 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## **ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS HORNOS CREMATORIOS DEL CEMENTERIO SAN PEDRO**

JOHAN ALEXIS RENDON VALLE  
INGENIERIA ELECTROMECANICA

Luis Fernando Cardona Sepulveda

Asesor

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA  
MEDELLÍN-COLOMBIA  
2017**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

En este trabajo se realizará un estudio de los hornos crematorios del cementerio San Pedro evaluando las cantidades de energía que se consumen durante el proceso determinando la cantidad de esta energía que se va en pérdidas y de ese modo plantear alternativas para aumentar la eficiencia del consumo. Para esto se realizará una auditoria energética para identificar las pérdidas actuales de energía en los hornos, ya sea por fugas, recalentamiento de los equipos o errores en el montaje, determinar la temperatura a la que salen los gases por la chimenea, entre otras razones. Posteriormente se realizará una propuesta a la empresa en la cual se plantearán alternativas para aumentar el ahorro de energía en base a los resultados obtenidos y así poder reducir costos operativos.

Teniendo en cuenta que el ahorro de energía es una prioridad en la actualidad, pensando en optimizar las utilidades en una empresa, son de gran importancia la implementación de estudios donde se diagnostique que cantidades de energía se desperdician y con base a ello plantear fórmulas, para reducir las mencionadas pérdidas aumentando así las ganancias.

*Palabras clave:* Hornos crematorios, perdidas de energía, ahorro, auditoria energética.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

---

Agradezco enormemente a mi familia especialmente a mis padres los cuales siempre me brindaron su apoyo incondicional para alcanzar las metas propuestas, y siempre estuvieron ahí, mediante sus contribuciones ayudaron a formarme como profesional, a todos los docentes que intervinieron de una manera positiva durante este proceso académico, entregando sus conocimientos, dedicados al arte de la enseñanza formando así nuevos y calificados profesionales, a compañeros de estudio con los cuales desarrolle grandes lazos de amistad y con los cuales se complementaron aprendizajes, y se compartieron experiencias que alimentan los conocimientos obtenidos.

Un agradecimiento especial al cementerio San Pedro empresa que me abrió sus puertas y me brindo la confianza para la realización de este trabajo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# TABLA DE CONTENIDO

## Contenido

1.	INTRODUCCIÓN .....	6
1.1	Objetivos.....	6
1.1.1	Objetivo general .....	6
1.1.2	Objetivo específico .....	6
2.	MARCO TEÓRICO .....	8
2.1	Horno de combustión .....	8
2.2	Breve historia de la cremación .....	9
2.3	Datos de la empresa .....	11
2.3.1	Ubicación .....	11
2.3.2	Historia.....	11
2.4	Hornos crematorios cementerio San Pedro .....	12
2.4.1	Partes del horno .....	12
2.5	Auditoria energética .....	13
2.6	Normativa ambiental vigente .....	14
3.	METODOLOGÍA.....	15
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
4.1	Diagnóstico de la combustión.....	16
4.2	Cálculo de las pérdidas de calor en las paredes .....	19
4.2.1	Paredes laterales.....	21
4.2.2	Piso.....	22
4.2.3	Parte posterior .....	23
4.2.4	Parte superior .....	24
4.2.5	Parte delantera .....	25
4.2.6	Total del horno.....	26
4.3	Cálculo del calor de combustión.....	26
4.4	Cálculo calor perdido en los humos.....	27
4.5.	Calor de la carga .....	28
4.6	Balance de energía.....	28
4.7.	Alternativas para aumentar la eficiencia.....	29

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.7.1. Recirculación de los humos de la chimenea ..... 29

4.7.2 Calentamiento de agua en un intercambiador de calor a contraflujo ..... 31

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....34

REFERENCIAS .....**¡Error! Marcador no definido.**

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Teniendo en cuenta el constante incremento del precio de la principal fuente de energía de los hornos crematorios del cementerio San Pedro (gas natural), y el necesario aumento de la productividad obliga a plantear propuestas que ayuden a optimizar los recursos, de tal manera poder estar en vigencia en cuestión de precios, para poder competir en condiciones de calidad en servicios.

Por otra parte, el endurecimiento de la normativa actual a nivel de asuntos ambientales obliga a estar siempre en una constante mejora y a proponer salidas de energías más limpias para tener así un impacto menor sobre la contaminación en nuestro planeta, en este caso muy relacionado con la emisión de gases.

