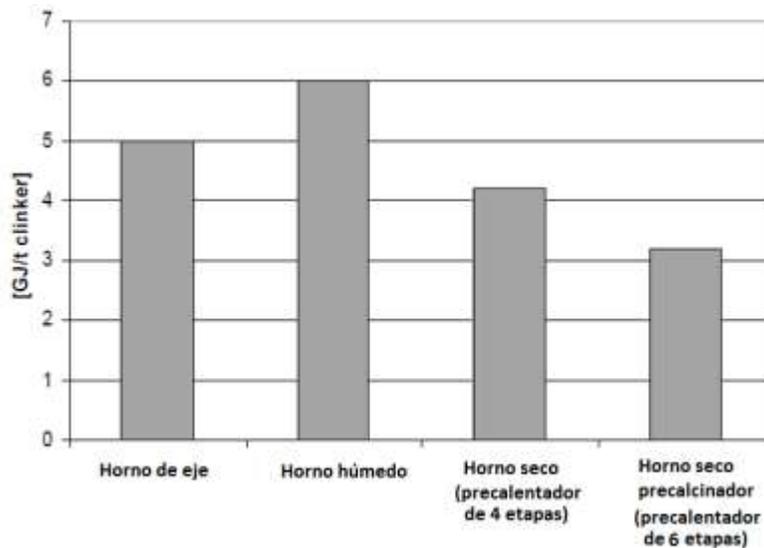
**• Ahorro de energía y otros beneficios del precalentador - precalcalinador**

Alrededor de la década de 1980, los sistemas de precalcificación tenían sólo 4 etapas de precalentamiento con alta temperatura en los gases de escape, así como alto consumo de combustible. Donde la humedad natural de la materia prima es menor o igual al 10 %, los precalentadores de seis etapas pueden ser la opción preferida (Joint research centre, 2013). Los hornos eficientes que poseen precalentador, precalcalinador de 6 etapas usan aproximadamente 3,0 GJ de energía por tonelada de clinker (t). El consumo típico de energía de un horno con 4 ó 5 etapas de precalentamiento puede variar entre 3,2 y 3,5 GJ/t mientras que un horno húmedo usa de 5.3 a 7.1 GJ/t. El consumo específico de

hornos con etapas de precalentamiento es menor hasta un 30 % comparado con el consumo de horno húmedo (Worrell et al, 2000).

En la Figura 1-1c se muestra en conjunto el horno con precalentador y precalcinador de varias etapas. En la Figura 1-2 se observa el consumo de energía por tonelada de clinker para varias tecnologías de producción de cemento incluyendo la de horno seco con precalcinador (Taylor et al, 2006).

**Figura 1-2:** Consumo específico de varias tecnologías de producción de cemento (Taylor et al, 2006).



Los valores graficados muestran como la implementación de 6 etapas en el horno seco reduce el consumo energético hasta un 23,8 % en comparación con el horno seco con 4 etapas, un 36 % comparándolo con el horno de eje y un 47 % en comparación con el horno húmedo (Taylor et al, 2006).

El sistema de precalcinación tiene las siguientes ventajas:

- Carbonato de calcio: está presente como impureza de la arcilla, no siendo necesario añadirlo, además acelera las reacciones que ocurren durante la cocción.

- El crudo entra prácticamente calcinado al horno (90-95%) y, por tanto la longitud del horno rotativo se reducirá. Esto exige un menor terreno para su instalación. La superficie en planta necesaria para la construcción, así se reduce en un 25% (Taylor et al, 2006).
- La reacción de calcinación:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ , en el precalcinador, se realiza en pocos segundos (2 segundos, aproximadamente) con lo que se reducirá el tiempo de fabricación, lo que implica un aumento de la producción.
- El proceso de combustión en el precalcinador se realiza a una temperatura más baja que en la zona de clinkerización del horno rotatorio. De ello resulta que la proporción de combustible quemado en el precalcinador da lugar a una menor formación de óxidos de nitrógeno (NOx). Por este motivo pueden quemarse combustibles de bajo poder calorífico (peor calidad) más económicos. Por otra parte, los óxidos de nitrógeno contenidos en los gases que salen del horno se reducen, ya que en este sólo se quema el 40% del combustible (Tobergte & Curtis, 2013).

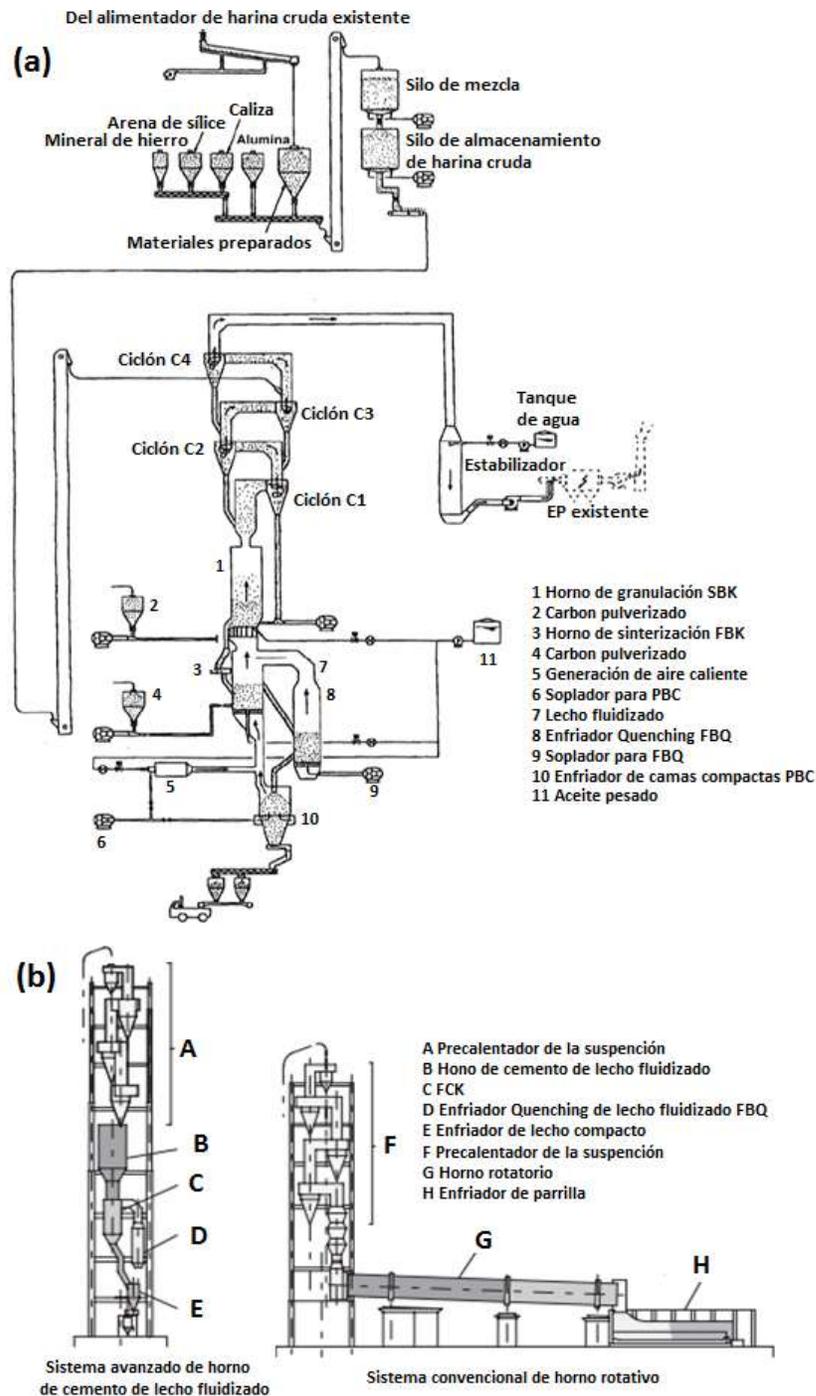
- **Hornos de lecho fluidizado**

El horno de lecho fluidizado HLF es un concepto nuevo para la producción de clínker. Los avances en la tecnología HLF comenzaron a principios de los años 50s. Hoy los avances tienen lugar principalmente en Japón y los EE.UU. En un Horno de lecho fluidizado el horno convencional se sustituye por un recipiente cilíndrico vertical fijo, en el que las materias primas se calcinan en un lecho fluidizado. Un desbordamiento en la parte superior del reactor regula la transferencia de clínker a la zona de enfriamiento. Las ventajas (esperadas) de la tecnología HLF son menor costo de capital debido a un equipo más pequeño, temperaturas más bajas lo cual significa menores emisiones de NOx, amplia variedad de combustibles que se pueden utilizar, así como un menor consumo de energía (2,9 a 3,35 GJ/t clínker) ( Hendriks et al, 2002; Energy star, 2013)

Un diseño de HLF realizado por Kawasaki utiliza precalentador de ciclón, un horno precalcinador y un horno de lecho fluidizado (Energy star, 2013). Una planta piloto con HLF y capacidad de 20 t clínker/día fue operada durante seis años, entre 1989 y 1995, por Sumitomo Osaka Cement Co en Japón. La configuración de esta planta se muestra en la Figura 1-3. El sistema consta de un precalentador de suspensión, horno surtidor de granulación (SBK), horno de lecho fluidizado (FBK), enfriador rápido de lecho fluidizado (FBQ) y enfriador de lecho compacto (PBC) (Joint research centre, 2013; Yuko et al, 2000).

El uso de energía utilizando HLF se espera que sea un 10-15% menor en comparación con los hornos rotativos convencionales, y 10-12% menor en comparación con los hornos de precalentamiento de suspensión equipados con enfriador de parrilla. El clínker producido en horno de lecho fluidizado es de la misma o mejor calidad que el clínker de una planta comercial. Las emisiones de NO<sub>x</sub> son de 115 a 190 mg/Nm<sup>3</sup> cuando se utiliza aceite pesado y de 440 a 515 mg/Nm<sup>3</sup> se utiliza carbón pulverizado como combustible (convertido a 10% de O<sub>2</sub>). Estas emisiones se pueden reducir a 1,7 libras/t, (planta piloto) en comparación con 4,6 libras/t - 5,8 libras/t de una planta convencional (Energy star, 2013).

**Figura 1-3:** Horno de lecho fluidizado (a) Planta piloto (b) esquema general (Energy star, 2013).



En la Tabla 1-3 se muestra una comparación de rendimiento entre la tecnología convencional de horno rotatorio y la tecnología HLF (proyecto de demostración) en términos de mejora del medio ambiente (Cement sustainability initiative, 2009)

**Tabla 1-3:** Comparación entre horno rotatorio convencional y horno de lecho fluidizado (Cement sustainability initiative, 2009).

N°	Parámetro	Horno rotatorio	Horno lecho fluidizado
1	Producción de clínker (t/día)	1000	1000
2	Consumo de energía eléctrica específica (kWh/ t clínker)	27	36
3	Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/Nm <sup>3</sup> )	245	220
4	Emisiones de CO <sub>2</sub> (kg/ t clínker)	357	327
5	Emisiones de NO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	708	476
6	Flujo de gases de escape (Nm <sup>3</sup> /kg clínker)	1,46	1,49

Se estima que el costo de los sistemas de lecho fluidizado será equivalente al 88% de los costos de inversión de una instalación moderna de cemento. Los costos de operación serán equivalentes al 75% de los costos de la una planta moderna (Cement industry federation, 2005).

## 1.5 Tecnologías empleadas para la producción de cerámicos

Para la producción de cerámicos son empleados distintos tipos de hornos, los cuales difieren en su consumo específico basados en su diseño y costo de implementación. A continuación se muestran los tipos de hornos clasificados de menor a mayor consumo específico en MJ/ton en la Tabla 1-4 (UNAD, 2011).

**Tabla 1-4:** Tipos de hornos y consumos específicos, (UNAD, 2011)

TIPO DE HORNO	Consumo específico en MJ/ton de arcilla
Vertical VSBK	1,2
BTK (chimenea fija)	1,4
BTK (chimenea móvil)	1,6
Rodillos	1,62
Túnel	1,64
Hoffmann	1,9
Hoffmann sin techo	2,2
Vagón	2,8
Zigzag	2,7
Semicontinuo	3,85
colmena	4,6
Baúl	4,85
Fuego dormido	5,34
Pompa (Árabe)	5,36

### • Quemadores de tubo radiante

Los quemadores recuperativos de tubo radiante, consisten en un tubo hecho de una aleación metálica especial que tiene propiedades como baja dilatación térmica y sobre todo una gran capacidad de irradiar calor. La combustión del gas natural se lleva a cabo dentro del tubo, el cual absorbe esa energía y debido a sus propiedades térmicas la emite en forma de radiación infrarroja. Son ampliamente utilizados en hornos de tratamiento térmico industriales. Una característica clave del diseño es que los productos de combustión se hacen circular dentro del quemador, de ese modo, el precalentamiento del aire de combustión y distribución del calor se logra de manera uniforme sobre la superficie del tubo radiante.

Si el calor residual de los gases de combustión no se recupera, la eficiencia de los tubos radiantes es baja (entre 40 y 50 %), por otra parte, si el calor de los gases de combustión se utiliza para precalentar el aire y el combustible a la entrada, se pueden lograr eficiencias entre el 75 y 90 %, dependiendo de la temperatura a la cual salgan los gases de combustión después de la zona de recuperación de calor.

### **1.5.1 Cocción**

La etapa de cocción es la más importante del ciclo productivo. El proceso de cocción es un proceso complejo, en el que se da lugar a diversas transformaciones, tanto físicas como químicas, que confieren al producto final las propiedades mecánicas y estéticas deseadas.

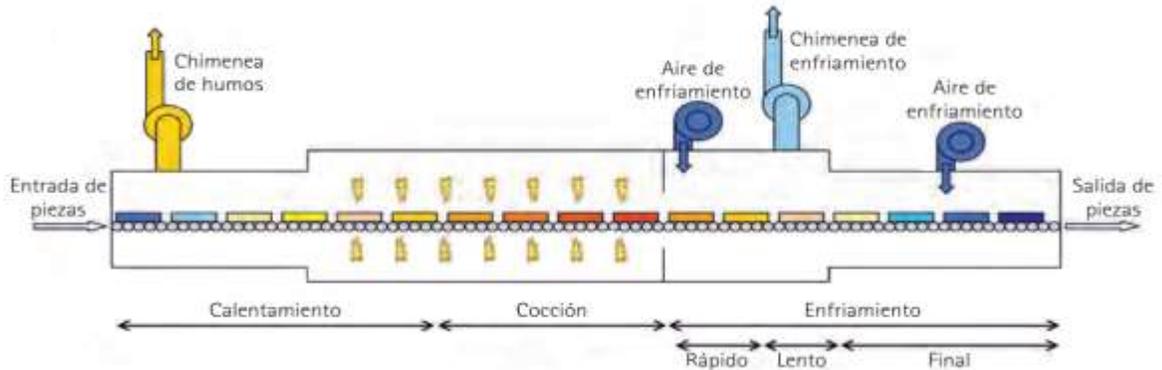
Cuando la cocción del soporte y el esmalte se realizan simultáneamente, el proceso recibe el nombre de monococción. Si, por el contrario, se cuece primero el soporte y después el esmalte, el proceso se denomina bicocción. En el proceso de monococción, el soporte obtenido por prensado, ya esmaltado y decorado, se cuece en hornos continuos de rodillos, la duración del ciclo depende del tamaño de las baldosas, capacidad de producción del horno, tipo de soporte y del recubrimiento entre otros, en general, se sitúa entre 40 y 70 minutos y la temperatura máxima de cocción está alrededor de 1100 y 1200°C.

En el proceso de bicocción, tanto el soporte como las piezas esmaltadas, se cuecen en hornos continuos de rodillos, similares a los utilizados en el proceso de monococción. En ocasiones, cuando el producto fabricado se moldea por extrusión, los hornos utilizados en la cocción son hornos túnel, en los que el material avanza por su interior apilado en vagonetas. La energía consumida durante la cocción es principalmente energía térmica y el aporte de calor al proceso se realiza por la combustión de gas natural en quemadores de alta velocidad.

- **Horno túnel de rodillos**

La mayoría de la producción de baldosas cerámicas se cuece actualmente en hornos continuos de rodillos. Estos hornos están constituidos por una cámara con uno o dos planos de rodillos de material refractario por el que circulan las piezas desde un extremo al otro. La longitud del horno es variable y depende de la capacidad productiva de éste, aunque suelen medir alrededor de 100 m. En la Figura 1- se esquematiza un horno de rodillos.

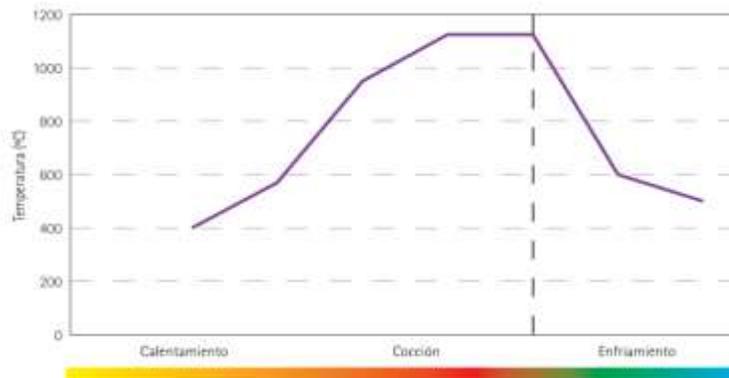
**Figura 1-4:** Esquema horno túnel de rodillos



La etapa de cocción es determinante en la fabricación de baldosas cerámicas, porque dependiendo de las reacciones que se producen durante la cocción, se determinan en gran medida las características finales, para evitar defectos en el producto, es necesario que las reacciones de cocción se produzcan de forma gradual, de acuerdo con un plan previamente establecido que se conoce con el nombre de “curva de cocción”, en el que se establece la variación de la temperatura con respecto al tiempo.

En la Figura 1- se ilustra un ejemplo de la curva de cocción que deben seguir los productos cerámicos, este tipo de perfil de temperatura garantiza que no se produzcan gradientes excesivos dentro de las piezas evitando de esta manera defectos o agrietamientos.

**Figura 1-5:** Curva de cocción típica



Dentro del horno se pueden distinguir varias zonas, que cumplen cada una un papel importante dentro de la cocción:

- **Zona de calentamiento:** durante esta etapa se produce la desgasificación del cuerpo cerámico, para que luego en la fase de máxima temperatura o de cocción no aparezcan defectos en el producto como hinchamientos, burbujas, porosidad del esmalte o tonos.
- **Zona de máxima temperatura:** es principalmente en esta zona donde la cerámica adquiere las características físicas y estéticas finales (dimensiones, planaridad, tono, entre otras). Esta zona, al igual que la de calentamiento, está dotada de quemadores alojados en las paredes laterales del horno. El final de la zona de cocción está delimitado por una barrera física, constituida por un muro transversal que secciona el canal de cocción por encima y por debajo del plano de rodillos. De este modo se controla la influencia sobre la zona de cocción de la posterior zona de enfriamiento.
- **Zona de enfriamiento rápido:** en el enfriamiento rápido, un conjunto de conductos con numerosas perforaciones que introducen aire frío por encima y por debajo del plano de los rodillos. El objetivo es disminuir la temperatura de las piezas una vez se ha completado la cocción (desde la temperatura máxima hasta unos 600 °C), justo por encima de la temperatura a la que se produce la transformación alotrópica del cuarzo.
- **Zona de enfriamiento lento:** es la zona en la que se produce la transformación del cuarzo beta a cuarzo alfa (573 °C). Con esta transformación se produce una contracción de la baldosa cerámica, por lo que es necesario que se produzca de forma homogénea para evitar tensiones que podrían derivar en roturas. El intervalo de temperaturas correspondientes a la zona de enfriamiento lento está comprendido entre 600 y 450 °C. El intercambio de calor se produce de manera indirecta, es decir,

el aire frío no entra en contacto con las piezas, sino que circula a través de unos tubos ubicados en esta zona del horno.