Con el fin de encontrar las formas de cómo podemos realizar mejoras que conlleven al ahorro de energía es necesario primero realizar una auditoria energética, la cual nos dará un diagnóstico claro de la situación actual del consumo y pérdidas de energía, en base a esta auditoria es que se plantearan propuestas viables para optimizar el proceso.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo general

Realizar un estudio acerca del consumo energético actual de los hornos crematorios del cementerio San Pedro, teniendo en cuenta las pérdidas de energía del mismo, para basados en los resultados plantear soluciones de modo que ayuden a un ahorro de combustible considerable.

### 1.1.2 Objetivo específico

- Realizar una auditoria energética donde se evalúe el estado actual de los hornos donde se midan o estimen consumos de aire/combustible y temperaturas del proceso.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Realizar balances de energía para determinar las pérdidas energéticas que se presentan en el horno.
- Presentar una serie de propuestas basadas en los resultados obtenidos, para que el área administrativa pueda tomar la decisión que consideren más adecuada para el aprovechamiento de la energía que actualmente se está perdiendo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Horno de combustión

Un horno de combustión es aquel que transforma la energía química de un combustible en calor, el cual se usa para aumentar la temperatura de aquellos materiales colocados en su interior. Es un espacio encerrado en el que se produce calor mediante la oxidación química de un combustible. Uno de los requisitos de un horno es que debe completar el encendido del quemador para obtener la reacción de combustión que se desea. Es esencial que se tomen en consideración al horno y al quemador en combinación para proporcionar los cuatro elementos de una buena combustión:

- Intima mezcla del combustible y el oxidante (aire).
- Admisión de cantidades suficientes de oxidantes para quemar por completo el combustible.
- Una temperatura suficiente para encender la mezcla combustible-aire y completar su combustión.
- El tiempo necesario de residencia para que la combustión sea completa.

Un horno de combustión se compone esencialmente de:

- Hogar o cámara de combustión: donde se alojan los quemadores y se generan los gases de combustión. Puede coincidir con la cámara de calentamiento o ser una cámara independiente.
- Cámara de calentamiento: existen distintos tipos, dependiendo de la forma de operación del horno y de su función.
- Revestimiento aislante: recubre todas las cámaras y equipos del horno.
- Chimenea y tubos de escape de gases de combustión: Suelen ir acoplados a intercambiadores para aprovechamiento de la energía calorífica que poseen, previo a la emisión a la atmósfera. (Sanchez Mero, 2012)





Figura 1. Horno crematorio típico. (Hornos incineradores con tratamiento de gases)

## 2.2 Breve historia de la cremación

La cremación es la disposición final de un cuerpo humano muerto por medio de la incineración controlada en un horno de combustión, llamado horno crematorio.

Los primeros hornos de combustión fueron introducidos por los egipcios y babilonios, que empezaron a usarlos hace más de 5000 años para labores de cocción de alimentos. En esencia consistían en una especie de tapa de adobe en forma de campana que, por primera vez, permitía que los alimentos se cocinasen tanto por arriba como por abajo. En otras culturas de la antigüedad se usaban hornos abiertos, para lo que se hacía un hueco o zanja que se forraba de piedras y luego se calentaban con fuego antes de colocar los alimentos, que se cubrían con vegetación.

En algunos países y culturas todavía se usa el “tandoor”, un tipo de horno muy antiguo de forma cilíndrica, que opera con fuego de carbón vegetal en su parte inferior y que llega a alcanzar temperaturas superiores a 400 °C. Este horno permite ahumar los alimentos al

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

tiempo que se cocinan, pero tiene el inconveniente de que, al tener la puerta por la parte superior, se experimentan fuertes pérdidas de calor. (Historia de la cremación)



Figura 2. Horno tandoor

Sin embargo, las primeras cremaciones (en los días del hombre prehistórico) no se hacían en hornos crematorios sino al aire libre. El hombre primitivo descubrió los beneficios del calor y de las llamas, y el fuego se constituyó en una deidad. El hombre primitivo expresaba su devoción a este Dios y buscó la protección para sus miembros fallecidos a través de la cremación.

La cremación aparece en la península griega durante la edad de bronce. Los griegos creían que al cremar el cuerpo se purificaba el alma y la desprendía de su forma terrenal. Se menciona en obras, tales como “La Iliada”, el proceso crematorio en piras al aire libre de Héctor y otros personajes importantes como una ceremonia asociada al valor, patriotismo y gloria militar.

Cuando el pueblo romano absorbió las ideas y costumbre griegas, ellos también comenzaron con la cremación. Cuando se desarrolló el imperio Romano, la cremación era ampliamente practicada y los restos cremados eran colocados en elaboradas urnas funerarias y muchas veces alojados en un columbario. Alrededor del 400 A.C. la mayor parte de Europa se convirtió al cristianismo y el enterramiento reemplazo casi completamente a la cremación.

En la cultura occidental la cremación volvió a la práctica en los 1800s. En 1869, durante la Conferencia Médica Internacional de Florencia, Italia, se pasó una resolución urgiendo a todas las naciones representadas a promover la cremación como “una ayuda para la salud pública, y para salvaguardar el mundo de los vivos”. Este movimiento de apoyo a la cremación se extendió a través de Europa, América y Australia. En 1873 el profesor Bruno

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Brunetti desarrolló una cámara crematoria que fue expuesta en la Exposición de Viena. Al año siguiente, el Cirujano de la Reina Victoria, Sir Henry Thompson, fundó la Sociedad de Cremación de Inglaterra, preocupado por todas las cosas relacionadas con la salud pública. En 1878 se construyeron los primeros crematorios de Inglaterra (Woking) y en Alemania (Gotha).

## 2.3 Datos de la empresa

### 2.3.1 Ubicación

El museo cementerio San Pedro está ubicado en el barrio Sevilla en la carrera 51 N° 68 - 68 PBX: 516 7650, cerca de la estación hospital del metro de Medellín, hospital San Vicente de Paul.

### 2.3.2 Historia

El Cementerio de San Pedro fue fundado el 22 de septiembre de 1842 por iniciativa del médico Pedro Uribe Restrepo, quien en compañía de 50 socios representantes de la élite antioqueña decidieron construir el primer cementerio privado de la Villa de la Candelaria. Los socios, dando cumplimiento a las disposiciones higiénicas del momento que ordenaba construir los cementerios a las afueras de los centros poblados, adquirieron un terreno al norte de la Villa para la construcción del Cementerio, este inicialmente se llamó San Vicente de Paúl y posteriormente Cementerio de San Pedro, que es como lo conocemos hoy en día.

El recinto fue bendecido el 21 de mayo de 1845 y su primera capilla el 20 de diciembre de 1849, esta fue remplazada en 1897 por un kiosco que se ubicó en el centro del patio circular, para dar paso en 1929 a la construcción de la capilla actual con planos elaborados por el arquitecto belga Agustín Goovaerts, actualmente tiene una declaratoria como patrimonio cultural de la nación.

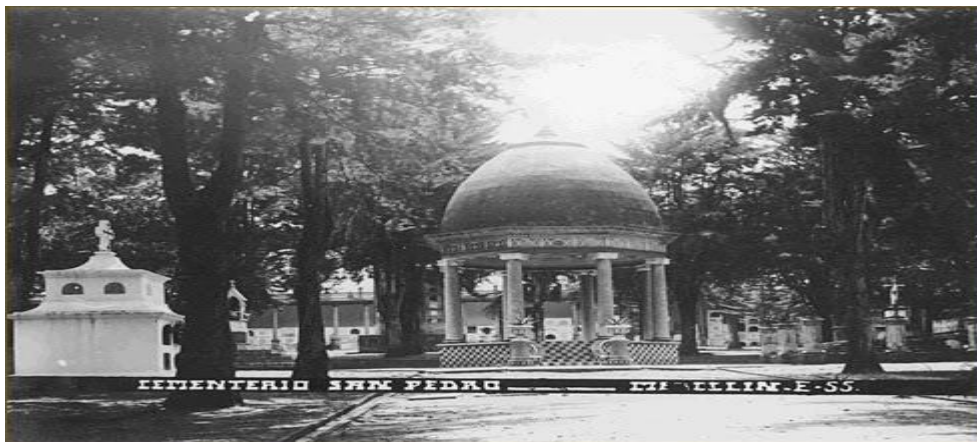


Figura 3. Foto cementerio San Pedro inicios de siglo (Cementerio San Pedro)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el Cementerio de San Pedro se encuentran inhumados un alto número de personas influyentes en la historia política nacional como los expresidentes: Mariano Ospina Rodríguez, Carlos E Restrepo y Pedro Nel Ospina. Comerciantes y empresarios como: José María Sierra “Pepe Sierra”, Carlos Coriolano Amador Fernández, Luis Eduardo Yepes, Germán Saldarriaga del Valle, Alejandro Ángel y Alejandro Echavarría. Artistas y escritores como: María Cano, Pedro Nel Gómez, Bernardo Vieco, Jorge Isaac, Efe Gómez, Ciro Mendía y Fidel Cano. (Cementerio San Pedro)

## 2.4 Hornos crematorios cementerio San Pedro

En 1984 se instaló el primer horno crematorio del Cementerio Museo, convirtiéndose en el segundo lugar en prestar los servicios de cremación en la ciudad de Medellín. Desde entonces se ha prestado un servicio continuo y constante de calidad.