- **Zona de enfriamiento final:** en esta zona el objetivo es reducir al máximo la temperatura del producto, una vez superado el punto crítico de la transformación del cuarzo, un sistema de soplado de aire frío introduce aire a temperatura ambiente por encima y por debajo del plano de los rodillos.

El consumo energético depende del volumen de producción, tipo de producto, de la tecnología utilizada, del grado de automatización del proceso productivo, y de la gestión de la producción llevada a cabo por la empresa. En la información del Anexo A se reportan varias tecnologías junto con sus consumos energéticos.

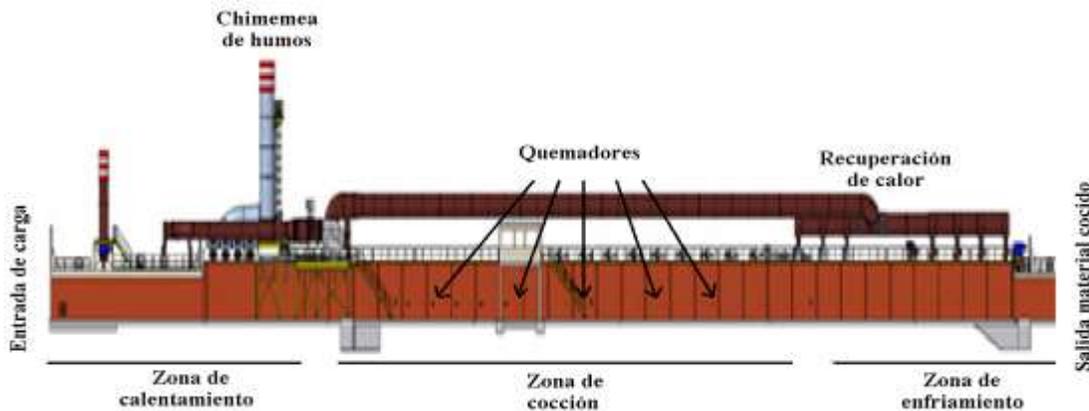
En general, el proceso de fabricación de baldosas cerámicas consume más energía térmica que eléctrica. Los valores medios obtenidos indican que el 90 % de la energía consumida corresponde a energía térmica y el restante 10 %, corresponde al consumo de energía eléctrica, en el caso de cocción de baldosas cerámicas en hornos de rodillos monococción se reportan consumos específicos entre 1750 y 1880 MJ/t de producto.

- **Horno túnel de vagonetas**

Los hornos túnel de vagonetas son sistemas de cocción continua, en ellos al igual que en los hornos de rodillos la carga se mueve mientras que la zona de cocción es fija, el producto cerámico que se va a cocer se coloca en vagonetas que recorren lentamente la galería desde un extremo al otro. Las vagonetas cargadas llenan casi por completo el interior del horno y circulan sobre rieles, a intervalos regulares se introduce una vagoneta de producto crudo y se extrae otra de producto cocido. El movimiento de las vagonetas en el interior del horno es continuo y uniforme.

En la Figura 1- se esquematiza un horno túnel de vagonetas para cocción de cerámica, se puede apreciar que en esta configuración la recuperación de calor de la zona de enfriamiento se utiliza dentro del mismo horno para aumentar la temperatura de la zona de calentamiento.

**Figura 1-6:** Esquema del horno túnel de vagonetas



Al igual que en los hornos de rodillos se distinguen tres zonas principales dentro del horno túnel, precalentamiento, cocción y enfriamiento; estas cumplen un papel distintivo debido a que permiten con el control de la temperatura obtener la curva de cocción más adecuada para cada uno de los materiales a cocer.

En términos generales para los hornos túnel de vagonetas se reportan consumos específicos mayores a los reportados para hornos de rodillos, siendo así una de las tecnologías más empleadas en la industria debido a ventajas como:

- Posibilidad de recuperación de calor ya sea en la corriente de enfriamiento o en los gases de combustión.
- Flexibilidad en el tipo de combustible alimentado.
- Mejor control de temperatura y curva de cocción.
- Es aplicable a diferentes tipos de materia prima y formatos de producto (teja, ladrillo, baldosa entre otros).

- Mayor velocidad de producción.

En términos de consumo energético para monococción de azulejos se reporta que esta entre 1800 y 2000 MJ/t. Los hornos túnel de rodillos junto con los hornos de vagonetas, son consideradas las tecnologías de mayor eficiencia energética en la actualidad, en ella existen varias fuentes de recuperación de calor que permiten ser aprovechados en el proceso. Por ejemplo, el calor de refrigeración de la zona de enfriamiento, sale en forma de una corriente de aire entre 100 y 120 °C, que se puede aprovechar en el pre-horno (si existe) o puede ser enviado a las cámaras de secado o mezclándolo con el aire de recuperación directa, o aprovecharse como aire de combustión en las boquillas del horno.

### **1.5.2 Nuevas tecnologías y configuraciones en gasificación**

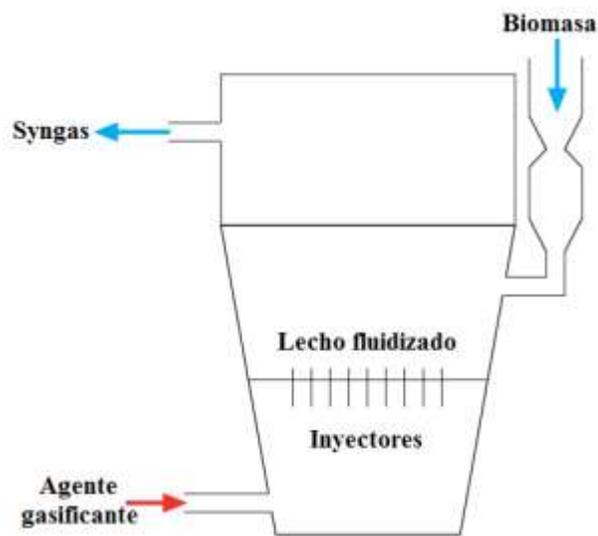
El potencial que tiene esta tecnología para producir combustibles de alto contenido calórico hace que se despierte el interés de muchos países por desarrollar y poner en marcha plantas de gasificación de carbón y biomasa con capacidades entre 7000 y 8000 t/año, suficiente para alimentar un generador eléctrico. En España, donde la principal fuente de biomasa es de origen forestal se están desarrollando prototipos como los siguientes:

- **Lecho fluidizado de presión compensada**

La empresa que desarrolla esta tecnología dispone de una instalación completa de gasificación y generación eléctrica a partir de syngas en un motor-alternador. La planta posee la posibilidad de adaptarse a cualquier tipo de material que se desee gasificar, las biomásas de mayor uso son cascarillas de frutos secos, astillas de maderas, reciclaje de muebles, residuos forestales, entre otros.

Antes de ingresar la biomasa al reactor se tritura dentro de un molino que homogeniza la granulometría, luego se alimenta al horno por medio de dos tolvas dotadas con válvulas anti-retorno para evitar el ingreso de aire al gasificador como se muestra en la Figura 1-.

**Figura 1-7:** Esquema gasificador de lecho



El gas de síntesis obtenido es enfriado en un intercambiador de calor a la salida del reactor, el calor desprendido por la gasificación es utilizado para precalentamiento del agente gasificante (aire), el syngas pasa por un sistema de filtrado que separa agua, naftalenos y ceniza arrastrada por la corriente. Luego de eso el gas de síntesis está listo para alimentarse a un motor de combustión interna que genera energía.

Una de las principales ventajas de esta configuración es la no aparición de alquitranes en el gas de síntesis, debido principalmente al diseño del equipo y a la forma en que se llevan a cabo las reacciones.

## **1.6 Revisión de estudios de barreras para la eficiencia energética en sectores industriales**

Varios investigadores han examinado empíricamente las barreras para la eficiencia energética (ver Tabla 1-5). Estos estudios se centran en diferentes temas, incluyendo la clasificación de diferentes barreras, el análisis de los factores que las afectan, su origen y algunas recomendaciones para hacerles frente. Por ejemplo, Trianni & Cagno, (2012) a través de una encuesta de 48 PYMES manufactureras en el norte de Italia, encontraron que las PYMES encuestadas perciben las barreras económicas y de información como los principales obstáculos para la adopción de tecnologías para la eficiencia energética, mientras que las barreras de comportamiento no parecen afectar mucho a dichas empresas. Por otra parte, en un estudio de casos múltiple de 98 empresas industriales llevado por Zhang Z, Jin X, Yang Q, (2013) en China, se identifican 17 barreras, clasificándolas en cuatro categorías (estructurales, normativas, culturales y contextuales) y se concluye que la falta de incentivos financieros es la barrera más común a través de las empresas. Otros estudios mixtos que utilizan encuestas y entrevistas semiestructuradas han sido llevados a cabo, tal es el caso de Kostka, Moslener, & Andreas, (2013) basado en 12 entrevistas y una encuesta de 480 PYMES, en el que se indica que las barreras de información son los principales obstáculos para las PYMES de Zhejiang, China.

**Tabla 1-5:** Encuestas y estudios de casos sobre la investigación de las barreras para la eficiencia energética (Brunke et al,2014)

<b>Tipo de estudio</b>	<b>Sector</b>	<b>País</b>	<b>Categoría de las barreras</b>	<b>Principales barreras encontradas</b>	<b>Referencia</b>
Encuesta	Químicos, metales básicos, productos metálicos, horticultura, alimentos, papel	Países bajos	General, Financiera, Incertidumbre, Relacionada con el mercado, Relacionada con las políticas.	Otras inversiones más importantes, la tecnología sólo puede llevarse a cabo después de que la tecnología existente ha sido reemplazada, los costos de energía no son lo suficientemente importantes.	(Groot et al, 2001)
Estudio de caso	PYMES manufactureras	EEUU	Económica, institucional, Financiación.	Costo inicial alto, falta de personal para el análisis / ejecución, el flujo de caja impide la ejecución.	(Anderson & Newell, 2004)
Estudio de caso	Empresas Manufactureras de baja intensidad energética	Suecia	Barreras de mercado económico, fallas de mercado, de comportamiento, de organización.	Costo de interrupción de la producción / problemas / inconvenientes, la falta de tiempo u otras prioridades, el costo de la obtención de información sobre el consumo energético de los equipos adquiridos.	(Rohdin & Thollander, 2006)
Estudio de caso	Fundición	Suecia	Económica, de comportamiento, de organización.	El acceso al capital, los riesgos técnicos tales como el riesgo de interrupciones en la producción, la falta de fondos de presupuesto.	(Rohdin et al, 2007)
Estudio de caso	Pulpa y papel	Suecia	Relacionada con el mercado, de	Riesgos técnicos tales como el riesgo de interrupciones en la	(Thollander & Ottosson, 2008)

			comportamiento, de organización.	producción, costo de la interrupción de la producción / problemas / inconvenientes, la tecnología de los molinos es inapropiada	
Encuesta	PYMES	China	Barreras de política y mercado, financieros y económicos, técnicos y de información, de gestión y organización	Alto costo de capital inicial, la ausencia de políticas de incentivos económicos, carece de aplicación ambiental.	(Shi et al., 2008)
Encuesta	Metales, maquinaria, alimentos / bebidas, productos químicos, papel, textiles	Grecia	Los factores financieros y de mercado, organizativos y humanos	Los procedimientos burocráticos para obtener apoyo financiero del gobierno, el acceso limitado al capital, aumento en el costo percibido de las medidas de eficiencia energética.	(Sardianou, 2008)
Estudio de caso	Petroquímicos	Organización para la cooperación y el desarrollo económico	Ninguna	Escasez de personal y el tiempo, la competencia de otros proyectos a priorizar, condiciones económicas desfavorables.	(Ren, 2009)
Estudio de caso	Industria Química	Países Bajos	Económica, socio-económica, tecnológica	Restricciones presupuestarias y prioridades de inversión, reglas de toma de decisiones de inversión, la	(Currás, 2010)

tecnología ajustable en el proceso actual					
Estudio de caso	Industria del hierro y acero	Japón	Políticas económicas y reglamentos nacionales inadecuados, cuestiones tecnológicas, Otros	Otra prioridad para la inversión financiera, políticas y reglamentos nacionales inadecuados, la tecnología no es aplicable para el procesamiento.	(Okazaki & Yamaguchi, 2011)
Encuesta	PYMES	Alemania	Información imperfecta, los costos ocultos, el riesgo, el acceso al capital, los incentivos divididos.	Los costes de inversión demasiado alta, otras inversiones tienen mayor prioridad, medir no es rentable.	(Fleiter et al, 2012)
Encuesta	PYMES manufactureras de baja intensidad energética	Norte de Italia	Habilidades, Recursos de Información, Sensibilización	El acceso al capital, escasa información sobre las oportunidades de eficiencia energética, mala información de las decisiones de eficiencia energética.	(Trianni & Cagno, 2012)
Encuesta	Fundición	Finlandia, Francia, Alemania, Italia, Polonia, España y Suecia	Barreras de mercado económico, fallas de mercado, de comportamiento, de organización.	La falta de fondos de presupuesto, otras prioridades para las inversiones de capital, la falta de tiempo u otras prioridades	(Trianni et al., 2013a)
Estudio de	PYMES	Norte de Italia	Relacionada con la	Temas de información sobre los	(Trianni et al.,

casos múltiple	manufactureras de metales primarios		tecnología, información, Económico, del comportamiento, de organización, en relacionada con las competencias, conciencia.	contratos de energía, falta de interés en las intervenciones de eficiencia energética, costes ocultos	2013b)
Estudio de casos	PYMES manufactureras	Norte de Italia	Relacionada con la tecnología, información, Económico, del comportamiento, de organización, en relacionada con las competencias, conciencia.	Los costos de inversión, temas de información sobre los contratos de energía, los costes ocultos.	(Trianni et al., 2013)
Estudio de casos	Industrias seleccionadas (hierro y acero, de aluminio, de alimentos, plásticos, productos químicos)	Ghana, África	El acceso al capital, costes ocultos, heterogeneidad, Riesgo, información imperfecta, división de incentivos.	La falta de fondos de presupuesto, el acceso al capital, otras prioridades para la inversión de capital	(Wentemi & Thollander, 2013)
Estudio de casos múltiple	Cerámica, cemento, cal	Bélgica	Los costos ocultos, el riesgo y la incertidumbre, la	Otras prioridades para las inversiones de capital, costos ocultos, la viabilidad técnica no se	(Venmans, 2014)

---

información imperfecta, los incentivos divididos, presupuesto de capital.

---

ha estudiado antes

Sin duda, la comparación de los resultados entre los estudios es un poco compleja ya que aparte de la aplicación de diferentes metodologías, estos difieren según el país, el tiempo, el sector, las tecnologías y las barreras consideradas. Sin embargo, muchos de los estudios mencionados anteriormente, encuentran que las PYMES tienden a enfrentar más barreras a la adopción de las medidas para la eficiencia energética que las grandes empresas. En general, las barreras más frecuentes para las PYMES parecen ser la falta de capital, la falta de información, la falta de tiempo del personal y el riesgo de interrupción de la producción.

En resumen, los resultados de los estudios de casos y encuestas dan a entender que la adopción corporativa de las medidas para la eficiencia energética, depende de una gran variedad de factores interdependientes, incluidas las barreras específicas, las características de la empresa y las medidas mismas a considerar, así como también de factores externos más amplios como la estructura del mercado o la accesibilidad al capital externo.



## **2. Metodología**

### **2.1 Consolidación de la muestra**

El consolidado de la muestra tuvo como propósito dar cumplimiento al primer objetivo específico, el cual fue identificar los sectores industriales que requieran en su proceso productivo un rango de temperatura igual o mayor al establecido, y la cantidad de empresas ubicadas en las regiones centro, suroccidente, noroccidente y norte de Colombia, para concretar la muestra a intervenir en el proyecto.

#### **2.1.1 Identificación de sectores productivos con temperaturas iguales o superiores a 400°C**

Se realizó la búsqueda en bases de datos de los procesos industriales que utilizan temperaturas iguales o mayores a 400°C para sus procesos, clasificándose en orden descendente por su magnitud en consumo energético de la siguiente forma:

- Cemento: rangos de temperatura entre 1350 y 1450°C para la calcinación de Clinker.
- Vidrio: rangos de temperatura de 1450°C para realizar la fusión de las materias primas.
- Cerámicos: rangos de temperatura entre 800 y 1400°C para el curado de las piezas.
- Ladrillo y tejares: rangos de temperatura entre 800 y 960°C para el curado de las piezas.
- Metalúrgico: ferroso y no ferroso: rangos de temperatura desde 400 a 1600°C para fundir los metales.

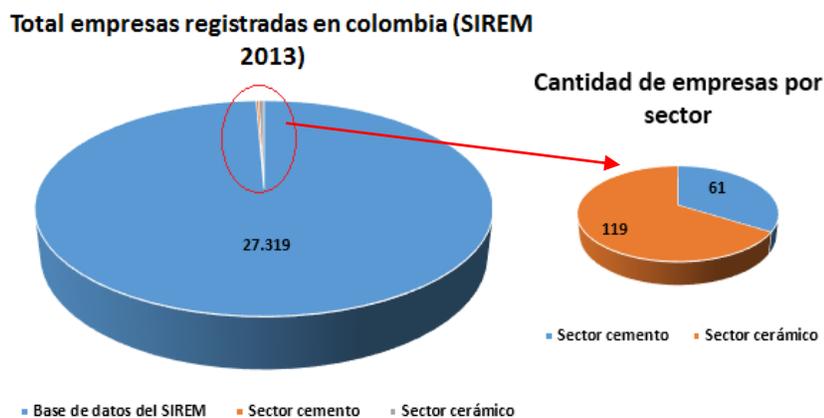
- Cal: rango de temperatura entre 800 y 860°C para que reaccione la piedra caliza en óxido de calcio.
- Petroquímico: rangos de temperatura entre 400 y 800°C dependiendo del método a utilizar, ya sea craqueo catalítico o craqueo térmico.
- Químico: rango de temperatura entre 450 y 500°C.

Habiendo identificado los sectores que cumplen con el rango de temperatura establecido, se seleccionaron dos sectores, los cuales pertenecen al proceso de minerales no metálicos como son la fabricación de cemento y cerámicos, quedando definidos como los sectores a intervenir en este estudio.

### 2.1.2 Cantidad de empresas por sectores en las zonas centro, suroccidente, noroccidente y norte de Colombia

Utilizando la base de datos del sistema de información y reporte empresarial (SIREM, 2013), se procedió a filtrar la cantidad de empresas pertenecientes a los dos sectores anteriormente seleccionados y registrados en Colombia, utilizando los códigos CIIU: 2694 equivalente al nuevo código CIIU 2394, (Fabricación de cemento, cal y yeso) y el código CIIU 2693 equivalente al nuevo código CIIU 2393 (Fabricación de otros productos de cerámica y porcelana). Los resultados de esta búsqueda se resumen en la Figura 2-1.

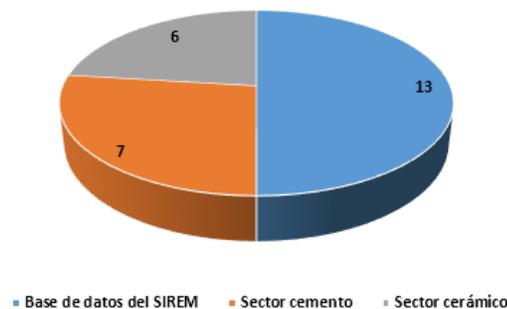
**Figura 2-1:** Detalle de la cantidad de empresas pertenecientes a los sectores de cemento y cerámica (SIREM, 2013).