En la actualidad se cuenta con 2 equipos crematorios que están entre los más modernos del país instalados en el 2014, los cuales son sometidos a un mantenimiento profesional, cumpliendo con la normativa actual que cuida no sólo del medio ambiente sino también del proceso de cremación del cuerpo. La construcción y montaje de los hornos crematorios que hay en este momento fueron llevados a cabo por la empresa IMAD S.A.S. industria colombiana, ubicada en Cali.

Ambos hornos son sometidos a una jornada laboral de 16 horas diarias de las cuales están en funcionamiento un promedio de 6 horas, por lo que son máquinas críticas, por lo que hay tener un especial cuidado y mantener dichos equipos en óptimas condiciones, para evitar pérdidas en la producción.

### 2.4.1 Partes del horno

La fundación museo cementerio San Pedro cuenta con dos hornos crematorios IMAD modelo HC 100 con sistema de enfriamiento de gases. Cada horno crematorio tiene una dimensión de 1.68m de ancho \* 3.47m de largo \* 2.18m de alto. Es una unidad tipo multicámara ya que el horno se compone internamente de tres cámaras: Cámara primaria o de combustión, cámara de oxidación, cámara posterior o de postcombustión con tiempo de retención de gases de dos segundos. Cuenta además con un enfriador de gases, chimenea para salida de gases y plataforma para tener acceso a toma de muestras.

*Cámara primaria o de combustión:* Tiene un piso construido en cemento refractario además de una capa de ladrillo refractario del grupo 33, una capa de ladrillo aislante del grupo 26.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Su techo está construido en cemento refractario concrax 1700 y una manta térmica de 1" de espesor. Las paredes laterales se componen de una capa de ladrillo refractario del grupo 33 una capa de ladrillo aislante del grupo 26 una manta térmica de 1" de espesor y una lámina de acero inoxidable de  $\frac{1}{8}$ ". La parte de la puerta o delantera está compuesta por una capa de ladrillo aislante del grupo 26, una manta térmica de 1" de espesor, 2 láminas de acero inoxidable de  $\frac{1}{8}$ ". Y por último la parte posterior tiene una capa de ladrillo refractario del grupo 33, ladrillo aislante del grupo 26, manta térmica de 1" de espesor y lamina e n acero inoxidable de  $\frac{1}{8}$ ".

*Cámara de oxidación:* Tiene un ventilador modelo C-108 que trabaja a 1730 RPM y tiene un caudal máximo de 66000 SCFH, el cual le introduce aire al horno independiente del aire de combustión.

*Cámara de postcombustión:* Diseñada para retener los gases que serán expulsados por la chimenea por un periodo de 2 segundos como lo indica la resolución 909 del 2008, normas y estándares de emisión fuentes fijas.

## 2.5 Auditoria energética

Una auditoria energética tiene como finalidad evaluar el uso de la energía y el proponer medidas que permitan mejorar la eficiencia para conseguir un ahorro de energía. Al analizar los factores que influyen en la eficiencia energética se pueden definir los parámetros necesarios para poder evaluar la eficiencia y proponer métodos de optimizar tales parámetros de modo que sea vea reflejado en una posible disminución en el consumo de energía.

Hasta hace algunos años, el estudio detallado de los costes energéticos no era una prioridad para muchas empresas, pero en los últimos años, debido al incremento considerable de los costos energéticos, la gestión de los recursos y consumos energéticos es un tema relevante en la gestión diaria de sus líderes o responsables de mantenimiento de las empresas.

Las Auditorías energéticas son realizadas por ingenieros especializados en el tema, que estudian la situación actual (consumos y necesidades) y proponen medidas de ahorro como conclusión en su informe final. Los costos de una Auditoría Energética son variables ya que pueden depender del ingeniero encargado de realizarlo y de la complejidad de la instalación o del equipo objeto de estudio. Normalmente está regida por la organización internacional de estandarización ISO, mediante la Norma ISO 50002.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.6 Normativa ambiental vigente

Como toda empresa, especialmente aquellas que pueden tener un impacto ambiental están regidas por normativas a nivel nacional y están sometidas a controles de rigor que garanticen su cumplimiento. El no cumplimiento de las normas acarrearía una serie de sanciones, entre las cuales están multas con un valor alto en lo monetario, restricciones de operaciones e incluso el cierre total de la planta.

Con el fin de cumplir con la normatividad actual y evitar así algún tipo de sanción es de primordial importancia tener conocimiento de que normas rigen para fuentes de emisión fijas y en especial hornos crematorios, debido a que en el momento de realizar nuestro proyecto es necesario no interferir en dicho cumplimiento, sino todo lo contrario la idea es ayudar a facilitar este cumplimiento. Para ello es necesario tener presente que las normas que tiene que respetar un horno crematorio en Colombia son:

- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial resolución número (909) 5 de junio de 2008 (Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones). Especialmente el capítulo XIV “estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para hornos crematorios”. Donde están los artículos del 61 al 66
- RESOLUCIÓN 5194 DE 2010 (diciembre 10) Diario Oficial No. 47.925 de 16 de diciembre de 2010 MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Por la cual se reglamenta la prestación de los servicios de cementerios, inhumación, exhumación y cremación de cadáveres. Específicamente el capítulo III que refiere a las cremaciones en los artículos del 28 al 33.
- Reglamento para prestación de servicios en la fundación cementerio san pedro, en su capítulo 10 con sus artículos del 26 al 29.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3. METODOLOGÍA

---

Mediante una inspección de los hornos y sus componentes, se empieza a identificar algunos factores que pueden estar generando pérdidas de energía, conociendo claramente cómo trabaja y la manera de trabajar de sus partes, es más fácil y óptima la determinación de las pérdidas de calor puntuales.

Se deben tener claros los consumos de combustible (gas natural) de modo que así se facilita tener claro al final la cantidad del mismo que se ahorrara al final del procedimiento. Uno de los factores que genera pérdidas en un sistema son las fugas presentes, por lo que se debe tener un especial cuidado en el momento de realizar el análisis de la red.

Se elaboran cálculos para estimar todas las entradas y salidas de energía del horno crematorio, tales como perdidas de calor por las paredes o chimenea. Una vez elaborados los cálculos es cuando se procede a realizar el análisis de balance de primera ley de la termodinámica, el cual permite estimar la eficiencia actual del sistema. Posterior a dicho análisis es cuando se plantean algunas opciones para el ahorro energético, estas van sujetas a factores como la disponibilidad de espacio físico para su implementación, los costos que trae su implementación y la cantidad de ahorro que se puede obtener.

Una vez se redacte el reporte se entrega a la empresa con la finalidad que ellos tengan el conocimiento y unas buenas bases para que se inclinen por la opción que consideren más adecuada acorde a las capacidades y necesidades de la empresa y obtengan el mayor beneficio de la opción seleccionada.

Muchos de los datos que fueron necesarios durante el proceso de auditoria energética fueron tomados de las pruebas isocinéticas, las cuales deben realizarse cada seis meses. Estas pruebas son realizadas por Conhintec, empresa consultora en diagnóstico, identificación, valoración, análisis, monitoreo y control, en materias de la Higiene Ocupacional y Medio Ambiente.

En base al diagnóstico que determine Conhintec, el cementerio San Pedro debe entregar un reporte al área metropolitana donde manifieste y demuestre que está dentro de los parámetros que establecen las normas que rigen el funcionamiento de los hornos crematorios.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Estado actual de los hornos

En el momento de realizar la auditoria se inspeccionaron los hornos crematorios en su totalidad desde las conexiones de gases provenientes de la red de EPM hasta su disposición final en los quemadores, se determinó la forma de la mezcla entre aire y gas, así como se analizaron los resultados de las últimas pruebas isocinéticas comprobando de esta manera que los hornos si cumplen con las normativas vigentes que rigen a las fuentes de emisiones fijas.

	Variable	Valor	Unidad	Fuente
Tparedes laterales	Temperatura paredes laterales	35	°C	Medida con termopar tipo K y multímetro
Tpiso	Temperatura piso del horno	38	°C	Medida con termopar tipo K y multímetro
Tparte posterior	Temperatura posterior	30	°C	Medida con termopar tipo K y multímetro
Tparte superior	Temperatura superior (techo)	37	°C	Medida con termopar tipo K y multímetro
Tparte delantera	Temperatura puerta delantera	47	°C	Medida con termopar tipo K y multímetro
T gases	Temperatura Gases combustión	189	°C	Pruebas isocinéticas
Ḃhumos	Caudal de gases de combustión	23.7	m <sup>3</sup> /min	Pruebas isocinéticas
Horas de trabajo	Tiempo	6	Por día	Registro de cremaciones
Cantidad de cremaciones	Tiempo	3	Por día	Registro de cremaciones
Consumo mensual de gas	Volumen	4474	m <sup>3</sup>	Factura de EPM
Duración de cremación	Tiempo	2	Horas	

Tabla 1. Datos obtenidos inicialmente en la auditoria energética

Por ser estos hornos modernos y relativamente nuevos (instalación no superior a 4 años) no se encontraron anomalías en sus componentes, no se detectaron fugas en la red de gas, cumplen óptimamente con la norma de emisiones, el personal está bien calificado para la operación de los hornos. Como es de suponer con unos equipos tan modernos como con los que cuenta el cementerio San Pedro están equipados con una numerosa cantidad de

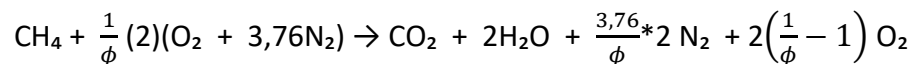


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

sensores y alarmas que facilitan la operación del horno tanto para evitar así daños al equipo y garantizar el cumplimiento de las normas.