Adicionalmente, se procedió a realizar filtros basados en fabricantes del producto base y no la totalidad de empresas contempladas dentro del código CIIU, debido a que este tipo

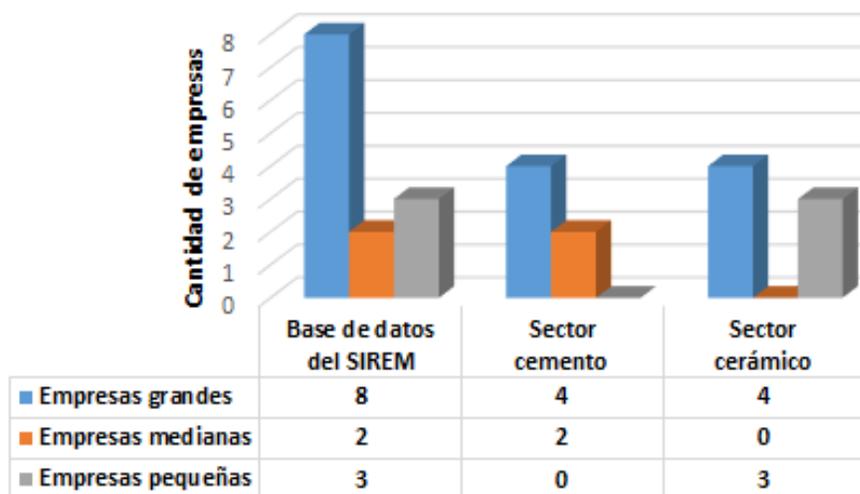
de clasificación es muy general. En la Figura 2-2 se muestra la cantidad de empresas fabricantes del producto básico para los sectores seleccionados en este estudio, identificando a las empresas del sector cerámico con el color gris, a las empresas del sector cemento con el color naranja y el total de empresas de ambos sectores registradas en la base de datos del SIREM con el color azul.

**Figura 2-2:** Fabricantes del producto básico en los sectores cemento y cerámico (SIREM, 2013).



Posteriormente se aplicaron otros filtros, dentro de ellos se tiene el tamaño de las empresas definido por la cantidad de activos o trabajadores, donde se demarcan las empresas grandes en la gráfica de barras con el color azul, las empresas medianas con el color naranja y las pequeñas empresas con el color gris como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

**Figura 2-3:** Filtro por tamaño de empresas



La Ubicación geográfica seleccionada para la intervención del proyecto estuvo delimitada a tres regiones de Colombia, las cuales fueron:

La zona centro, la cual abarcó al departamento de Cundinamarca.

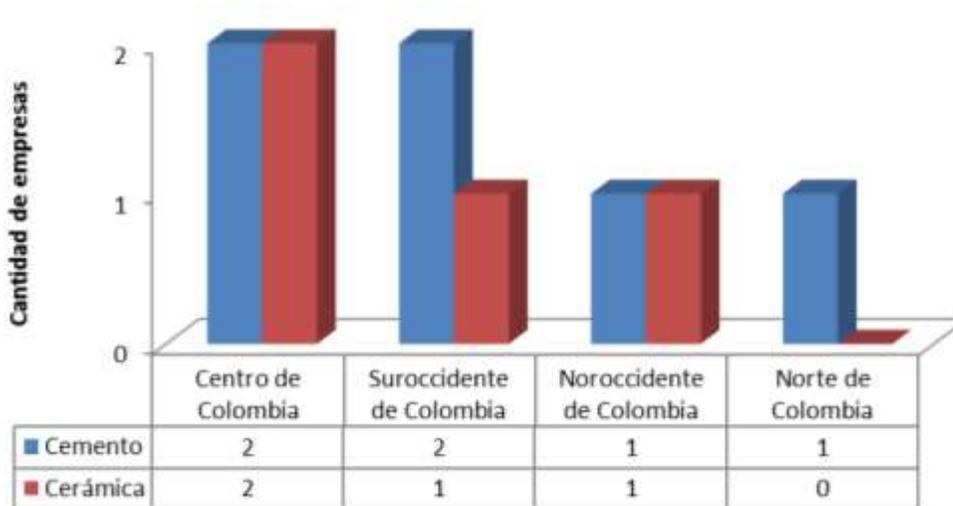
La zona suroccidente, la cual abarcó al departamento de Antioquia

La zona noroccidente, la cual abarcó al departamento del Valle.

La zona norte, la cual abarcó el departamento de Bolívar.

En la Figura 2-4 se muestra una gráfica de barras con la cantidad de empresas por sector en cada zona seleccionada, representando el sector cemento con el color azul y al sector cerámico con el color naranja.

**Figura 2-4.** Filtro por regiones seleccionadas



Finalmente, considerando el alcance del proyecto, se concretó la cantidad de empresas a intervenir para cada sector, teniendo en cuenta la aceptación a participar en el proyecto por las empresas seleccionadas en cada región, como se muestra en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Muestra seleccionada y porcentaje representativo

Ubicación	Empresas seleccionadas		Total empresas
	Cemento	Cerámica	
Centro	1	1	2
Suroccidente	1	1	2
Noroccidente	1	1	2
Norte	1	0	1
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>7</b>

## 2.2 Identificación de brechas y barreras

En la identificación de brechas se plantearon tres brechas fundamentales, las cuales albergaron la forma de pensar de los empresarios en relación con la migración tecnológica, las tecnologías de punta en el mundo versus las utilizadas por las empresas intervenidas, y la influencia de la normatividad ambiental en Colombia en comparación con las normativas ambientales regulatorias de los países utilizados como muestra representativa para este estudio.

### 2.2.1 Brechas y barreras tecnológicas

Para establecer las brechas tecnológicas en las empresas seleccionadas, se recurrió a la realización de un diagnóstico energético basado en el procedimiento establecido por la norma ISO 13579-1, con el cual se determinan los parámetros de medición específicos dependientes de la tecnología utilizada en cada sector productivo, sin omitir la diferencia de los procesos adaptados por cada empresa perteneciente al mismo sector.

En la realización de los diagnósticos se realizaron las siguientes mediciones para identificar las principales variables que influyen en el desempeño energético de los equipos de alta temperatura:

- Composición y temperatura de los gases de combustión usando un analizador de gases portátil marca Bacharach PCA3.
- Temperaturas de pared por medio de un pirómetro marca Fluke 568 y una cámara termográfica marca Flir E40.
- Temperatura ambiente utilizando un termohigrómetro marca CEM modelo DT-171.

Para establecer el estado de las tecnologías utilizadas por las plantas estudiadas, se hizo un análisis de obsolescencia tecnológica, teniendo en cuenta los siguientes criterios: tipo de tecnología para precalentamiento, clinkerización y enfriamiento, año de fabricación, implementación de recuperación de calores residuales, sistemas de control de proceso y de combustión y si el equipo ha sido repotenciado o no. Estos factores permiten identificar el rezago tecnológico de los equipos encontrados en el sector con respecto a las tecnologías más modernas. Cada uno de los criterios fue ponderado por un panel de expertos con un valor entre 1 y 10, siendo 10 el sistema más obsoleto y 1 el más moderno, con base en la revisión bibliográfica de las últimas tecnologías disponibles para la industria cementera.

Para identificar las tendencias mundiales en tecnología de punta y eficiencia energética en los procesos de la industria del cemento y cerámica, se realizó la búsqueda de información en reportes científicos, empresariales y gubernamentales en bases de datos y catálogos empresariales, tales como: ScienceDirect, Scopus, Google Academic, SciELO, LSmit, EPA y BREF, con el fin de identificar cuáles son los países con menor consumo específico en el mundo, y a su vez identificar cuáles son los mayores productores dentro de los sectores seleccionados.

### **2.2.2 Brechas y barreras comportamentales**

Para identificar las brechas comportamentales teniendo en cuenta que son una propiedad cualitativa y no cuantitativa, requirió de otra técnica, la cual se basó en el diseño estratégico propio de una encuesta taxonómica basada en estudios realizados en otros países por Cagno y Trianni, (2014).

A continuación se hará una breve descripción de cada brecha según la clasificación presentada por Thollander y Palm, (2013b):

- **Información imperfecta:** Esta barrera ocurre cuando los consumidores están a menudo mal informados acerca de las tecnologías energéticamente eficientes disponibles o cuando el rendimiento energético de estas tecnologías no está disponible.

- **Selección adversa:** Esta barrera surge cuando los productores de tecnologías para la eficiencia energética están mejor informados de las características y funcionamiento de las tecnologías ofrecidas en comparación con los compradores potenciales.
- **Relaciones jefe-empleado:** Esta barrera se presenta debido a la falta de confianza entre las dos partes en diferentes niveles de una organización.
- **División de incentivos:** Esta se produce cuando el adoptante potencial de una inversión no es el inversionista principal. Las medidas sólo serán evaluadas si el adoptante puede recuperar el costo de la inversión de la parte en que se beneficia de los ahorros de energía.
- **Costos ocultos:** Los costos ocultos se refieren a los altos costos asociados a la adopción de una tecnología y que no se encuentran incluidos en un modelo de inversión estrecho que incluye sólo los costes reales de inversión. De acuerdo con ello, una medida para la eficiencia energética aparentemente rentable, podría no ser rentable si se incluyen los costos ocultos asociados con la inversión.
- **Acceso a capital:** En muchas compañías es difícil acceder a créditos bancarios con el fin de implementar las medidas de eficiencia energética, muchas veces el costo de tecnologías de alta eficiencia es mucho mayor a una tecnología tradicional.
- **Riesgo:** es considerado una barrera a la implementación de medidas de eficiencia energética, porque está relacionado con la incertidumbre de la recuperación de los ahorros energéticos a largo plazo, ante este tipo de medidas.
- **Heterogeneidad:** Esta barrera se presenta cuando existe una tecnología que es más rentable al momento de realizar la evaluación tecnológica, pero esta tecnología no puede ser aplicada en la empresa por su aplicación restringida

debido a la temperatura, aplicación, contaminación o algunas condiciones propias de cada proceso.

- **Forma de la información:** Se presenta cuando, debido a la forma en la que se presenta la información, afecta la atención por parte del receptor de la información; esto puede incidir de manera negativa en la toma de decisiones sobre la implementación de medidas de eficiencia energética evitando la implementación.
- **Credibilidad y confianza:** Esta barrera está asociada a la credibilidad percibida del proveedor de la información y consecuentemente la confianza en el mismo. Si una empresa no puede acceder a información precisa sobre alguna tecnología, se puede confiar más de la información disponible que sea más creíble.
- **Valores:** Esta barrera está asociado con los valores corporativos. En algunos casos, las normas y medidas que muestran un mayor impacto y que están relacionadas con eficiencia energética, son aquellas que están libres de costos (gratis).
- **Inercia:** La inercia se refiere al hecho de que el comportamiento individual y organizacional es al menos en parte, el resultado de los hábitos y las rutinas establecidas. En consecuencia, puede ser difícil promover el cambio en los comportamientos y hábitos, ya que las personas en las empresas se empeñan en reducir las incertidumbres y cambios en sus entornos, por lo tanto, tratan de evitar o ignorar los problemas.
- **Racionalidad limitada:** Esta barrera tiene dos factores de ocurrencia: 1) Cuando los intereses de un individuo o de una división pueden, por ejemplo, estar en conflicto con los intereses de otros departamentos o empleados. 2) las organizaciones e individuos no actúan sobre la base de una información completa, sino más por la toma de decisiones por "reglas de dedo".

- **Poder:** El bajo nivel de gestores energéticos puede conducir a que asuntos energéticos se les asigna una baja prioridad en las organizaciones; lo anterior, tiene que ver con el bajo poder de decisión que puede tener el personal encargado del control de la energía en una organización.
- **Cultura:** Se presenta cuando los valores fundamentales de una organización industrial pueden inhibir o promover la eficiencia energética.

Basándose en las metodologías utilizadas por Fleitera et al (2012); Apeaning et al (2013); Cagno et al (2013); Cagno y Trianni (2014); se diseñó una serie de preguntas estratégicas que permitan la recolección de información, para la identificación de barreras en diferentes modalidades, las cuales restringen la implementación de medidas de eficiencia energética. En total se formularon 34 preguntas que fueron respondidas en cada una de las 6 empresas visitadas por funcionarios encargados de la gestión de los procesos y/o gestión de la energía. Varias de estas preguntas tuvieron respuesta abierta en las que cada empresa manifestaba casos particulares en cada tipo de barrera. Esto permitió que enlazando algunas respuestas a diferentes preguntas se pudiera lograr coherencia en el diagnóstico de la empresa y tener mayor confiabilidad en los resultados. En el Anexo B se muestra el diseño de la encuesta realizada a los encargados del proceso de producción en cada empresa visitada.

Aunque varias preguntas requirieron respuesta de tipo “Si” o “No”, siempre se hizo énfasis en la explicación que cada encuestado tuvo para sustentar dicha respuesta. Cada una de estas explicaciones se analizó para validar si la situación particular constituye realmente una barrera para la empresa.

En la encuesta, varias preguntas estaban asociadas a evaluar distintos aspectos de una misma barrera. Sin embargo, algunos de estos aspectos son más relevantes que los otros para establecer dicha barrera como una limitación al mejoramiento de la eficiencia energética. Por otra parte, otras barreras sólo tuvieron una pregunta asociada debido a que constituyen factores muy concretos.

En aquellas barreras en las que existían varias preguntas se utilizó la metodología de “panel de expertos”, en la cual un grupo de conocedores en materia de uso de racional

de energía, desarrollo tecnológico en sistemas de combustión y calentamiento y procesos industriales, asignaron una ponderación de cada pregunta dependiendo de la importancia de la información que arroja la pregunta dentro de la barrera.

Para determinar cuantitativamente el efecto de cada barrera en la implementación de medidas de eficiencia energética en cada sector industrial, se calculó un factor de barrera que tiene en cuenta todas las respuestas de las empresas de cada sector, de tal manera que refleje la situación de la mayoría de las empresas diagnosticadas. El primer paso para el cálculo del factor de barrera es la codificación binaria de las respuestas en función de si estas representan una barrera o no, esto es, si la respuesta afirmativa o negativa a una pregunta hace que la información específica de esta respuesta constituya una barrera, entonces a dicha pregunta se le asigna un valor de uno (1,0), en caso contrario, esta pregunta tendrá un valor de cero (0,0) porque la información relacionada no constituye una barrera. Por ejemplo, en la barrera cultura en la categoría organizacional, a la pregunta “¿El personal encargado del proceso realiza propuestas de mejora de eficiencia energética?”, si la respuesta es “si” entonces a dicha barrera se le asigna un valor de 0,0 porque no habría evidencia de una barrera en este sentido. Por el contrario, en la barrera poder de la misma categoría, a la pregunta “¿Se contemplan fundamentalmente otras prioridades antes que una nueva implementación tecnológica?”, si la respuesta es “si”, se entiende que la empresa no tiene prioridad sobre las medidas de eficiencia energética y por tanto este aspecto constituye una barrera y se le asigna un valor de 1,0.

En dos preguntas, la respuesta se codificó con valores intermedios entre 0,0 y 1,0. Por ejemplo, en la barrera racionalidad limitada de la categoría comportamental, la pregunta establece “¿Cuáles son los criterios de evaluación tecnológica que utiliza?”. Dentro de las opciones a esta pregunta están competencia y tendencia del mercado. Cualquier elección de estas dos opciones no constituye en sí una barrera definitiva, porque en muchas ocasiones la comparación con procesos similares o con las tendencias del mercado puede motivar una actualización tecnológica, pero en otros casos, un estancamiento tecnológico o baja innovación en procesos similares del sector hace que no haya una adecuada penetración de medidas de eficiencia energética. Por lo tanto, el impacto de esta pregunta es intermedio y por eso se le asigna un valor de 0,5 a una

respuesta afirmativa. Por otra parte, en la barrera riesgo de la categoría económica, si los empresarios consideran que los tiempos de retorno a la inversión son rentables a mediano plazo, esta pregunta tendrá un valor de 0,5 por estar en el intermedio de tiempos de retorno a corto y a largo plazo.

Una vez codificadas las respuestas, el factor de barrera se calculó con la Ecuación (1):

$$F_B = \sum_k \left( \frac{1}{n^2} F_{P,k} \left( \sum_i C_{i,k} \right)^2 \right) \quad (1)$$

Donde:

$F_B$  : Factor de barrera

$n$  : Número de empresas visitadas en el sector

$F_{P,k}$  : Factor de ponderación de la pregunta k

$C_{i,k}$  : Valor de codificación para la empresa i en cada pregunta k

La Ecuación (1) resulta de ponderar la respuesta de cada empresa entre el número total de empresas, debido a que de esta forma se evita que una respuesta que contribuya a la barrera por parte de una sola empresa no sea definitiva para caracterizar todo el sector. El factor de ponderación de cada pregunta se asigna para dar cuenta de la importancia de la pregunta en la barrera y al final se normaliza el resultado por pregunta para que la suma de todas las preguntas tenga un valor máximo de 1,0.

El factor de barrera tiene un valor entre 0 y 100%, siendo 0% cuando no hay una barrera evidente y 100% cuando todas las empresas determinaron que dicha barrera ha impedido o puede impedir la implementación de tecnologías y medidas de mejoramiento de la eficiencia energética.

### 2.2.3 Brecha y barreras normativas

Para la identificación de las brechas normativas se recurrió a las leyes ambientales colombianas empleando la resolución 909 del 2008, la cual establece los niveles de emisiones contaminantes permisibles al medio ambiente. Partiendo de esta regulación, se realizó una búsqueda en las páginas oficiales de los países más representativos en producción y avance tecnológico en los sectores estudiados, como lo son: China, India,

Unión Europea y por Latino América Brasil, con el fin de conocer los rangos de emisiones permisibles por estos países. Posteriormente se compararon con las normas ambientales de Colombia, identificando de esta forma las diferencias existentes en las cantidades de emisiones máximas permitidas por dichas regulaciones.

Al identificar los países con las regulaciones más estrictas, se emplean los rangos de emisiones permisibles de dichos países como divisor del rango establecido por Colombia, con el fin de identificar el factor de brecha, existente entre Colombia y los países seleccionados. Los resultados son presentados en graficas de barras y analizados de manera porcentual, dando como finalidad la brecha, y la cantidad adicional de gases nocivos emitidos al medio ambiente por Colombia contemplada dentro la ley.

Las barreras normativas, están ligadas al cambio de regulación de emisiones ambientales permisibles por medio del ente competente de cada país, por lo tanto para identificarlas, se realizó un análisis basado en las diferencias de rangos de emisiones permisibles regulados por otros países, estableciendo un rango ideal basado en las regulaciones más estrictas contempladas en este estudio, y determinando factores que intervienen con el cambio de regulación, ya que el nivel de emisiones reguladas por cada país depende de factores industriales, económicos y comportamentales.

Los resultados obtenidos mediante la identificación de la brecha normativa, son graficados y analizados mediante el comparativo con los resultados de las tendencias comportamentales plasmados en la identificación de brecha comportamental, al igual que con los resultados de las brechas tecnológicas, ya que estos presentan una influencia directamente con los niveles de emisiones contaminantes.

## **3. Resultados**

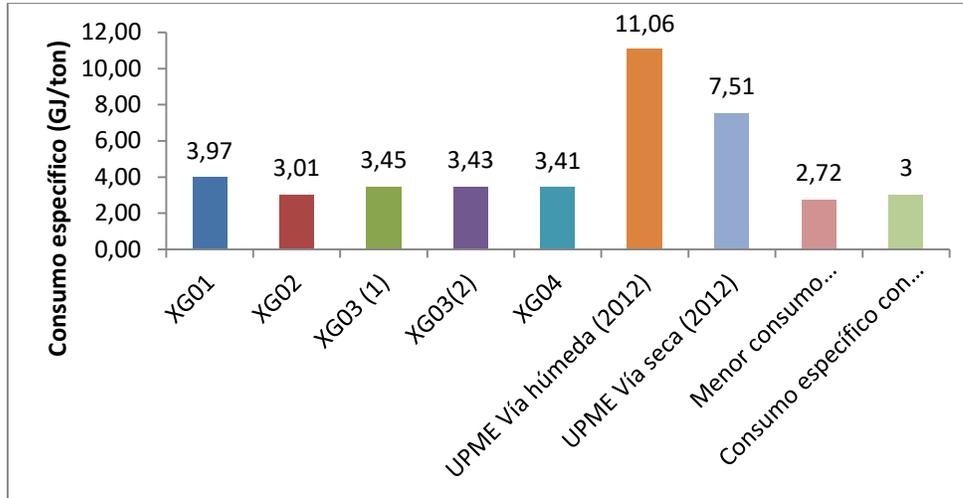
En este capítulo se presentan los resultados que responden a los objetivos planteados en el la propuesta de investigación.

### **3.1 Identificación de brechas tecnológicas sector cemento**

Con el fin de establecer gráficamente las brechas tecnológicas a nivel nacional, se emplearon los consumos específicos obtenidos mediante los diagnósticos energéticos realizados a las diferentes empresas del sector de producción de cemento participantes dentro del proyecto, y se comparan con los consumos específicos reportados por la UPME (2013), el consumo específico con la mejor tecnología y el menor consumo específico en el mundo.

En la Figura 3-1 se muestran los consumos específicos de las cuatro plantas fabricantes de cemento intervenidas en Colombia y los consumos específicos reportados por la UPME en el año 2012, representando las plantas de producción con los códigos alfanuméricos XG01, XG02, XG03 (1), XG03 (2) y XG04. La planta XG03 tiene la división (1) y (2) debido a que esta posee dos hornos distintos. El menor consumo específico reportado en el mundo se tomó del trabajo de Madloul et al (2013), mientras que el consumo específico reportado con la mejor tecnología se obtuvo del trabajo de Worrel et al, (2008).

**Figura 3-1:** Consumos específicos de las empresas intervenidas y los consumos específicos reportados por la literatura



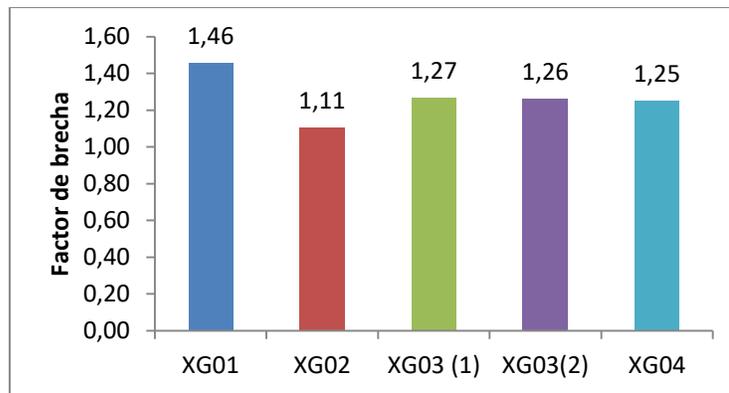
Las diferencias en los consumos específicos actuales comparados con los consumos específicos reportados por la UPME en el año 2012, muestran una reducción del consumo de energía que baja de 7,51 GJ/ton a 3,97 GJ/ton para la producción de cemento por vía seca, comparándola con la planta XG01, lo que evidencia una reducción del consumo de energía del 47,14 %, una reducción de energía del 54 % en comparación con la planta XG03 (1), una reducción de energía del 54,33 % en comparación con la planta XG03 (2), una reducción de energía del 54,6 % en comparación con la planta XG04 y una reducción de energía del 60 % en comparación con la planta XG02, siendo esta la planta con el mayor porcentaje de reducción de energía dentro de las empresas intervenidas en el proyecto. Estos resultados muestran en general una mejora en la eficiencia energética en el sector productor de cemento en los últimos años. Por otra parte, no se realizó una comparación de reducción de consumo de energía con el consumo específico de producción de cemento por vía húmeda, ya que las empresas intervenidas cambiaron de tecnología húmeda a tecnología seca, debido a que la tecnología húmeda es deficiente y obsoleta.

Para determinar la brecha tecnológica entre las diferentes plantas de producción de cemento intervenidas en Colombia, se calculó el factor de brecha, el cual resulta de dividir el consumo específico encontrado en cada planta entre el menor consumo

específico reportado por la MTD (mejor técnica disponible), el cual se establece en 2,72 GJ/ton (Madloul et al., 2013).

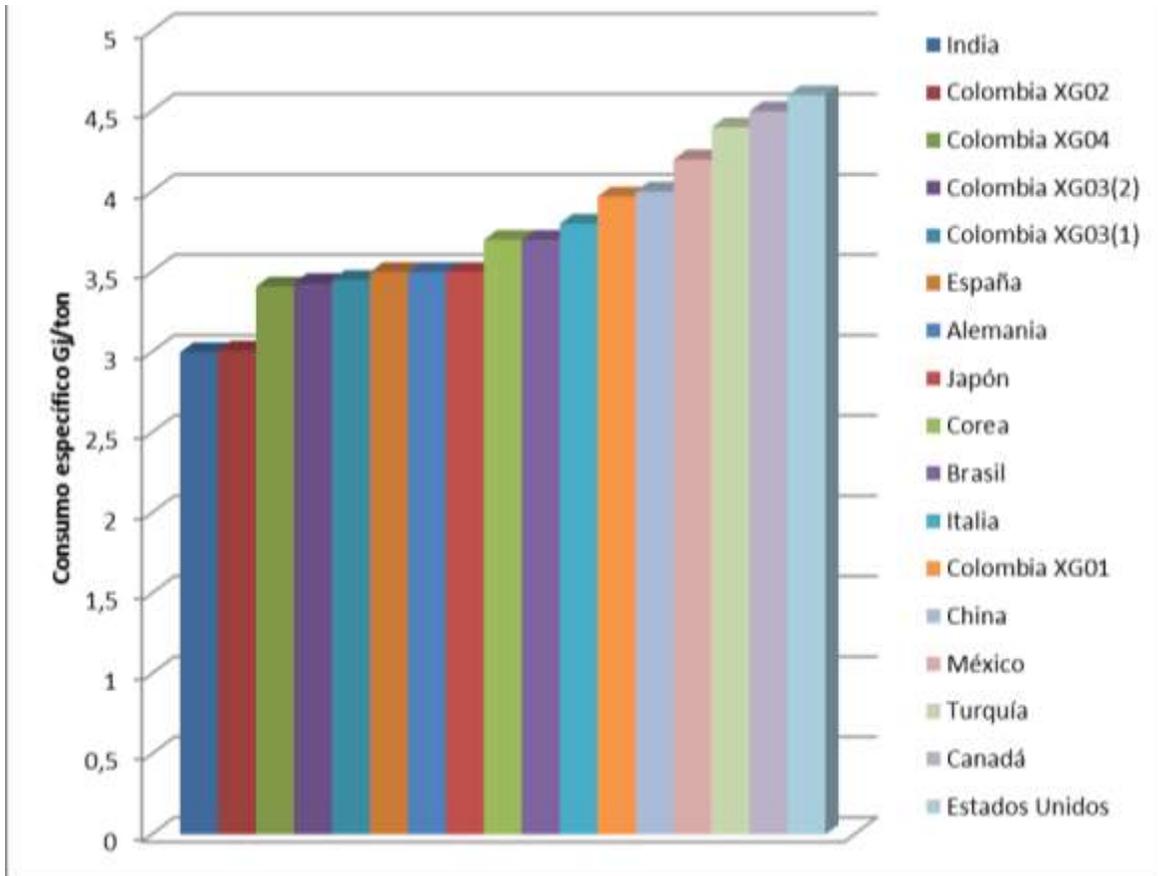
En la Figura 3-2 se muestra el factor de brecha existente entre los consumos específicos en producción de cemento de las diferentes plantas de producción intervenidas en Colombia. Se identificó que la línea de producción de la planta XG01 presenta los valores más altos del factor de brecha con 1,46. Las demás plantas tuvieron factores de brecha cercanos a 1,25, mientras que la planta XG02 fue la de factor de brecha más bajo. Esto se debe en parte a la implementación de etapas de precalentamiento y precalcificación en el horno de producción de clínker. El factor de brecha calculado puede servir como un indicador del potencial de ahorro energético que puede llegar a tener determinada planta aunque se requiere de un análisis más profundo que permita determinar cuál o cuáles son las medidas de eficiencia energética que se deben implementar para alcanzar dichos ahorros.

**Figura 3-2:** Factor de brecha tecnológica entre las plantas intervenidas en Colombia.



En la Figura 3-3 se muestran gráficamente los consumos específicos de los países con mayor eficiencia en producción de cemento del mundo, y se incluyen los consumos específicos de las plantas de producción de cemento de Colombia, con el fin de realizar una comparación de consumo energético.

**Figura 3-3:** Consumos específicos de Colombia y los países con mayor eficiencia en producción de cemento del mundo

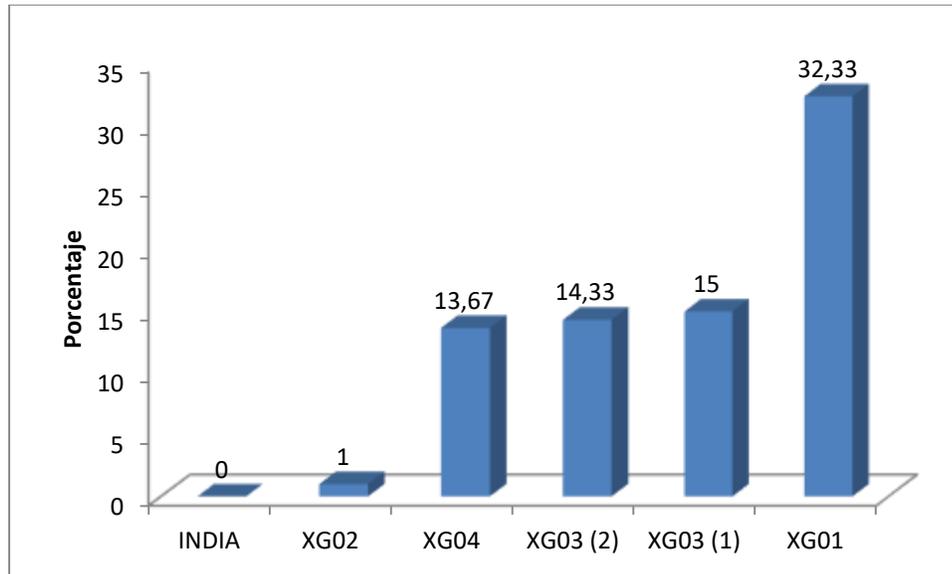


En tres de las cuatro plantas de fabricación de cemento intervenidas en Colombia, el consumo específico empleado solo es superado por la India que reporta un consumo específico de 3 GJ/ton, mientras que las plantas XG02, XG04, XG03 (2) Y XG03 (2), se tienen 3,01GJ/ton, 3,41 GJ/ton, 3,43 GJ/ ton y 3,45 GJ/ton respectivamente, precediendo a otros países de la Unión Europea y grandes productores como China y Estados Unidos. Se puede concluir entonces que la producción de cemento en Colombia es altamente competitiva en términos energéticos con respecto a los países con altos volúmenes de producción de cemento. Lo anterior implica que la brecha energética de la producción de cemento en Colombia es muy corta.

De acuerdo con los datos enseñados en la Figura 3-3, Colombia es precedida por la India en tres de las cuatro plantas intervenidas, por ende la India se emplea como país referencia para determinar una brecha tecnológica. En la Figura 3-4 se muestra en forma

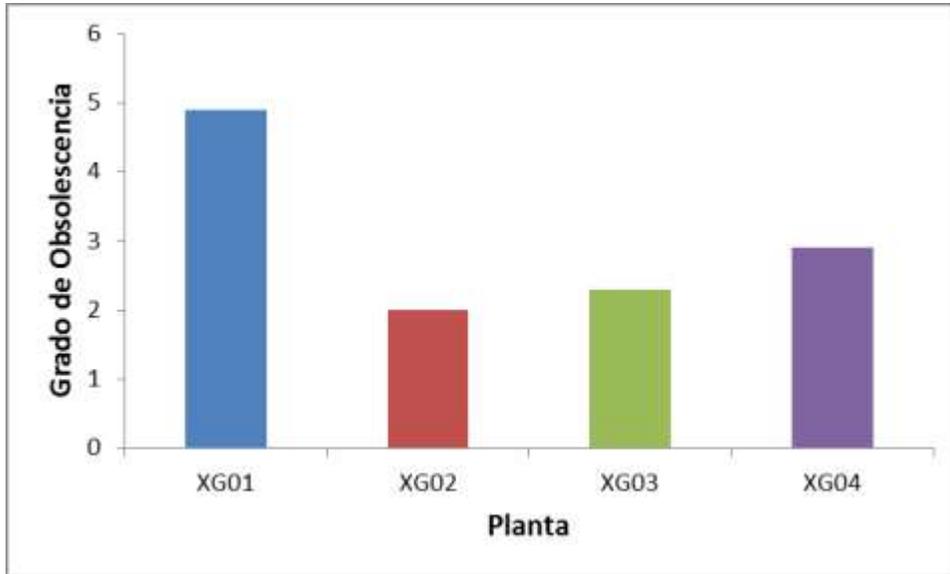
porcentual la brecha existente en el proceso de producción de cemento entre la India y Colombia.

**Figura 3-4:** Porcentaje de brecha existente entre Colombia y la India



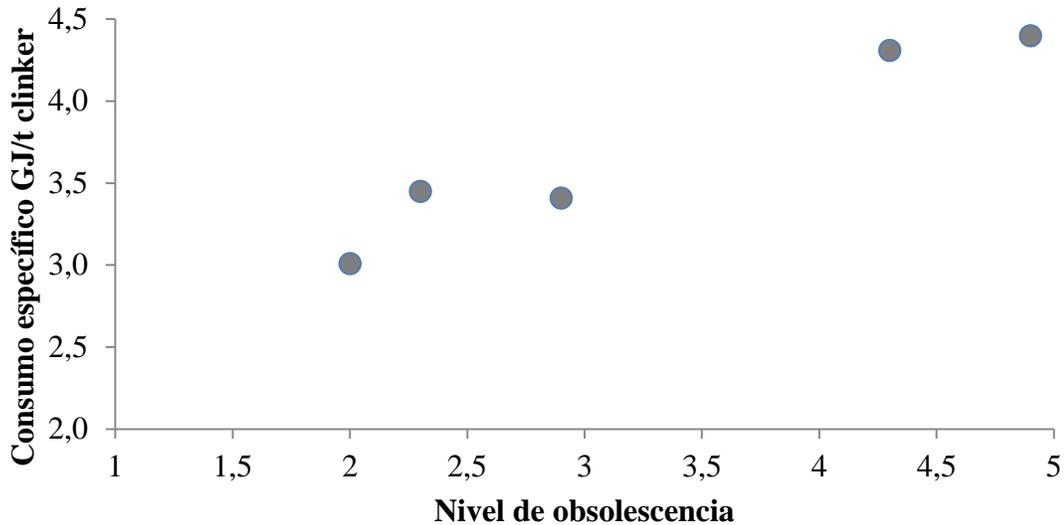
Realizando un análisis porcentual de la brecha entre las plantas de fabricación de cemento de Colombia y la India, la planta XG01 tiene la mayor brecha con respecto a procesos similares en India debido a que en esta planta se emplea un sistema de 5 ciclones con 4 etapas sin pre-calcinador en el proceso productivo, mientras en las plantas de India al igual que las plantas XG02, XG03 y XG04 se emplea un sistema de 6 ciclones y 5 etapas con pre-calcinador, lo que aumenta la eficiencia significativamente como evidencian sus consumos específicos.

Cómo se mencionó en la metodología, se realizó un análisis de obsolescencia tecnológica, teniendo en cuenta los siguientes criterios: tipo de tecnología (precalentamiento, clinkerización y enfriamiento), año de fabricación, recuperación de energía, sistemas de control de proceso y de combustión y si el equipo ha sido repotenciado o no. En la Figura 3-5 se puede observar la cuantificación del nivel de obsolescencia del sistema de clinkerización de cada una de las plantas intervenidas.

**Figura 3-5:** Nivel de obsolescencia en el sector cemento.

En general se puede observar que las tecnologías utilizadas en este sector son medianamente modernas, y corresponden a procesos que en la mayoría cuenta múltiples etapas de precalentamiento (entre 5 y 6 etapas), precalcificación, clinkerización y enfriamiento, a excepción de las líneas de producción de la planta XG01 donde no se cuenta con precalcificador lo que hace que ésta sea la planta con el mayor nivel de obsolescencia (4,9). El bajo nivel de obsolescencia refleja que el sector cementero en Colombia está en constante mejora no solo tecnológica sino energéticamente, debido a que las tecnologías más nuevas son a la vez más eficientes. En la Figura 3-6 se puede ver la correlación existente entre el nivel de obsolescencia y el consumo específico, de la figura se puede concluir que a mayor grado de obsolescencia, mayor es el consumo específico del sistema.

**Figura 3-6:** Relación entre nivel de obsolescencia y consumo específico en las plantas diagnosticadas



### 3.2 Identificación de brechas tecnológicas sector cerámico

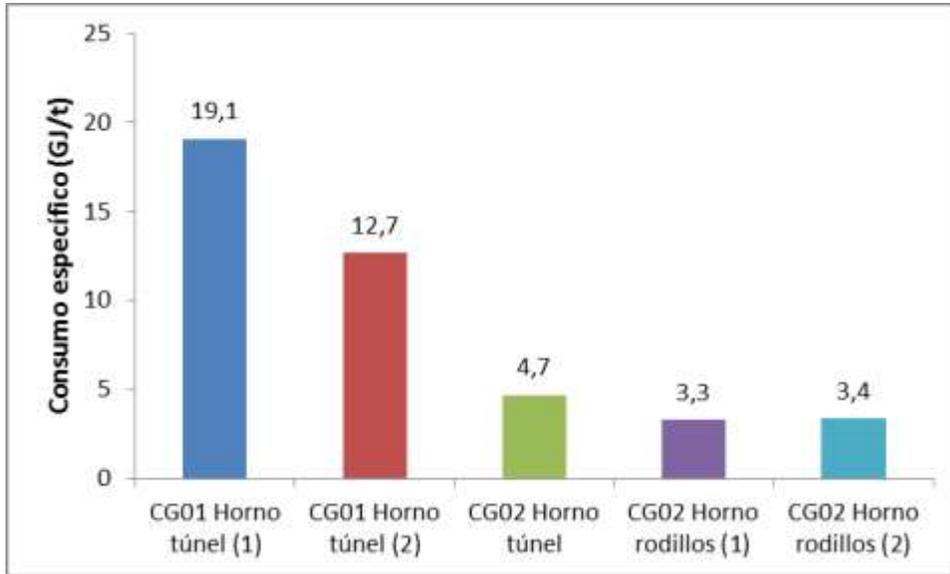
Para establecer las brechas tecnológicas en el sector cerámico, se realizaron mediciones en dos empresas nacionales, estas empresas fabrican diversos productos cerámicos empleando hornos túnel y hornos de rodillos.

En la Figura 3-7 se muestra el consumo específico de cada uno de los hornos empleados para la fabricación de cerámicas, tanto en pisos y baldosas como en cerámica para uso eléctrico. La industria de fabricación de cerámica para uso eléctrico en Colombia es muy reducida, por lo que solo se intervino la empresa CG01, esta empresa posee dos hornos para los procesos de sinterización continuos y dos hornos intermitentes. En la fabricación de pisos y baldosas se realizó el diagnóstico energético a la empresa CG02, esta empresa se ubica en la región centro y se clasificó de tamaño grande. La compañía utiliza 8 hornos para las diferentes referencias en sus productos, durante el diagnóstico energético se intervinieron 3 hornos de la compañía, uno por cada línea de producción.

En el sector se utilizan principalmente hornos tipo túnel y de rodillos y como combustible predomina el gas natural. Normalmente las empresas que utilizan hornos tipo túnel aprovechan el calor residual mediante un sistema de recuperación de calor en las etapas

de secado o maduración de la materia prima; no obstante, los hornos tipo rodillos analizados en este estudio, no hacen uso de este tipo de sistemas, generando pérdidas al ambiente por la liberación de los gases de combustión a alta temperatura.