## 4.2 Diagnóstico de la combustión

Suponiendo que el gas natural es 100% metano, se puede escribir la reacción global de combustión con exceso de aire como:



Donde  $\phi$  es el dosado:

$$\phi = \frac{F_{\text{real}}}{F_{\text{estequimetrico (ideal)}}} \quad \text{con} \quad F = \frac{\text{Masa de combustible}}{\text{Masa de aire}}$$

Para metano en condiciones estequiométricas (ideales) se requiere  $17,19 \frac{\text{kg,aire}}{\text{kg,CH}_4}$ , es decir  $F_{\text{CH}_4} = 0,05817 \frac{\text{kg,CH}_4}{\text{kg,aire}}$ . El dosado es muy importante porque permite diagnosticar la combustión:

- Si  $\phi > 1$  la combustión ocurre con menos aire del mínimo requerido (respecto al caso estequiométrico). En este caso parte del combustible sale por la chimenea sin quemarse y las emisiones son altas.
- Si  $\phi = 1$  la combustión es estequiométrica (ideal)
- Si  $\phi < 1$  la combustión ocurre con exceso de aire (respecto al caso estequiométrico). Este es el caso más común, ya que se debe garantizar suficiente aire para que haya combustión completa y temperaturas de gases de combustión más bajas.

De acuerdo a la prueba isocinética (Anexo1), el porcentaje volumétrico de oxígeno en los gases de combustión es 11,3 %, es decir, fracción volumétrica de  $\text{O}_2 = 0.113$  o también fracción molar de  $\text{O}_2 = 0.113$  (ambas fracciones son iguales para gases ideales). Este porcentaje está expresado en base seca, es decir sin el vapor de agua de los gases de combustión. Esto ocurre porque el agua es separada antes de los gases ser analizados, para evitar daños internos en el equipo de medición. De esta manera se puede despejar el dosado a partir de la definición de fracción molar del oxígeno:

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$X_{O_2} = \frac{\eta_{O_2}}{W_{total \text{ de los productos de combustion(excepto agua)}}} = \frac{2\left(\frac{1}{\phi}-1\right)}{2\left(\frac{1}{\phi}-1\right) + \frac{7,52}{\phi} + 1} = 0,113$$

Donde  $\eta$  = número de moles en los productos y W es el peso molecular

Por tanteo se obtiene que:  $\phi_{real} \approx 0.49$ .