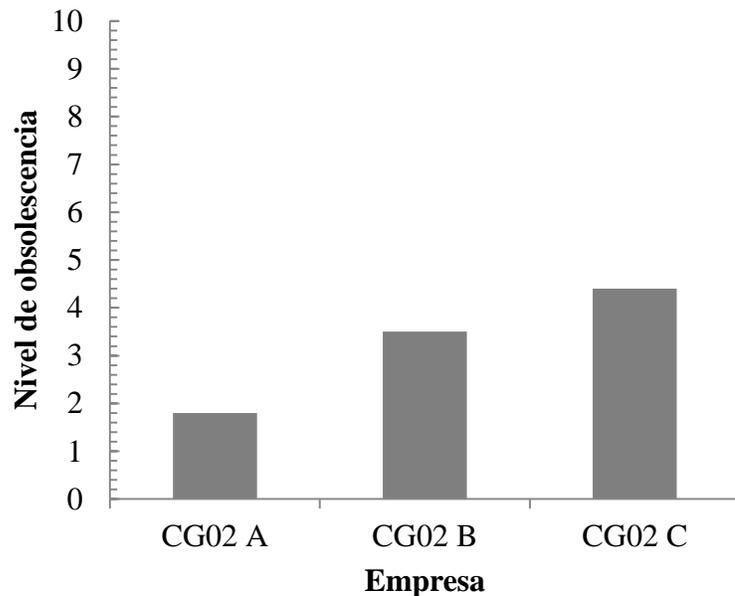
**Figura 3-7:** Consumo específico de cada uno de los hornos empleados para la fabricación de cerámicas



Con el propósito de determinar la brecha tecnológica entre las diferentes plantas de producción de cerámica intervenidas en Colombia, se comparan directamente los hornos túnel de ambas empresas y los hornos de rodillos por separado, ya que estas tecnologías emplean diferentes eficiencias entre ellas, teniendo mayor eficiencia las tecnologías de hornos de rodillos. Partiendo de lo mencionado anteriormente se establece que el horno túnel de la empresa CG02 presenta un consumo específico 2,7 veces menor al horno más eficiente de la planta CG01, esto se debe a la actualización del mismo, al agregar sistemas de recuperación de calor y quemadores con mayor eficiencia, mientras el horno túnel CG01 se conserva con su diseño original. La comparación de los hornos de rodillos da como resultado que el horno de rodillos CG02 horno rodillo 1, presenta un ahorro en su consumo específico del 2,9 % con respecto al CG02 horno rodillo 2, esto se debe al sistema actual de aislamiento con el que llegó este horno, ya que su implementación es reciente.

En la Figura 3-8 se muestra el nivel de obsolescencia tecnológica en el sector de fabricación de pisos y baldosas, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente en el sector cemento. Se logró identificar un nivel de obsolescencia entre 2,8 y 5,2 valores que son atribuidos a niveles de obsolescencia medio bajo debido a la presencia de sistemas de control de combustión y de proceso, este tipo de sistemas en muchas ocasiones no son utilizados en el sector de cerámica.

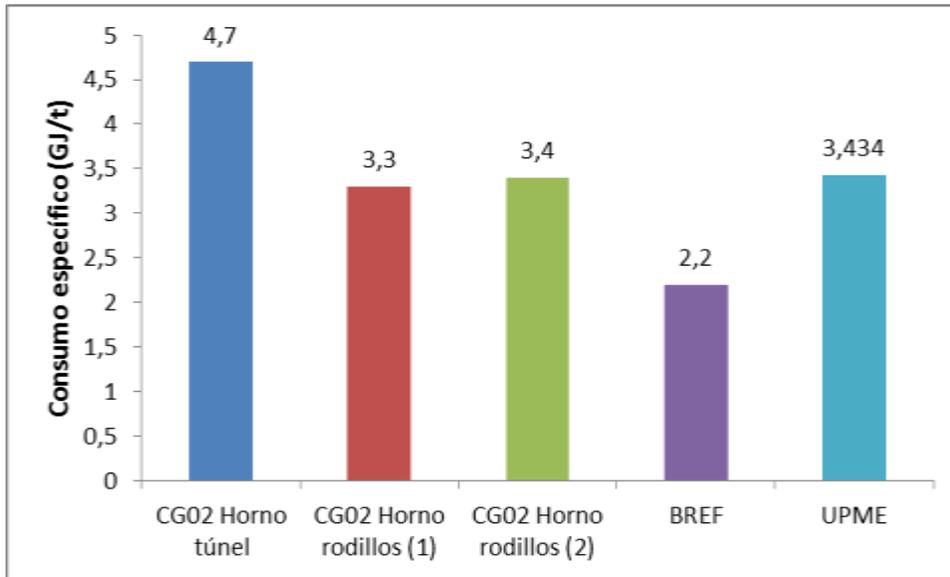
**Figura 3-8:** Nivel de obsolescencia tecnológica en la fabricación de pisos y baldosas.



Para determinar la brecha tecnológica en el sector cerámico en Colombia, se realizó una comparación de los consumos específicos encontrados en los diagnósticos y los reportados por la UPME en el año 2012 y el documento de Referencia de Mejores Técnicas Disponibles (BREF, por sus siglas en inglés) de la Unión Europea (2007). Esta comparación se muestra en la Figura 3-9. Se puede establecer que los consumos específicos de los hornos de la empresa, presentan un consumo específico superior al estándar internacional especificado por el BREF, especialmente del horno túnel, el cual posee un consumo específico de más del doble del mejor consumo internacional. Los hornos de rodillos se acercan más al mejor consumo y se mantiene en el mismo nivel del consumo reportado por la UPME pocos años atrás. Estos resultados indican que para la fabricación de pisos y baldosas, la mejor opción en términos de eficiencia energética es

la implementación de hornos de rodillos. Esto permitiría alcanzar potenciales de ahorro energético que pueden llegar hasta la mitad del consumo actual.

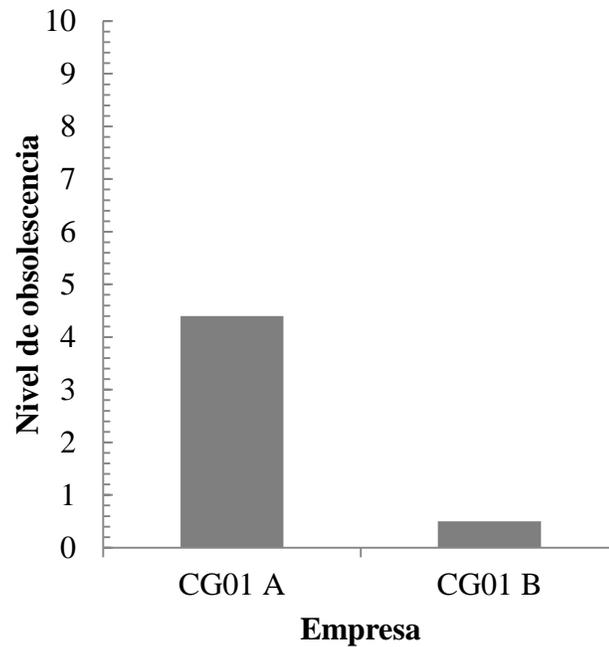
**Figura 3-9:** Consumos específicos empleados por los diferentes hornos utilizados en las empresas intervenidas y los consumos específicos reportados en la literatura



Por otra parte, la fabricación de cerámica de uso eléctrico es un proceso muy específico dentro de la industria cerámica, esto se refleja en los altos aportes energéticos para lograr las temperaturas de sinterización, presentando consumos específicos con valores entre 12 – 20 GJ/t según los reportes internacionales (European Commission, 2007); debido a la especificidad del proceso no existen líneas tecnológicas propias del subsector; por lo que los desarrollos tecnológicos se basan en la modificación de la tecnología comercial.

La gran diferencia entre los consumos específicos de los hornos tipo túnel en la empresa CG01, está relacionada principalmente a la obsolescencia tecnológica de los equipos. En la Figura 3-10 se puede ver el grado de obsolescencia tecnológica que presentan los equipos intervenidos.

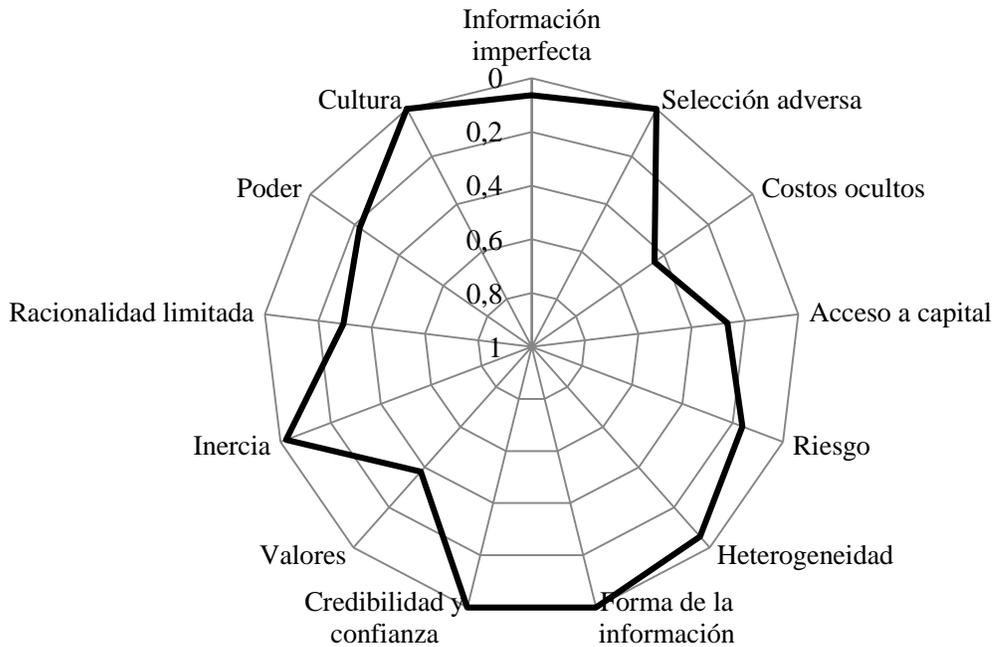
**Figura 3-10:** Nivel de obsolescencia tecnológica en la producción de cerámica de uso eléctrico.



A pesar que los dos equipos cuentan con la misma tecnología, la diferencia entre los niveles de obsolescencia de los hornos radica principalmente en la existencia o no de los sistemas de control y en la recuperación de calor, evidenciando la necesidad de involucrar estos aspectos a la hora de hacer la selección de un tipo de tecnología adecuado para un determinado proceso.

### **3.3 Identificación de brechas y barreras comportamentales en el sector cemento**

El sector cemento estuvo representado por cuatro plantas distribuidas en la región norte, centro y suroeste del país, con una producción total de 2.269.106 toneladas de cemento al año, lo cual representa un 17,3 % de la producción total de cemento en Colombia en el año 2015. La caracterización cualitativa de barreras por medio de la encuesta se presenta en la Figura 3-11. Para este sector, las barreras más importantes fueron los costos ocultos, los valores, y en menor medida el acceso a capital junto con la racionalidad limitada.

**Figura 3-11:** Análisis cualitativo de barreras en el sector cemento

Los costos ocultos son una barrera relacionada con los altos costos que pueden no ser incluidos en los modelos de inversión, debido a una búsqueda incompleta de información e información deficiente por parte de proveedores y del mercado en general. La importancia de los costos ocultos radica en que una medida de mejora de la eficiencia energética que aparentemente es costo-efectiva podría no llegar a serlo cuando aparecen costos ocultos que no fueron tomados en cuenta en la valoración de la inversión inicial y por ende no influyeron en el cálculo de los indicadores de viabilidad y rentabilidad. Por otra parte, entre más nueva sea la tecnología y menos experiencias exitosas se conozcan de esta, mayor es el riesgo de incurrir en la no inclusión de costos ocultos en los proyectos de inversión. Sin embargo, el impacto de este riesgo puede ser más grande en pequeñas y medianas empresas que en grandes empresas debido al monto relativo de la inversión en cada caso.

Los resultados de la encuesta reflejaron que ante un análisis de inversión en una nueva tecnología en las plantas productoras de cemento, los encargados de dicho análisis en su gran mayoría toman su decisión basados en criterios técnicos y estudios de vigilancia tecnológica, pero no incluyen en sus análisis los costos ocultos de la inversión. Esto quiere decir que los encargados de tomar las decisiones de inversión en nuevas

tecnologías tienen un amplio conocimiento técnico de las mejores alternativas tecnológicas a la hora de implementar acciones para el mejoramiento de la eficiencia energética y además consideran que la información suministrada por los proveedores de tecnología es confiable, lo cual se evidencia por el bajo impacto que tiene los parámetros de información imperfecta y selección adversa en el análisis de barreras de la Figura 3-11, sin embargo no conocen y no tienen en cuenta detalles de operación, suministros y/o adaptaciones necesarios para la implementación de las tecnologías y que constituyen un costo adicional.

Por lo tanto, se requiere de una mayor profundidad en la búsqueda de información relacionada con la implementación de tecnologías que buscan el mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento, enfocada principalmente en las dificultades de adaptación a los procesos existente. En este punto se hace indispensable la promoción de programas demostrativos de tecnologías emergentes y el incentivo a la inversión en proyectos de desarrollo y adaptación de tecnologías a la escala de producción de las empresas colombianas para que a partir de estas experiencias, sea posible reducir el margen de error en la cuantificación de los costos ocultos.

La segunda barrera más significativa que se encontró en el sector cemento está asociada con la conciencia ambiental y los valores corporativos. Las empresas encuestadas tienen un manejo responsable del impacto de sus procesos sobre el medio ambiente en las áreas de influencia, e incluso han desarrollado sistemas de gestión ambiental basados en normas internacionales. Sin embargo, a la hora de considerar inversiones en nuevas tecnologías, no consideran las tecnologías que pueden mitigar impactos ambientales si estos no hacen parte de restricciones legislativas vigentes.

Lo anterior significa que las decisiones de inversión en una tecnología eficiente se hacen teniendo en cuenta si esta satisface los requisitos consignados en la normativa vigente en el país, pero si no existe una restricción para ciertos tipos de emisiones de gases o incluso para un consumo específico mínimo que pueda disminuir el uso de combustibles y de recursos energéticos, estos criterios no son prioritarios a la hora de la evaluación de la inversión. Si bien este comportamiento es normal en el ámbito corporativo, donde se busca maximizar la rentabilidad de las inversiones, ajustándose completamente a la legislación correspondiente, constituye una barrera de tipo comportamental debido a la

baja consideración que se tiene de la importancia de la eficiencia energética si esta no hace parte de una política restrictiva. Lo anterior implica que una normatividad laxa en términos de exigencia de la eficiencia energética conduce a una cultura de estricto cumplimiento de las normas pero sin la inclusión de procesos de mejoramiento continuo que permitan disminuir el consumo de energía a niveles por debajo de los permitidos.

El acceso a capital tuvo una ponderación significativa en comparación con otras barreras pero no se constituyó como una de las principales debido fundamentalmente a que las empresas encuestadas son grandes productoras de este material con alta capacidad de inversión en mejoras tecnológicas del proceso productivo. Sin embargo, los responsables del proceso resaltan que aún con esta ventaja, no siempre es posible disponer de capital inmediato y suficiente para realizar intervenciones complejas y radicales que busquen ahorros significativos en consumo de combustible, especialmente aquellos que impliquen renovación tecnológica.

No obstante, ninguno de los encuestados manifestó que existieran dificultades a la hora de acceder a créditos de financiación de entidades bancarias. Por lo tanto, es importante que a nivel gubernamental se aproveche esta facilidad para generar incentivos de tipo financiero que estimulen la inversión y otorgamiento de crédito para apoyar el mejoramiento de la infraestructura tecnológica de los productores de cemento. Por otra parte, aunque en el caso de las empresas diagnosticadas, el acceso a capital no fue una barrera preponderante, lo contrario podría hacerse visible en empresas de menor volumen de producción, por lo que los incentivos financieros para la adquisición de nuevas tecnologías tendrían alto impacto en este sector del mercado.

Finalmente, la barrera de racionalidad limitada también sobresalió sobre el conjunto de barreras analizadas para el sector del cemento con un impacto comparable al del acceso a capital. Esta barrera está relacionada con los criterios técnicos y económicos que utilizan los directores de los procesos y las compañías para tomar decisiones con respecto a la adopción de tecnologías eficientes. Con respecto a la caracterización de esta barrera se detectó una tendencia a no tomar siempre la decisión de inversión en una nueva tecnología sobre la base del conocimiento del comportamiento energético actual del proceso, indicado de forma objetiva por el consumo específico de energía. En lugar

de esto, los tomadores de decisiones se enfocan en aspectos que limitan la racionalidad tales como seguir las tendencias del mercado y de empresas competidoras, anteponer los costos de adquisición sobre el desempeño energético y considerar solamente viables aquellos proyectos que generen lapsos de tiempo cortos para la recuperación de la inversión.

Si bien, el seguimiento a las tendencias del mercado y de las prácticas de la competencia pueden aportar mejoras significativas si dichas tendencias apuntan a la incorporación de nuevas tecnologías con niveles superiores de eficiencia, también puede conducir a un estancamiento en la penetración de nuevas tecnologías si no hay una permanente actualización del mercado o si la difusión de las experiencias y las características de las nuevas tecnologías no llegan a ser del conocimiento de las empresas, especialmente en las de menor tamaño. En este caso, se hace preciso la implementación de programas demostrativos que permitan generar credibilidad y confiabilidad en los empresarios, para que basados en datos reales de desempeño y eficiencia, puedan tomar la decisión de invertir en la renovación tecnológica de sus procesos. Estos programas demostrativos, a su vez, contribuyen a reducir otra fuente de racionalidad limitada detectada como lo es la decisión basada únicamente en costos de inversión, ya que un conocimiento preciso de los beneficios de la incorporación de una nueva tecnología contribuyen a valorar mejor las bondades del cambio y a ponderar con mayor certidumbre los indicadores financieros relacionados.

### **3.4 Identificación de brechas y barreras comportamentales en el sector cerámico**

La caracterización cualitativa de barreras para la industria cerámica por medio de la encuesta se presenta en la Figura 3-12. Los resultados muestran que la principal barrera a la eficiencia energética en este sector son los costos ocultos. Esta barrera está relacionada con los costos no contemplados en la inversión inicial de los proyectos de actualización de tecnología y que; en algunos casos, en empresas grandes puede ser del orden del 3-8 % de la inversión inicial y en empresas de tamaño pequeñas y medianas, estos costos pueden ser mayores (Thollander & Palm, 2013b); es importante resaltar que estos costos, son consecuencia de la falta de programas que faciliten la transferencia

tecnológica y de esta manera conocer más en detalle la implementación y los costos asociados a esta.

**Figura 3-12:** Análisis de barreras percibidas en las empresas intervenidas.



Para el sector cerámico, las barreras a las Medidas de Eficiencia Energética (MEE) están asociadas principalmente a las categorías de las fallas que no tienen relación con el mercado, es decir, desde el sistema económico del país aún hay inconvenientes para facilitar estas MEE y las barreras comportamentales relacionadas con la relevancia que le transmite el personal a la implementación de MEE.

Se puede identificar barreras de gran trascendencia en el sector cerámico, que impiden el desarrollo de las MEE clasificadas en la categoría comportamental; como lo son la barrera de valores, que refleja la falta de compromiso de los individuos de la organización y el bajo grado de exigencia normativa nacional en comparación con las normas internacionales, y la barrera forma de la información, que puede inhibir la adopción de MEE por la falta de conocimiento y actualización en temas energéticos del personal de la empresa destinado para estas actividades. Por otra parte, al igual que en el sector cemento, los costos ocultos son considerados una barrera para la incorporación de nuevas tecnologías en el sector cerámico.

Un programa de transferencia tecnológica que permita la recopilación de información sobre las tecnologías disponibles, proveedores, fuentes, mecanismos de financiación y que establezca una metodología clara y suficiente sobre todo el proceso, permitiría disminuir las barreras relacionadas con aspectos como costos ocultos, forma de la información, acceso a capital y heterogeneidad.

En resumen, las barreras con mayor afectación en ambos sectores productivos está relacionadas con el factor económico, las cuales requieren de participación gubernamental, en programas de estimulación en implementación y mejoramiento tecnológico, garantías de protección económica en proyectos de migración tecnológica, participación económica como motivación para mitigar los temores asociados a un cambio tecnológico de última generación, incentivos tributarios hasta el punto de amortización de la inversión, y campañas de capacitación psicológicas-comportamentales que permitan disminuir la incertidumbre que se refleja como temor en el pensamiento empresarial con respecto a conductas de negación al cambio.

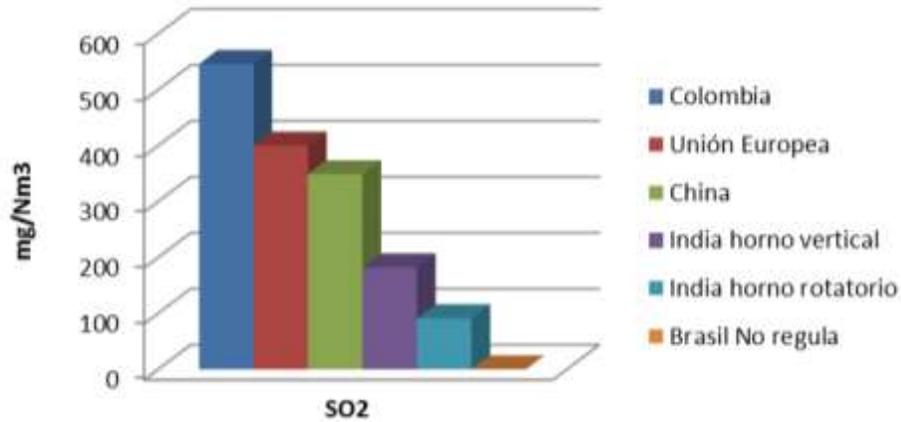
### **3.5 Brechas y barreras normativas ambientales**

Para la identificación de brechas normativas, se consultaron las regulaciones ambientales de diferentes países y se compararon con la regulación ambiental colombiana. Los niveles de emisiones que se emplearon para este estudio fueron las cantidades máximas permisibles para los gases de dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno en plantas nuevas y existentes en producción de cemento y cerámica.

#### **3.5.1 Brechas normativas en plantas nuevas**

En la Figura 3-13 se muestran las emisiones máximas permisibles de dióxido de azufre para las plantas nuevas. Se destaca el hecho de que Brasil no regula las emisiones de dióxido de azufre en los sectores de fabricación de cemento y cerámica.

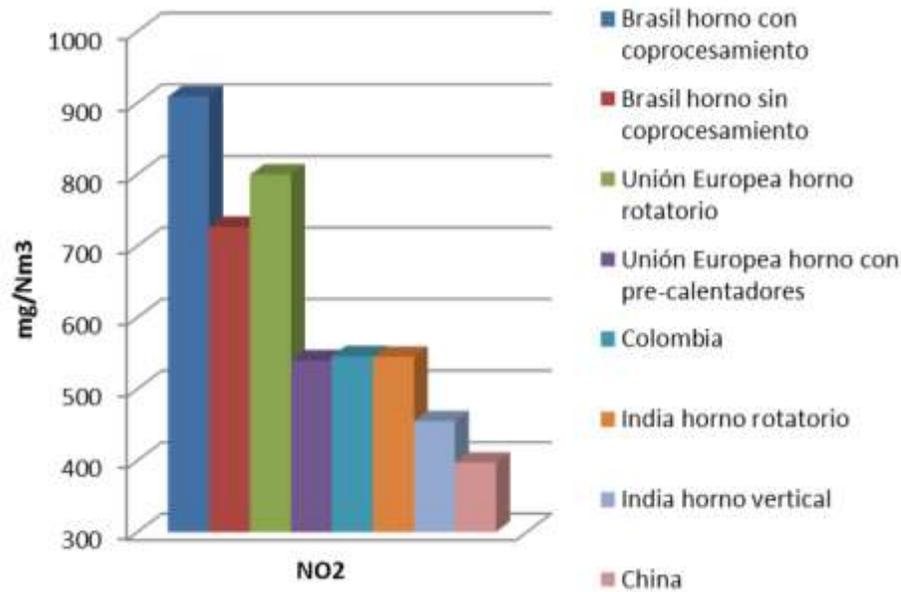
**Figura 3-13.** Emisiones máximas permitidas de dióxido de azufre en diferentes países para plantas nuevas. Fuentes: (CONAMA, (2012), Transportpolicy (2014), Colombia resolución 909 del 2008, (European Comission, 2007), Ministry of Environment and Forests (2014).



Colombia presenta un nivel de emisiones permisibles al ambiente de dióxido de azufre superior que los países contemplados en este estudio, exceptuando a Brasil, permitiendo un 26,7 % más de emisiones que la Unión Europea, un 36 % más de emisiones que China, un 66,6 % más de emisiones que India en el uso de hornos verticales y un 83,33 % que India en el uso de hornos rotatorios. Brasil no regula la emisión de dióxido de azufre al ambiente, convirtiéndose en el país con la regulación ambiental más permisiva con respecto a la emisión de dióxido de azufre.

En la Figura 3-14 se muestran los niveles máximos de emisiones de dióxido de nitrógeno al ambiente por los diferentes países contemplados en este estudio. Entre los países contemplados para este estudio, Brasil posee la regulación más permisible en cuanto a la emisión de dióxido de nitrógeno al ambiente, estando por encima de Colombia en un 39,9 % en emisiones en hornos con co-procesamiento, y un 24,9 % para la regulación de emisiones de dióxido de nitrógeno en hornos sin co-procesamiento, luego la sigue la regulación Europea, la cual supera los niveles de emisiones permisibles en hornos rotatorios en un 31,75 %, pero está por debajo en un 1,09 % para hornos con pre-calentadores, resaltando que es la técnica que marca la tendencia en la actualidad. No obstante Colombia se encuentra por encima del rango de emisiones al ambiente de dióxido de nitrógeno en un 0,18 % comparado con la India en emisiones de dióxido de nitrógeno en hornos rotatorios, y un 16,67 % para hornos verticales, también se encuentra por encima de la regulación ambiental China con un 27,29 %.

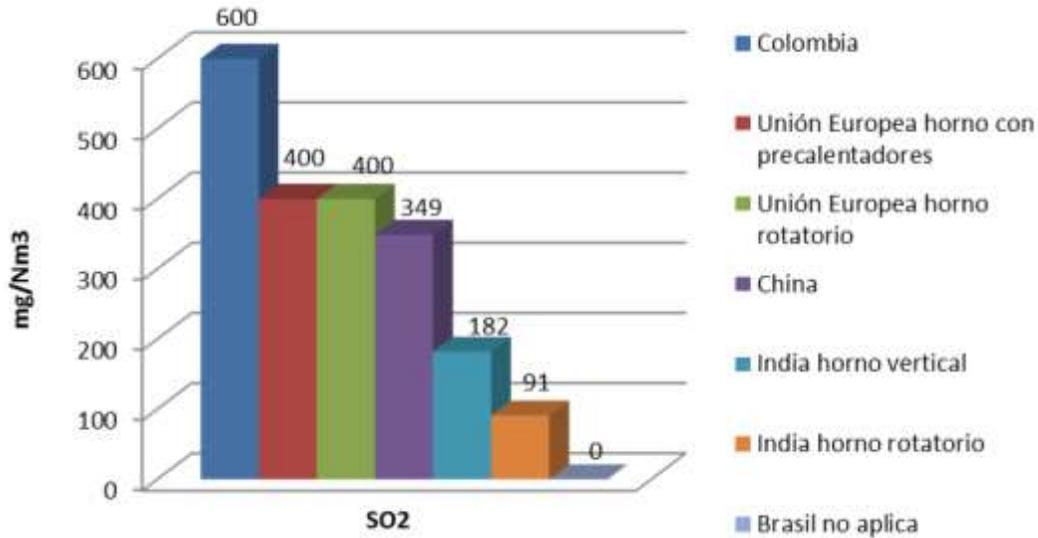
**Figura 3-14:** Emisiones máximas permitidas de dióxido de nitrógeno en diferentes países. Fuentes: (CONAMA, (2012), Transportpolicy (2014), Colombia resolución 909 del 2008, (European Comission, 2007), Ministry of Environment and Forests (2014)



### 3.5.2 Brechas normativas en plantas existentes

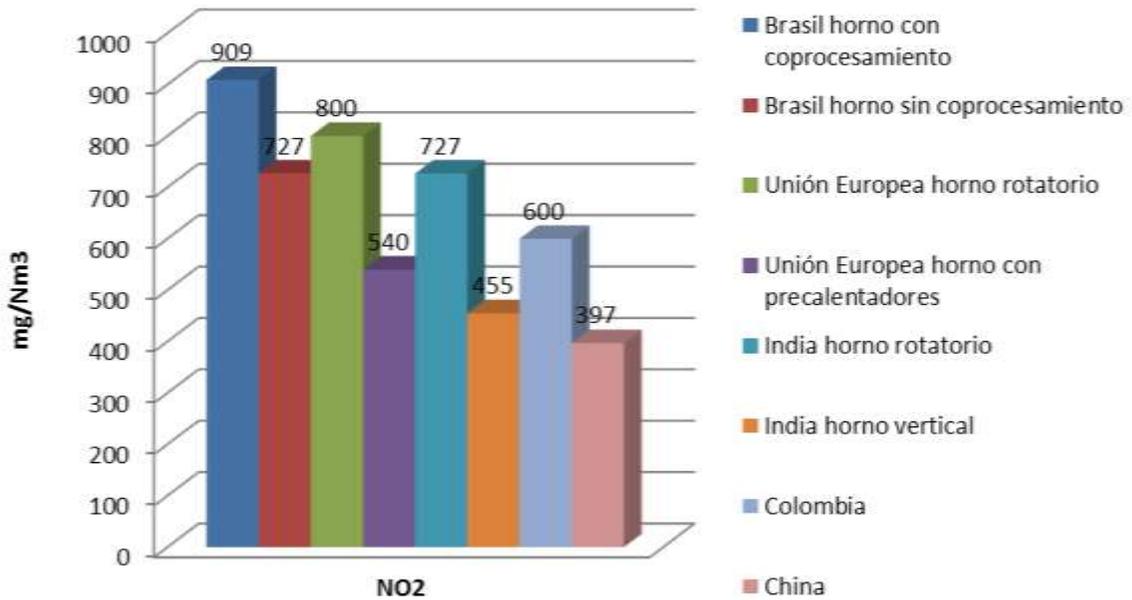
En la Figura 3-15 se muestran los niveles máximos permitidos de dióxido de azufre para las plantas de producción existentes, los cuales contemplan niveles superiores a los de las plantas nuevas. Exceptuando a Brasil que no regula las emisiones de dióxido de azufre, Colombia presenta el nivel máximo permisible de dióxido de azufre representados en la figura 18, estando por encima de la Unión Europea en un 33,33 %, por encima de china en un 41,83 %, y con un nivel superior a India del 69,7 % para los hornos verticales y con un 84,8% para el horno rotatorio.

**Figura 3-15:** Niveles máximos permisibles de emisión de dióxido de azufre para plantas de producción de cemento y cerámica existentes. Fuentes: (CONAMA, (2012), Transportpolicy (2014), Colombia resolución 909 del 2008, (European Comission, 2007), Ministry of Environment and Forests (2014)).



En la Figura 3-16 se muestra el nivel máximo permisible de dióxido de nitrógeno al ambiente para las plantas existentes de producción de cemento y cerámica. Brasil presenta el límite de emisiones de dióxido de nitrógeno en las plantas existentes, mayor al resto de países contemplados para este estudio, superando el nivel máximo permisible en Colombia en un 34 % para hornos con coprocesamiento, y en un 17,47 % en hornos sin coprocesamiento. La regulación de la Unión Europea supera los niveles permisibles de emisión de dióxido de azufre en un 25 % para los hornos con pre-calentadores comparado con los límites fijados en Colombia, pero establece un valor inferior de emisiones en un 10 % para los hornos rotatorios. India permite un 17,47 % más de emisiones de dióxido de azufre que Colombia en hornos rotatorios, pero reduce el límite de emisiones en un 24,2 % para los hornos verticales comparado con los límites de emisiones fijados en Colombia. China establece el menor de los límites en emisiones de dióxido de nitrógeno dentro de los países mencionados anteriormente, con un 33,8 % por debajo de los límites establecidos por la regulación colombiana.

**Figura 3-16:** Niveles máximos permisibles de emisión de dióxido de nitrógeno para plantas de producción de cemento y cerámica existentes. Fuentes: (CONAMA, (2012), Transportpolicy, (2014), Resolución 909, (2008), (European Comission, 2007), Ministry of Environment and Forests, (2014)

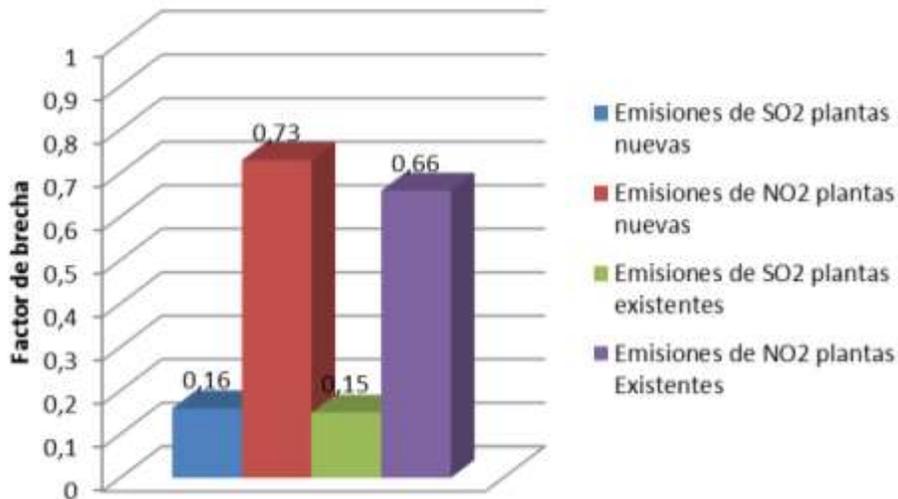


Si se toman los niveles máximos de emisiones permitidos por los diferentes países contemplados en este estudio, y los aplicamos como punto de referencia para determinar la brecha existente entre la regulación actual de Colombia se puede ver que en emisiones de dióxido de azufre para plantas de producción de cemento y cerámica nuevas y existentes, India presenta la regulación con el rango de emisiones más bajo, y el país que presenta la regulación con el rango más bajo en emisiones dióxido de nitrógeno en plantas de fabricación de cemento y cerámica es China, resaltando que China es la potencia mundial en producción de cemento. Si se emplean los rangos de emisiones establecidos por China e India como divisores de los rangos establecidos por Colombia, es posible determinar qué tan amplia es la brecha existente entre las regulaciones de los países seleccionados y Colombia.

En la Figura 3-17 se muestra la brecha existente entre la regulación ambiental en emisiones de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno de Colombia versus India y China, respectivamente. La brecha existente entre Colombia e India con respecto a la regulación de dióxido de azufre para plantas nuevas en producción de cemento y cerámica, como para plantas existentes, distan mucho, ya que el factor de brecha ronda alrededor de un sexto, lo que implica una contribución negativa del 85 % aproximadamente de estos gases al ambiente de manera legal por parte de las empresas de Colombia. La brecha existente entre Colombia y China con respecto a las emisiones de dióxido de nitrógeno, presentan un valor diferencial considerable, ya que las empresas colombianas tiene

permitido de manera legal arrojar un 33,8 % de dióxido de nitrógeno más que las empresas de China tanto en plantas nuevas como en plantas existentes.

**Figura 3-17:** Brecha entre las regulaciones de Colombia, India y China para plantas nuevas.



Lo anterior implica que las actuales normativas de tipo ambiental para la industria de alta temperatura en Colombia permiten el uso de tecnologías que no son altamente eficientes en términos energéticos debido a que algunas tecnologías de menor eficiencia pueden llegar a cumplir con los niveles de emisiones estipulados por la legislación, aún cuando existen tecnologías de post-tratamiento de emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> que permitirían un mejor control de las emisiones de los equipos de producción pero sin mejorar la eficiencia energética de los mismos. Esto es fundamentalmente sensible si se tiene en cuenta que en el sector cemento, una de las barreras identificadas fue la de valores, específicamente asociadas con la no inversión en tecnologías eficientes si las emisiones reguladas por la ley se encuentran dentro de los valores permitidos.

Otro aspecto notorio en relación con la normatividad ambiental, es que en Colombia no se encuentran reguladas las emisiones de CO para fuentes fijas, lo cual permite que en procesos de alta temperatura que utilizan combustión sea posible emplear quemadores obsoletos, con bajo control de la relación aire-combustible y/o descalibrados. En este sentido, es necesario mencionar el caso de México, donde la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, puesta en vigor el 2 de abril de 2012 por la Secretaría de

Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, regula las emisiones de CO en fuentes fijas hasta un máximo de 500 ppmv para cualquier equipo térmico y cualquier tipo de combustible, siendo el límite mucho menor (400 y 450 ppmv) para la zona del Valle de México y algunas zonas críticas. Por su parte, Turquía establece que cualquier fuente de energía industrial que use combustión, debe mantener sus niveles de emisión de CO por debajo de 690 ppmv.

No obstante, se deben tener varios factores en consideración que hacen que la implementación de una nueva regulación más exigente no se realice, ya que para poder bajar los rangos de emisiones permisibles al ambiente, es necesario implementar una política de migración tecnológica que iguale el avance tecnológico de los países más desarrolladas a nivel tecnológico, lo que nos lleva a la superación de las barreras tecnológicas, estas requieren de programas gubernamentales que posibiliten de manera eficiente este cambio, por lo que el gobierno primero debe solucionar esta necesidad antes de cambiar la regulación, de lo contrario el control estricto en las emisiones permisibles ambientales no sería viable, ya que el cambio de regulación actual por uno más estricto solo traería para las empresas sanciones, afanes por buscar soluciones a los regímenes regulatorios y por último la posibilidad de cierre o deserción de las empresas a países con regulaciones menos estrictas.

La implementación de combustibles limpios y energías alternativas en las plantas de producción como punto focal en mitigación de gases contaminantes, también debe ser promovida por el gobierno, el cual debe garantizar el suministro constante del mismo, con el fin de promover confianza y sostenibilidad en las empresas, dado que el temor al cambio de un combustible tradicional a un combustible limpio o una energía alternativa no se da por la falta de garantías en cuanto a suministro y sostenimiento del costo asequible en el tiempo.

Teniendo en cuenta los fundamentos anteriores, la barrera normativa presenta un impase que se transforma en un círculo vicioso, el cual debe ser solucionado en conjunto y gradualmente entre el gobierno y los empresarios en el sentido de que un mejoramiento tecnológico en los procesos de producción en sectores de alta temperatura puede permitir reducir los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

La comparación de consumos específicos en la producción de cemento en Colombia mostró una desviación máxima de 32,3% con respecto al mejor consumo reportado en el mundo para plantas de producción en la India, mientras que sólo en una de las plantas intervenidas se encontró un nivel de obsolescencia alto por no contar con precalcinadores, los cuales constituyen una tendencia en mejoramiento de la eficiencia energética en la producción de cemento de países de la Unión Europea y grandes productores como China y Estados Unidos. Se puede concluir entonces que la producción de cemento en Colombia es altamente competitiva en términos energéticos, ya que se posee un uso eficiente de la energía, estando en similitud de consumo energético a los países con mayor volumen de producción de cemento en el mundo, lo que indica que la brecha energética en producción de cemento en Colombia a nivel tecnológico es muy corta.