Este resultado muestra que existe un exceso importante de masa de aire en el sistema respecto al caso estequiométrico. Dado que límite inferior de inflamabilidad para el metano es 0.5 se puede ver que el sistema tiene algunas infiltraciones (aire externo que ingresa al sistema). Estas infiltraciones se estiman en el balance energético.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Resumen Datos						
Muestreo Numero		1	2	3	Promedio	
Hora Inicio Muestreo		10:35	12:33	14:43		hh:mm
Hora Final Muestreo		11:35	13:33	15:43		hh:mm
Factor de calibración del sistema	(Y)	1,027	1,027	1,027		
Coefficiente de orificio del sistema	( $\Delta H @$ )	48,578	48,578	48,578		
Coefficiente tubo pitot	( $C_p$ )	0,840	0,840	0,840		
Diámetro boquilla Actual	( $D_{no}$ )	12,660	12,660	12,660		mm
Datos Prueba Chimenea						
Volumen Inicial Medidor	( $V_{m_i}$ )	37,287	37,774	38,282		m <sup>3</sup>
Volumen Final Medidor	( $V_{m_f}$ )	37,766	38,258	38,798		m <sup>3</sup>
Total Volumen Medido	( $V_m$ )	0,479	0,484	0,516	0,493	m <sup>3</sup>
Tiempo Total Muestreo	( $\theta$ )	60	60	60	60,0	min
Temperatura Promedio Medidor	( $t_{m_{prom}}$ )	29	36	39	35	°C
Temperatura Promedio Chimenea	( $t_{c_{prom}}$ )	188	197	182	189	°C
Presión Barométrica	( $P_b$ )	638	638	638	638	mm Hg
Presión Estática Chimenea	( $P_s$ )	2,00	2,00	2,00	2,00	mm H <sub>2</sub> O
Presión Absoluta Chimenea	( $P_c$ )	638,15	638,1	638,1	638,1	mm Hg
Promedio ( $\Delta H$ ) Actual	( $\Delta H_{prom}$ )	6,0	6,0	7,0	6,3	mm H <sub>2</sub> O
Presión Absoluta Medidor	( $P_m$ )	638,4	638,4	638,5	638,5	mm Hg
Promedio Presión Velocidad ( $\Delta p$ )	( $\Delta p$ )	0,2	0,2	0,2	0,2	mm H <sub>2</sub> O
Promedio Raíz Presión Velocidad ( $\Delta p^{1/2}$ )	( $\Delta p^{1/2}$ )	0,47	0,45	0,47	0,46	(mm H <sub>2</sub> O) <sup>1/2</sup>
Contenido Humedad						
Impingers 1-3 Volumen Agua	( $V_n$ )	64,0	54,0	54,0	57,3	ml
Impinger 4 Peso Sílica Gel	( $W_n$ )	25,6	27,2	25,4	26,1	g
Total Volumen Agua Colectado	( $V_c$ )	89,7	81,3	79,5	83,5	ml
Volumen Vapor Agua Condiciones Ref	( $V_{m_{ref}}$ )	0,121	0,110	0,108	0,113	m <sup>3</sup>
Volumen Medidor Condiciones Ref	( $V_{m_{ref}}$ )	0,407	0,402	0,426	0,412	m <sup>3</sup>
% Humedad Calculado en la Chimenea	( $B_{m(calc)}$ )	22,97	21,49	20,19	21,55	%
Datos Análisis Gases						
% Dióxido de Carbono	(%CO <sub>2</sub> )	6,0	5,2	3,7	5,0	%
% Oxígeno	(%O <sub>2</sub> )	10,6	11,2	12,0	11,3	%
x - % Monóxido de Carbono	(%CO)	0,0037	0,0025	0,0007	0,0023	%
% Nitrógeno	(%N <sub>2</sub> )	83,4	83,6	84,2	83,7	%
Peso Molecular Gas Seco	( $M_s$ )	29,39	29,28	29,08	29,25	g/g-mol
Peso Molecular Gas Húmedo	( $M_h$ )	26,77	26,86	26,84	26,82	g/g-mol
Datos Volumétricos de Caudal						
Velocidad Promedio Gas en la Chimenea	( $v_s$ )	2,27	2,17	2,25	2,23	m/s
Área de la Chimenea	( $A_c$ )	0,177	0,18	0,18	0,18	m <sup>2</sup>
Caudal Condiciones de la Chimenea	( $Q_{sc}$ )	24,14	23,1	23,9	23,7	m <sup>3</sup> /min
Caudal Condiciones Ref Base Seca	( $Q_{sc,ref}$ )	10,087	9,7	10,5	10,1	m <sup>3</sup> /min
% Isocinetismo	(I)	92,8	95,5	93,0	93,8	%
Datos Laboratorio Material Particulado (MP)						
Masa de Partículas Filtro	( $m_f$ )	4,6	38,1	17,4	20,0	mg
Masa de Partículas Acetona	( $m_a$ )	1,9	1,4	1,1	1,5	mg
Masa de Partículas Blanco Acetona	( $m_{wb}$ )	0,5	0,5	0,5	0,5	mg
Masa Total Partículas	( $m_t$ )	6,1	39,0	18,1	21,1	mg
Tasa de Emisión Material Particulado (MP)						
Concentración de Partículas	( $c_s$ )	14,95	96,97	42,48	51,47	mg/m <sup>3</sup>
Flujo de Emisión de Partículas	( $E_p$ )	0,01	0,06	0,03	0,03	kg/h
Con. de Partículas Corregida Oxig	( $c_c$ )	14,33	98,94	47,38	53,55	mg/m <sup>3</sup>
Flujo de Emisión de Partículas Corregido	( $E_p$ )	0,009	0,057	0,030	0,03	kg/h

Anexo 1. Resultados pruebas isocinética.