En el sector cerámico se utilizan principalmente hornos tipo túnel y de rodillos y como combustible predomina el gas natural. Normalmente las empresas que utilizan hornos tipo túnel aprovechan el calor residual mediante un sistema de recuperación de calor en las etapas de secado o maduración de la materia prima. La obsolescencia tecnológica en este sector se determinó en nivel medio-bajo, debido a la presencia de sistemas de control de combustión y de proceso, al igual que la implementación de quemadores más eficientes y de bajo impacto ambiental. Con respecto a los mejores consumos específicos a nivel internacional, los hornos tipo túnel poseen consumos de más del doble, mientras que los hornos de rodillos se acercan más al mejor consumo y se mantiene en el mismo nivel del consumo reportado por la UPME pocos años atrás. Lo anterior permite concluir que la industria de producción cerámica debe realizar una migración tecnológica hacia los hornos de rodillos para el proceso de cocción de la cerámica. Así mismo, se requiere que estos equipos sean complementados con sistemas de recuperación de calor para secado, implementación de quemadores eficientes y mejoramiento de la relación aire-combustible.

Tanto para el sector cemento como para el sector cerámico, los costos ocultos fueron la principal barrera diagnosticada para la implementación de medidas de eficiencia energética, esto debido a que una medida de mejora de la eficiencia energética que aparentemente es costo-efectiva podría no llegar a serlo cuando aparecen costos ocultos que no fueron tomados en cuenta en la valoración de la inversión inicial y por ende no influyeron en el cálculo de los indicadores de viabilidad y rentabilidad. Se puede concluir que es necesario para ambos sectores la promoción de programas demostrativos de tecnologías emergentes y el incentivo a la inversión en proyectos de desarrollo y adaptación de tecnologías a la escala de producción de las empresas colombianas para que a partir de estas experiencias, sea posible reducir el margen de error en la cuantificación de los costos ocultos.

Otra barrera detectada en ambos sectores fue la de valores, la cual tiene relación con la conciencia ambiental y los valores corporativos. Esta barrera está íntimamente ligada con las brechas normativas debido a que, a la hora de considerar inversiones en nuevas tecnologías, las empresas no consideran las tecnologías que pueden mitigar impactos ambientales si estos no hacen parte de restricciones legislativas vigentes. La comparación de la legislación colombiana con la internacional muestra que en Colombia las actuales normativas de tipo ambiental para la industria de alta temperatura en Colombia permiten el uso de tecnologías que no son altamente eficientes en términos energéticos debido a que algunas tecnologías de menor eficiencia pueden llegar a cumplir con los niveles de emisiones estipulados por la legislación, aún cuando existen tecnologías de post-tratamiento de emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> que permitirían un mejor control de las emisiones de los equipos de producción pero sin mejorar la eficiencia energética de los mismos. Además, en Colombia no se encuentran reguladas las emisiones de CO para fuentes fijas, lo cual permite que en procesos de alta temperatura que utilizan combustión sea posible emplear quemadores obsoletos, con bajo control de la relación aire-combustible y/o descalibrados.

## 4.2 Recomendaciones

Para el mejoramiento de los resultados de este estudio, se recomienda la ampliación de la base de empresas intervenidas, lo cual dará un mejor panorama para lograr un consolidado general y no muestral como el que se realizó en este trabajo. No obstante, esta tarea debe ser apoyada desde niveles superiores del ámbito gubernamental debido a que la mayoría de las empresas son renuentes a la intervención por parte de terceros, aun cuando existan acuerdos de confidencialidad de por medio. Así mismo, se necesita que los diagnósticos realizados puedan ser más integrales y de mayor cantidad de tiempo con el fin de identificar oportunidades de mejora en tiempo real.

Se sugiere realizar un estudio complementario que abarque los sectores productivos de alta temperatura restantes no acogidos en este estudio, con el fin de determinar las barreras que afectan a dichos sectores en Colombia.

# A. Anexo: Consumos de energía en distintas tecnologías de la industria cerámica

Debido a que en Colombia no existe una industria dedicada a la producción de tecnología en procesos de secado y cocción de materiales cerámicos (hornos túnel, de rodillos, secadores verticales, horizontales, infrarrojos entre otros) la mayoría de los equipos empleados en las empresas son de origen extranjero, requiriendo ser importados de países como España, Italia y Reino Unido, que son países productores de este tipo de equipos.

Actualmente, se considera que el sector cerámico español junto con el italiano están utilizando las técnicas más eficientes desde el punto de vista energético (Mezquita et al, 2009). Aunque todavía hay algunas medidas de ahorro energético que podrían aplicarse sin una innovación que implique un cambio tecnológico importante, no parecen vislumbrarse nuevas reducciones significativas en el consumo de energía. De esta manera, la evolución de los costos de la energía, la regulación específica de los sistemas de cogeneración y el aumento de la regulación de las emisiones de dióxido de carbono por la Unión Europea podrían limitar el desarrollo a corto plazo del sector cerámico (Mezquita et al., 2009). Algunos de los actuales productores de secadores horizontales junto con algunas de las especificaciones reportadas para cada tecnología se resumen en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1:** Resumen productores internacionales de secadores horizontales de rodillos.

Proveedor	Longitud (m)	Ancho de carga (m)	Potencia térmica (kW)	Temperatura máxima (°C)
Sacmi rodillos monocanal	8,5	1,8–2,9	---	---
Sacmi rodillos bicanal	9,3–26,3	1,9–3,0	---	---

Grupo B&T	2,8 por módulo	2,4–3,0	13,2 por módulo	250
Riedhammer	6–20	1,4–3,0	---	120

Algunos de los actuales productores de secadores verticales junto con algunas de las especificaciones reportadas para cada tecnología se resumen en la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Resumen productores internacionales de secadores verticales.

Proveedor	Humedad de salida (%)	Potencia térmica máxima (kW)	Temperatura máxima (°C)
Sacmi	< 0,5	465 - 581	---
Grupo B&T	---	---	---
BMR	---	---	---
Riedhammer	---	---	250

Algunos de los actuales productores de hornos de cocción junto con algunas de las especificaciones reportadas para cada tecnología se resumen en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Resumen productores internacionales de hornos de cocción.

Proveedor	Longitud horno (m)	Ancho de carga (m)	Temperatura de operación (°C)	Tiempo ciclo de cocción (h)	Consumo específico aproximado (kcal/kg)	Tipo producto
Sacmi rodillos monocanal	50-150	1,8-2,2	1.160-1.250	0,5-2,0	435-465	Baldosas, tejas azulejos
Sacmi rodillos multicanal	50-150	1,9-3,0	1.120-1.250	0,5-2,0	355-450	
NJC Technology	160	2,5	1.150-1.250	0,5-1,0	480-550	
Grupo B&T	100	---	---	---	335-500	
Nutec Brickley túnel	---	---	---	---	---	
Riedhammer rodillos	45-120	1,5-2,0	Max 1.300	7-20	720-880	Sanitaria
Riedhammer túnel	56-150	2,4-4,0	Max 1.300	9-25	390-610	
Riedhammer rodillos multicanal	48-86	2,1	1.100-1.300	1,5-6,0	2.100-4.400	Vajilla
Riedhammer	19-86	0,9-2,1	1.100	1,5-4,0	2.100-4.400	

---

rodillos  
monocanal

---

En la siguiente sección se describen algunas de las principales tecnologías y equipos ahorradores de energía junto con la empresa que los produce.

### **Grupo SACMI**

SACMI es un grupo internacional dedicado a la fabricación de maquinaria, plantas completas para el sector cerámico, de alimentos y de automatización, en estos mercados es un líder reconocido a nivel mundial. Su fuerza reside en la aplicación de tecnología innovadora y su compromiso con la investigación y el desarrollo (Instituto de Tecnología Cerámica, 2012).

El prototipo presentado por SACMI consiste en un sistema para el secado de cerámica ya esmaltada, previo a su decoración mediante inkjet, utilizando para ello radiación por infrarrojo. El objetivo que se persigue mediante esta tecnología es doble, por un lado, el disponer de una superficie perfectamente seca mejora la calidad de la decoración, obteniendo una mayor definición y nitidez del trabajo impreso; por otro lado, es frecuente el ensuciamiento de los inyectores así como la aparición de condensaciones en las superficies expuestas al vapor emitido por el soporte cerámico esmaltado y que todavía no está completamente seco. Al introducir al equipo de secado se evita este fenómeno y permite disminuir la frecuencia de limpieza de los inyectores, mejorando así la productividad de la línea (SACMI Ceramics, 2014).

SACMI cuenta con una variedad de secadores, bajo dos principios diferentes, secadores horizontales, verticales, y monocanal o bicanal, todos sus modelos cuentan con la posibilidad de alimentarse con corrientes de aire caliente proveniente de la sección de cocción, permitiendo así un mejor uso de la energía. Por otro lado, el grupo SACMI cuenta con una línea de recuperación de energía y reducción de impacto ambiental, con equipos como hornos de rodillos monocanal y bicanal.

El horno monocapa está subdividido en módulos prefabricados que hacen más fácil el transporte y el montaje. El diseño especial del bastidor mejora el acceso a la zona de los "pasarrodillos" para las operaciones de floqueado de los rodillos. Los hornos se han equipado con sistemas de recuperación del aire de enfriamiento que se puede utilizar como aire comburente además, se ha instalado en todos los quemadores un cárter de protección (SACMI Ceramics, 2014). El consumo específico de energía varía dependiendo del modelo del horno y del material a cocer, en la Tabla 4-4 se resumen algunos de estos consumos.

**Tabla 4-4:** Especificaciones hornos de rodillos monocapa (SACMI Ceramics, 2014).

Modelo Horno FMS	Longitud óptima (metros)	Temperatura de operación (°C)	Tiempo Promedio Cocción (minutos)	Consumo específico (MJ/T)			
				Gres porcelánico esmaltado/pasta blanca	pavimento en pasta roja	revestimiento mono poroso	bicocción esmaltado
207	50-130						
223	50-130						
250	65-150						
260	65-180						
285	75-200	1160-1250	30-120	1.945	1.883	1.820	1.527
295	75-300						
315	75-300						
325	75-300						
365	100-300						
385	100-300						

La aspiración de los gases de combustión en contracorriente respecto al material entrante, se produce de modo uniforme en la sección, mediante un ventilador y su conducto. El ventilador consta de aspas auto-limpiantes de alto rendimiento y de un rotor de acero especial utilizable hasta temperaturas continuas de 300 °C. La parte superior del conducto de la tubería es de acero inoxidable para evitar que caigan partículas sobre el producto en tránsito. La temperatura de los humos dentro del horno puede regularse gracias a las consideraciones especiales tomadas en la construcción del pre-horno (SACMI Ceramics, 2014).

El horno de rodillos bicanal FBN ha sido diseñado enfocándose en la reducción de consumos energéticos. El continuo incremento del costo de la energía así como la necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> han dado una mayor importancia a los temas del ahorro energético y a la eficiencia de las instalaciones. En el FBN es posible recuperar aire caliente que luego se dirige a los quemadores como aire de combustión, obteniendo un evidente ahorro de combustible. Algunas de las especificaciones de hornos de rodillos bicanal producidos por SACMI con sus respectivos consumos específicos se presentan en la Tabla 4-5.

**Tabla 4-5:** Especificaciones hornos de rodillos bicanal (Instituto de Tecnología Ceramica, 2012).

Modelo Horno FBN	Longitud óptima (metros)	Temperatura de operación (°C)	Tiempo Promedio Cocción (minutos)	Consumo específico (MJ/T)			
				Monococción gres blanco	Monococción gres rojo	Monococción porosa roja	bicocción esmaltado
223	50-120						
250	50-120						
260	65-150						
285	65-150	1.120-1.250	30-120	1.883	1.824	1.757	1.485
295	65-150						
215	75-150						
325	75-150						

Con el sistema XTR se llega a ahorrar hasta el 15 % del aire aspirado por el enfriamiento lento y por las campanas estabilizadoras situadas al final de la sección de enfriamiento, de este modo, el aire de combustión pre-calentado puede llegar a los quemadores a una temperatura máxima de 300 °C (Instituto de Tecnología Ceramica, 2012).

### PROSEC

PROSEC es una empresa de ingeniería en secado y cocción orientada a la industria cerámica (pavimentos, revestimientos, cerámicas estructurales esmaltadas y piedra natural); es una compañía especializada en la fabricación de hornos, secadores y

equipos para aplicaciones especiales, además de ofrecer soporte técnico y servicios adicionales (Prosec, 2014).

En lo relacionado al proceso de secado, esta empresa cuenta con varios modelos que difieren tanto en la forma de secado como en el combustible que los alimenta, cabe destacar el sistema de secado infrarrojo ya sea alimentado por gas o de forma eléctrica, el sistema de calefacción consta de un arreglo de tubos radiantes que aportan calor a la cámara sin alterar su atmósfera interior. Este sistema no pone en contacto directo los gases de combustión con el material a secar lo que permite su uso en aplicaciones donde esto puede ocasionar problemas al material a tratar. La única circulación de gases dentro del secador se realiza en la extracción de la atmosfera húmeda y caliente para optimizar el secado.

La empresa PROSEC también cuenta con una línea de hornos para el proceso de cocción de cerámica, se destaca el horno mono estrato de rodillos el cual está recubierto de ladrillo refractario ligero bajo el plano de los rodillos y de fibra cerámica de última generación en la parte superior (con baja inercia térmica, inferior a la del ladrillo común, mayor capacidad aislante y elevada refractariedad).

Las paredes están formadas por bloques de fibra anclados rígidamente junto con paneles micro-porosos, proporcionando un cierre estático que garantiza mínima emisividad y máxima uniformidad de las condiciones internas de la cámara. La bóveda está compuesta de elementos compactos de fibra, está suspendida de la estructura y permite el acceso al interior del horno por cualquier punto. El transporte del material se efectúa mediante un plano de rodillos, accionado cada uno por engranajes independientes, distribuidos en tramos con motores regulados por variadores de frecuencia. Opcionalmente se puede realizar con cadenas en vez de engranajes. El sistema de combustión lo forman quemadores de alta velocidad y baja presión, con amplio rango de ajuste, equipados con toberas de carburo de silicio y dispositivos de encendido y control de llama automáticos los cuales están distribuidos en grupos de acuerdo a las diferentes zonas del horno (Prosec, 2014).

El control de los parámetros del proceso se regula mediante diferentes elementos (Prosec, 2014):

- Controladores de temperatura compuestos por microprocesador de alta precisión, con sistema de trabajo en PID para las válvulas motorizadas de gas en las distintas zonas del horno.
- Control automático de la presión de enfriamiento, y automático o semiautomático de la aspiración de gases.
- Regulación del enfriamiento por variador de frecuencia y válvulas motorizadas.
- Sistema de encendido y apagado automático de quemadores frente a variaciones excesivas de temperatura.
- Dispositivo informático asociado al cuadro de control que permite visualizar la curva de cocción de forma analógica y digital, así como tener lectura e información de forma directa de alarmas y almacenamiento de curvas de producción para diferentes modelos, etc.

#### **Siti group Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I.**

Es una empresa italiana dedicada al servicio y desarrollo del sector cerámico, apoyando con soluciones técnicas e innovadoras el avance y crecimiento de su actividad y modernización. Presentan un catálogo completo de productos y servicios para cada etapa del proceso productivo de materiales cerámicos que va desde la etapa de preparación de materias primas hasta la logística y transporte del material ya conformado.

En lo referente al proceso de secado cuentan con modelos verticales y horizontales de rodillos. Los modelos verticales se soportan en una estructura tipo torre construida en acero y dividida en módulos de tamaño moderado, se sujeta al piso con sistemas de anclaje y se reviste con paneles aislantes desmontables y sellados con guarniciones especiales resistentes al calor. Las tuberías externas están revestidas con lámina mineral y aluminio para limitar al máximo la dispersión de calor (Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I, 2014b). Mediante un control preciso permite configurar la curva de cocción dependiendo del material.

Los secadores horizontales de rodillos se producen de manera mono o multi canal, de hasta 5 canales, dependiendo de las exigencias de la instalación, el movimiento del material a lo largo del secador se realiza por medio de rodillos metálicos acoplados a un sistema de engranajes que se regulan mediante un motor-reductor para garantizar un avance uniforme del material (Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I, 2014b). El consumo específico para los modelos vertical y de rodillos es menor a 1.300 kcal/kg de agua evaporada y con una diferencia de temperatura en el producto menor a 5 °C (Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I, 2014b).

Para el proceso de cocción la empresa ofrece un modelo de horno túnel de rodillos que utiliza quemadores de alta velocidad y un sistema de enfriamiento potenciado, también se puede obtener en la versión mono o multicanal, esta cuenta con dos superficies totalmente independiente que permiten la cocción de productos con dos ciclos de temperaturas diferentes (Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I, 2014a).

Los hornos proporcionados por B&T poseen un rango de operación de 800 a 1.250 °C y con la posibilidad de adecuar una atmósfera oxidante o reductora según sea lo necesario (Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I, 2014a). La adopción de quemadores de alta velocidad combinados con quemadores radiantes permite obtener ahorros importantes en consumo de energía como se muestra en la Tabla 4-6.

**Tabla 4-6:** Consumo específico horno de rodillos B&T (Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I, 2014a).

Tipo de producto	Consumo específico MJ/T producto		
	Horno estándar	Con recuperación de calor 120 °C	Con recuperación de calor 250 °C
Mono cocción	1.840,9	1.778,2	1.715,4
Bi cocción bizcocho	1.589,9	1.527,3	1.485,3
Tercer fuego esmaltado	1.129,7	1.087,8	1.066,9
Gres porcelánico	2.092	2.008,3	1.945,6
Mono porosa	1.924,6	1.861,8	1.799,1

Todos modelos son versátiles en cuanto al combustible de alimentación, pues se pueden alimentar con gas, GLP, gasóleo e incluso queroseno para alcanzar una temperatura máxima de 250 °C (Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I, 2014b).

### Riedhammer GmbH

La empresa Riedhammer GmbH es un fabricante líder a nivel mundial de plantas de hornos industriales. La sede principal de la empresa está ubicada en Nuremberg y ofrece áreas tradicionales como la cerámica, los productos sanitarios y nuevas e innovadoras tecnologías para la industria del acero y la electrónica (Riedhammer, 2013).

Entre los productos que se destacan se encuentran los hornos túnel y de rodillos para la cocción de material cerámico, en la Tabla 4-7 se resume algunos de los modelos y sus especificaciones técnicas (Riedhammer, 2013).

**Tabla 4-7:** Resumen de consumos específicos de hornos túnel y rodillos.

Modelo	Tipo	Temperatura máxima (°C)	Tiempo de cocción (h)	Consumo neto específico aproximado (GJ/t)	Consumo bruto específico (GJ/t)
TWS	Túnel	1.300	9 – 25	3,77 – 5,86	1,63 – 2,55
TWS-EMS	Túnel		9 – 25	3,26 – 4,18	1,42 – 1,84
TRS	Rodillos		7 – 20	3,77 – 4,60	3,01 – 3,68
TRS-EMS	Rodillos		7 – 20	2,72 – 4,18	2,17 – 3,35
STK	Túnel		10 – 20	4,18 – 5,85	1,82 – 2,55
SSK	Túnel		12 – 20	7,53 – 10,46	3,66 – 5,88
HWS-PF	Intermitente		12 – 30	6,48 – 9,20	3,14 – 4,47
HWS-FL	Intermitente		12 – 30	6,48 – 9,20	3,14 – 4,47
HWS-BB	Intermitente		12 – 30	6,48 – 9,20	3,14 – 4,47

Riedhammer ofrece la más amplia gama de plantas de hornos industriales, principalmente para cocción de productos sanitarios, vajilla, ánodos, cátodos y electrodos, productos refractarios y cerámica técnica (Riedhammer, 2013).

### American Burners

La empresa American Burners está dedicada a la comercialización de sistemas para combustión, quemadores y brinda asistencia técnica. Posee un catálogo amplio de quemadores de los cuales se presentan algunos modelos en la Tabla 4-8.

**Tabla 4-8:** Catálogo quemadores de alta velocidad (American Burners, 2012).

<b>Modelo</b>	<b>70/100</b>	<b>150/200</b>	<b>280</b>	<b>400/1500</b>	<b>1500/3000</b>	<b>Máx</b>
Potencia mínima (kcal/h)	10.000	30.000	30.00	300.000	1.500.000	3.000.000
Potencia máxima (kcal/h)	100.000	200.000	300.000	1.500.000	4.500.000	9.000.000
Combustible	GN o GLP	GN o GLP	GN o GLP	GN o GLP	GN o GLP	GN o GLP
Diámetro llama (mm)	50	45	75	120	240	330
Longitud llama (mm)	400	700	750	890	4.350	8.500
Presión de gas (mbar)	30-90	30-160 GN 30-80 GLP	50-160 GN 30-80 GLP	70-160 GN 50-80 GLP	160 GN 80 GLP	500 GN 250 GLP
Presión aire (mmCA)	350-500	350-500	350-500	350-500	350-500	350-500

### **Esa pyronics International (Said Group)**

Es una empresa productora de equipos y servicios para el proceso de combustión, como quemadores (metálicos, en SIC, en refractario, por tubos radiantes, infrarrojos, premezclados, “mezcla a boquilla”, atmosféricos, oxy-fuel, ribbon, recuperativos, regenerativos etc.), instrumentos de regulación y control predominantemente para bajas presiones de ejercicio tales como válvulas, electroválvulas, actuadores, reguladores de presión y alcance, bridas calibradas, mezcladores manómetros y accesorios varios. En la Tabla 4-9 se puede observar alguno de los principales modelos de quemadores.

**Tabla 4-9:** Tipos de quemadores Esa Pyronics.

<b>Modelo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Potencia máxima (kW)</b>	<b>Temperatura de operación (°C)</b>	<b>Tipo de combustible</b>	<b>Velocidad llama (m/s)</b>	<b>Pre calentamiento 1ire (hasta) (°C)</b>
E3905	regenerativo	300-4000	1400	GLP, Metano,	100	1200

E3903	Auto-recuperativo de llama plana	100-240	1300	Propano GLP, Metano, Propano	90	750
E3902	Tubo radiante recuperativo	28-52 (kW/m <sup>2</sup> )	1050	GLP, Metano, Propano	NA	400
E3901F	Sin llama Auto-recuperativo	30-400	1350	GLP, Metano, Propano	140	750
E3710	Oxi-comb Alta turbulencia	10-5000	1750	GLP, Metano, Propano	---	NA
E3615	Atomización Gas-oil	50-100	Viscosidad Max 3°E	Gas y liquido	---	450
E3610	Dual Gas-oil	100-1650 oil 90-1450 gas	Viscosidad Max 3°E	Gas y liquido	---	450
E3508	Alta velocidad	40-80	---	GLP, Metano, Propano	---	NA
E3501	Llama larga y mezcla en boquilla	10 kW- 17 MW	1750	Varios tipos de combustibles gaseosos	Long llama 300 mm hasta 3500 mm	500
E3006	Panel infrarrojo	300 kW/m <sup>2</sup>	1150	GLP, Metano, Propano	NA	NA
E3004	Sin llama	20-1500	1300	GLP, Metano, Propano	50-60	550

### TCK Forni

Es una empresa italiana dedicada a la fabricación y desarrollo de equipos para el sector cerámico, hornos túnel, rodillos, secadores y sistemas de ahorro energético. TCK ofrece como producto principal un horno de rodillos, que se construye de manera modular y en las versiones monoestrato o bicanal. Algunas de las especificaciones más relevantes son:

- Doce quemadores de alta velocidad con combustión estequiométrica por módulo.

- Volúmenes y temperatura de gases de chimenea reducidos para disminuir las pérdidas energéticas por esa corriente.
- Menor distancia entre quemadores que se traduce en una mayor uniformidad de las temperaturas al interior de la cámara de cocción que reducen al mínimo todos los defectos asociados con la cocción como planaridad, calibre, tonos y corazón negro.
- El material aislante de última generación, permite tener una diferencia de temperatura entre el ambiente y las paredes de hasta 10 °C, que se traduce en bajas pérdidas energéticas por pared.
- En cuanto a consumo energético, el horno TADGAN de TKC Forni promociona ahorros de hasta el 25 % en combustible. Se presenta en la Tabla 4-10 los principales productos y el consumo energético estimado.

**Tabla 4-10:** Productos y Consumo Energético estimado.

Tipo de producto	Temperatura de operación °C	Consumo metano estimado *Nm <sup>3</sup> /h
Porcelanato técnico	1.220	420
Porcelanato esmaltado	1.205	390
Monococción	1.180	360
Bicocción	1.120	320
Biscocho	1.050	270
Monoporosa	1.130	410

\*Nm<sup>3</sup>/h metros cúbicos de metano por hora a condiciones normales (1 atm, 0 °C).

### Thermal Combustion

Empresa especializada en la distribución en América Latina de quemadores a gas, a diésel, duales y de alta capacidad, además de equipos relacionados con combustión. Presenta un catálogo muy variado de quemadores de combustible gaseoso que se resume en Tabla 4-11.

**Tabla 4-11:** Especificaciones quemadores de combustible gaseoso.

Modelo	Potencia (kW)	Modo de operación	Max temperatura aire combustión (°C)	Emisiones CO (mg/kWh)	Emisiones NOx (mg/kWh)
GS3	11-35	Una etapa	40	<40	<120

---

GS5	18-58				
GS10	42-116				
GS20	81-220				
GAS3	130-350				
GAS4	185-465				
GAS5	325-660	Una etapa	60	<100	<170
GAS6	525- 1.050				
RS34 MZ	130-390				<120
RS44 MZ	203-550	Dos etapas			<120
RS50	290-580	progresivo	---	<40	<130
RS 64 MZ	400-850				<120

---



## B. Anexo: Encuesta realizada a los encargados de los procesos en las empresas diagnosticadas

**Tabla 4-12:** Ponderación de preguntas para determinación de barreras económicas, comportamentales y organizacionales

Categoría	Barrera	Pregunta asociada	Codificación	Ponderación
Fallas del mercado	Información imperfecta	¿Conoce los últimos avances en tecnología para mejorar la eficiencia del proceso?	Si=0, No=1	50%
		¿Considera usted que no se requiere un cambio de tecnología?	Si=1, No=0	7%
		¿Conoce las normas ambientales que regulan su proceso de fabricación?	Si=0, No=1	12%
		¿Conoce las diferencias entre las normas ambientales de Colombia y las internacionales?	Si=0, No=1	1%
		¿En la empresa tienen identificadas las áreas de menor eficiencia?	Si=0, No=1	23%
		¿Cree usted que la falta de un sistema de gestión de la energía influye en una posible actualización tecnológica?	Si=1, No=0	7%

<b>Categoría</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pregunta asociada</b>	<b>Codificación</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Fallas del no mercado</b>	Selección adversa	¿La información suministrada por los distribuidores de tecnología es clara, fiable y suficiente?	Si=0, No=1	100%
	Costos ocultos	¿Ha tenido en cuenta los riesgos relacionados con la intervención necesaria para una actualización tecnológica y sus costos ocultos?	Si=0, No=1	100%
	Acceso a capital	¿Dispone capital para realizar un cambio a una tecnología más actual y eficiente?	Si=0, No=1	40%
		¿Piensa usted que no se han realizado las actualizaciones tecnológicas por falta de recursos financieros?	Si=1, No=0	20%
		¿La empresa cuenta con la posibilidad de acceder a créditos bancarios para realizar una actualización tecnológica?	Si=0, No=1	40%
	Riesgo	¿Las inversiones realizadas en actualización tecnológica han sido suficientes y rentables?	Si=0, No=1	5%
		¿Cuál es el tiempo de retorno de inversión que se contempla en la empresa para realizar una actualización tecnológica?*	Largo plazo=0, Mediano plazo=0.5, Corto plazo=1	20%
		¿Considera usted que las actualizaciones tecnológicas requieren de mucho tiempo para realizarse, por los que	Si=1, No=0	30%

<b>Categoría</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pregunta asociada</b>	<b>Codificación</b>	<b>Ponderación</b>
		no resultan en una inversión con un retorno adecuado y realista?		
		¿Considera usted que una implementación tecnológica es poco viable comparada con la rentabilidad del mercado actual?	Si=1, No=0	45%
		¿Cuáles son los criterios de evaluación tecnológica que utiliza? Tipo de Combustible	Si=1, No=0	50%
	Heterogeneidad	¿Cuáles son los criterios de evaluación tecnológica que utiliza? Dificultad de adquisición	Si=1, No=0	50%
		¿La información publicada por los entes de control y regulación (Ministerio de Medio Ambiente, Mina y Energía, CREG, UPME, otros) para el cambio de tecnología es claro con respecto a la relación costo-beneficio de la migración o actualización de las tecnologías utilizadas?	Si=0, No=1	100%
<b>Comportamental</b>	Forma de la información			
	Credibilidad y confianza	¿Acostumbra a contratar personal externo para realizar diagnóstico de eficiencia energética?	Si=0, No=1	100%
	Valores	¿Ha implementado o está implementando tecnología que contribuya a la disminución de la contaminación no contemplada dentro de las normas	Si=0, No=1	70%

Categoría	Barrera	Pregunta asociada ambientales?	Codificación	Ponderación
		¿Cuáles son los criterios de evaluación tecnológica que utiliza? Exigencia Normativa	Si=1, No=0	30%
		¿Ha realizado algún estudio de cambio de tecnología?	Si=0, No=1	10%
		¿Tiene destinado personal capacitado para realizar estudios de actualización y mejoramiento de eficiencia energética en los equipos existentes en la planta?	Si=0, No=1	10%
		¿Las intervenciones de eficiencia energética son menos relevantes cuando la empresa tiene un buen margen de ganancia con la tecnología que se ha venido utilizando?	Si=1, No=0	20%
	Inercia	¿Si hay disponible una tecnología de alta eficiencia usted prefiere contar con ella o continuar con el proceso actual?	Contar=0, Continuar=1	20%
		¿En la empresa tienden a identificar las oportunidades de actualización tecnológica?	Si=0, No=1	10%
		¿Ha existido o actualmente existe un programa o proyecto de actualización tecnológica para mejorar la eficiencia	Si=0, No=1	30%

<b>Categoría</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pregunta asociada</b>	<b>Codificación</b>	<b>Ponderación</b>
		energética?		
	Racionalidad limitada	¿Cuáles son los criterios de evaluación tecnológica que utiliza? - Consumo específico	Si=0, No=1	40%
		¿Cuáles son los criterios de evaluación tecnológica que utiliza? Competencia y tendencia del mercado	Si=0,5, No=0	30%
		¿Cuáles son los criterios de evaluación tecnológica que utiliza? Costo de adquisición.	Si=1, No=0	15%
		¿Cuáles son los criterios de evaluación tecnológica que utiliza? Corto plazo de retorno a la inversión	Si=1, No=0	15%
<b>Organizacional</b>	Poder	¿Se contemplan fundamentalmente otras prioridades antes que una nueva implementación tecnológica?	Si=1, No=0	50%
		¿Piensa usted que no se han realizado las actualizaciones tecnológicas por falta de tiempo?	Si=1, No=0	50%
	Cultura	¿El personal encargado del proceso realiza propuestas de mejora de eficiencia energética?	Si=0, No=1	100%



# Bibliografía

- American Burners. (2012). Quemadores de Alta Velocidad.
- Agrafiotis, C., & Tsoutsos, T. (2001). Energy saving technologies in the European ceramic sector: A systematic review. *Applied Thermal Engineering*, 21(12), 1231–1249. [http://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00006-0](http://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00006-0)
- Anderson, S. T., & Newell, R. . (2004). Information programs for technology adoption: the case of energy-efficiency audits. *Resource and Energy Economics*, 26(1), 27–50. <http://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2003.07.001>
- Apeaning, R. W., & Thollander, P. (2013). Barriers to and driving forces for industrial energy efficiency improvements in African industries - A case study of Ghana's largest industrial area. *Journal of Cleaner Production*, 53, 204–213. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.003>
- Arbini, M., & Marshall, B. (2004). The newest generation of lightweight, low mass kiln furniture can help pottery producers save energy. *Ceramic Industry*, 180(5), 168.
- Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I. (2014a). Catalogo de Hornos.
- Barbieri and Tarozzi Ibérica S.I. (2014b). Catalogo de Secadores.
- Betancourt, D., Díaz, Y., & Martirena, F. (2013). Influencia de la adición de un 2% de carbonato de calcio en el proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja: Etapas de secado y cocción. *Revista Ingenieria de Construccion*, 28(2), 113–124.
- Bocanegra-Bernal, M. H. (2004). Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics. *Journal of Materials Science*, 39(21), 6399–6420. <http://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000044878.11441.90>
- Brunke, J. C., Johansson, M., & Thollander, P. (2014). Empirical investigation of barriers and drivers to the adoption of energy conservation measures, energy management practices and energy services in the Swedish iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 84(1), 509–525. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.078>
- Cagno, E., & Trianni, A. (2014). Evaluating the barriers to specific industrial energy efficiency measures: An exploratory study in small and medium-sized enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 82, 70–83. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.057>

- 
- Cagno, E., Worrell, E., Trianni, A., & Pugliese, G. (2013). A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 290–308. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.007>
- CONAMA. (2012). Current Conama Resolutions published between September 1984 and January 2012.
- Currás, T. A. (2010). Barriers to Investment in Energy Saving Technologies. Case Study for the Energy Intensive Chemical Industry in the Netherlands.
- Deolalkar, S. P. (2009). Handbook for designing cement plant. Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015 (Vol. 1). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Energy star. (2013). Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making.
- European Commission. (2007). Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry. Bruselas. Retrieved from [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/cer\\_bref\\_0807.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/cer_bref_0807.pdf)
- Filkova, I., & Munjundar, A. S. (2006). Handbook of industrial drying systems. (A. S. Munjundar, Ed.), Handbook of industrial drying systems (Vol.1) (fourth).
- Fleiter, T., Fehrenbach, D., Worrell, E., & Eichhammer, W. (2012). Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. *Energy*, 40(1), 84–99. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.025>
- Fleiter, T., Schleich, J., & Ravivanpong, P. (2012). Adoption of energy-efficiency measures in SMEs-An empirical analysis based on energy audit data from Germany. *Energy Policy*, 51, 863–875. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.041>
- Groot et al. (2001). Energy saving by firms: decision-making, barriers and policies. *Energy Economy*, 23, 717–740.
- Hong, S. K., Kang, K. G., Noh, D. S., Lee, E. K., & Ryou, H. S. (2015). Development of an oxy-fuel combustor with fuel preheating for regenerator system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(10), 4555–4559. <http://doi.org/10.1007/s12206-015-0954-8>
- Instituto de Tecnología Cerámica. (2012). Double-channel roller kiln.
- Instituto de Tecnología Cerámica. (2012). Informe de feria: cevisama 2012.
- Joint research centre. (2013). Production of Cement , Lime and Magnesium Oxide.

- Kostka, G., Moslener, U., & Andreas, J. (2013). Barriers to increasing energy efficiency: Evidence from small-and medium-sized enterprises in China. *Journal of Cleaner Production*, 57(2013), 59–68. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.025>
- Labahn, & Kohlhaas. (1985). *Prontuario del cemento*.
- Madloul, N. ., Saidur, R., Rahim, N, A., & Kamalisarvestani, M. (2013). An overview of energy savings measures for cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18–29.
- Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042–2060. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>
- Mezquita, a., Monfort, E., & Zaera, V. (2009). Sector azulejero y comercio de emisiones: Reducir de emisiones de CO<sub>2</sub>, benchmarking Europeo. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica Y Vidrio*, 48(4), 211–222.
- Monfort, E., Mezquita, A., Mallol, G., Granel, R., & Vaquer, E. (2008). Guía de ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana, 243. Retrieved from <http://www.aven.es>
- Nicolau, V. D. P., & Dadam, A. P. (2009). Numerical and experimental thermal analysis of a tunnel kiln used in ceramic production. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 31(4), 297–304. <http://doi.org/10.1590/S1678-58782009000400003>
- Okazaki, T., & Yamaguchi, M. (2011). Accelerating the transfer and diffusion of energy saving technologies steel sector experience-Lessons learned. *Energy Policy*, 39(3), 1296–1304. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.001>
- Prosec. (2014). *Tecnología Aplicada al Secado y Cocción*.
- Quinteiro, P., Araújo, A., Dias, A. C., Oliveira, B., & Arroja, L. (2012). Allocation of energy consumption and greenhouse gas emissions in the production of earthenware ceramic pieces. *Journal of Cleaner Production*, 31, 14–21. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.032>
- Ren, T. (2009). Barriers and drivers for process innovation in the petrochemical industry: A case study. *Journal of Engineering and Technology Management*, 26, 285–304.
- Riedhammer. (2013). *Firing your products right*.
- Rohdin, P., & Thollander, P. (2006). Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden. *Energy*, 31(12), 1836–

1844.

- Rohdin, P., Thollander, P., & Solding, P. (2007). Barriers to and drivers for energy efficiency in the Swedish foundry industry. *Energy Policy*, 35(1), 672–677.
- SACMI Ceramics. (2014). Single-layer roller kiln.
- Sardianou, E. (2008). Barriers to industrial energy efficiency investments in Greece. *Journal of Cleaner Production*, 16(13), 1416–1423.  
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.08.002>
- Shi et al. (2008). Barriers to the implementation of cleaner production in Chinese SMEs: government, industry and expert stakeholders' perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 16(7), 842–852. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.05.002>
- Taylor, M., Tam, C., & Gielen, D. (2006). Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry. IEA - WBCSD Workshop: Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry, (September), 4–5.
- Thollander, P., & Ottosson, M. (2008). An energy efficient Swedish pulp and paper industry—exploring barriers to and driving forces for cost-effective energy efficiency investments. *Energy Efficiency*, 1, 21–34.
- Thollander, P., & Palm, J. (2013a). Improving energy efficiency in industrial energy systems (Vol. 1). Springer. <http://doi.org/10.1007/978-1-4471-4162-4>
- Thollander, P., & Palm, J. (2013b). Improving energy efficiency in industrial energy systems. <http://doi.org/10.1007/978-1-4471-4162-4>
- Tobias, F., Ernst, W., & Wolfgang, E. (2011). Barriers to energy efficiency in industrial bottom-up energy demand models—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3099-3111.
- Transportpolicy. (2014). China: Air Quality Standards.
- Trianni, A., & Cagno, E. (2012). Dealing with barriers to energy efficiency and SMEs: Some empirical evidences. *Energy*, 37(1), 494–504.  
<http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.005>
- Trianni et al. (2013). Barriers to industrial energy efficiency in foundries: A European comparison. *Journal of Cleaner Production*, 40, 161–176.  
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.040>

- Trianni et al. (2013). Empirical investigation of energy efficiency barriers in Italian manufacturing SMEs. *Energy*, 49(1), 444–458.  
<http://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.012>
- Trianni et al. (2013). Innovation and adoption of energy efficient technologies: An exploratory analysis of Italian primary metal manufacturing SMEs. *Energy Policy*, 61(430–440). <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.034>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2006). *Ahorro De Energía En La Industria Cerámica*.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2013). *Ahorro de energía en la industria del cemento*. Bogotá. Retrieved from  
<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/cemento.pdf>
- Venmans, F. (2014). Triggers and barriers to energy efficiency measures in the ceramic, cement and lime sectors. *Journal of Cleaner Production*, 69, 133–142.  
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.076>
- Wentemi, R., & Thollander, P. (2013). Barriers to and driving forces for industrial energy efficiency improvements in African industries – a case study of Ghana’s largest industrial area. *Journal of Cleaner Production*, 53, 204–213.
- Worrell, E., Kermeli, K., & Galitsky, C. (2008). Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making. *An Energy Star Guide for Energy and Plant Managers*. Lawrence Berkeley National Laboratory, (November 2015).  
<http://doi.org/LBNL-4779E>
- Worrell, E., Martin, N., & Price, L. (2000). Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. *Energy*, 25(12), 1189–1214. [http://doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00042-6](http://doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00042-6)
- Zhang Z, Jin X, Yang Q, Z. Y. (2013). An empirical study on the institutional factors of energy conservation and emissions reduction: Evidence from listed companies in China. *Energy Policy*, 57, 36–42. <http://doi.org/doi:10.1016/j.enpol.2012.07.011>