### 4.3 Cálculo de las pérdidas de calor en las paredes

Se calculan utilizando la teoría de resistencias térmicas. Se procede primero a hallar los Watts disipados por cada pared del horno para después sumarlas y encontrar el total.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Cada circuito térmico se compone de resistencias térmicas por conducción, para pared plana, conectadas en serie. Ya que la temperatura interna del horno se conoce (por el control del equipo) y la externa se mide con un termopar, los Watts disipados se estiman con la siguiente formula:

$$\dot{Q} = \frac{T_{interna} - T_{externa}}{R}$$

La resistencia por una capa de pared se calcula con  $R = \frac{L}{k A}$ , donde:

L es el espesor de pared [m]

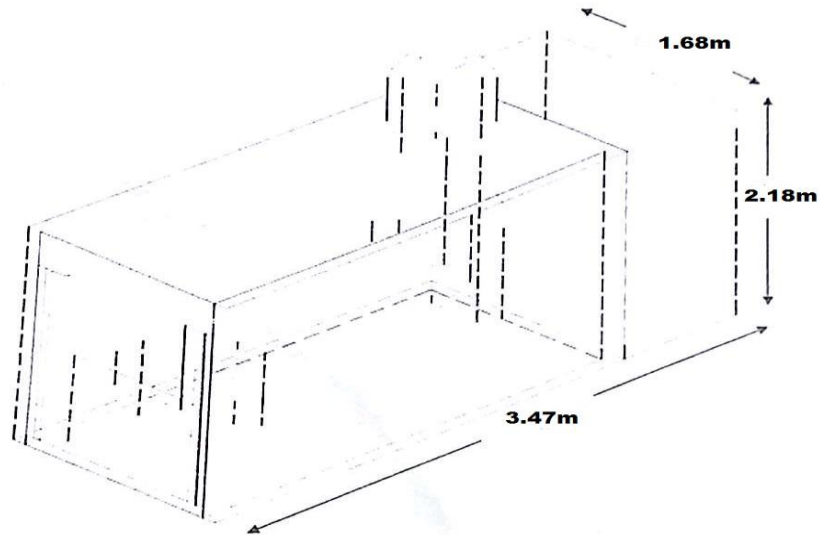
k es la conductividad térmica del material [W/(m°C)]

A es el área transversal de conducción de calor [m<sup>2</sup>]

$\dot{Q}$  es la tasa de transferencia de calor por pérdida en las paredes [W]

Material	Conductividad térmica (K)	Fuente
<b>Adobe refractario U-33</b>	$0.9304 \frac{W}{m^{\circ}C}$	Catalogo macer.cl
<b>Adobe aislante U-26</b>	$0.318862 \frac{W}{m^{\circ}C}$	Catalogo Erecos
<b>Ceraboard 100</b>	$0.11 \frac{W}{m^{\circ}C}$	Catalogo morganthermalceramics.com
<b>Lamina acero inoxidable 1/8"</b>	$14.9 \frac{W}{m^{\circ}C}$	Libro termodinámica de cengel

Tabla 2. Tabla de conductividades térmicas de los componentes de paredes del horno.



Área requerida instalación horno crematorio marca IMAD mod. HC-100.

Figura 4. Plano del horno con sus medidas exteriores. (Hornos incineradores con tratamiento de gases)

#### 4.3.1 Paredes laterales

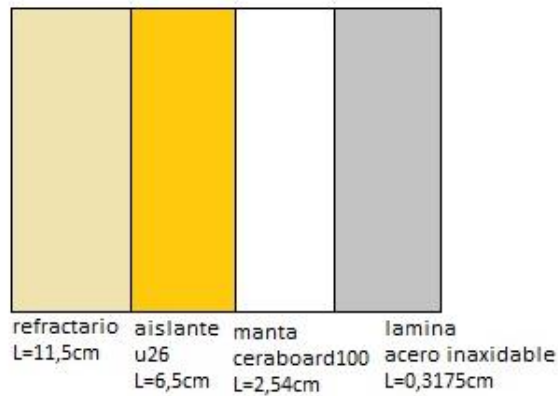


Figura 5. Componentes de la pared lateral (lado izquierdo es el interior del horno, lado derecho el exterior, fuente propia).

$$R_{\text{pared}} = R_{\text{refractario}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{manta\_ceramica}} + R_{\text{lamina}}$$

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$R_{\text{refractario}} = \frac{L_{\text{refractario}}}{K_{\text{refractario}} \cdot A_{\text{refractario}}} = \frac{0.11\text{m}}{0.9304 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot 7.5646\text{m}^2} = 0.0156 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{aislante}} = \frac{L_{\text{aislante}}}{K_{\text{aislante}} \cdot A_{\text{aislante}}} = \frac{0.065\text{m}}{0.318662 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot 7.5646\text{m}^2} = 0.02696 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{manta}} = \frac{L_{\text{manta}}}{K_{\text{manta}} \cdot A_{\text{manta}}} = \frac{0.0254}{0.11 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot 7.5646\text{m}^2} = 0.0305 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{lamina}} = \frac{L_{\text{lamina}}}{K_{\text{lamina}} \cdot A_{\text{lamina}}} = \frac{0.003175}{14.9 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot 7.5646\text{m}^2} = 2.8169 \cdot 10^{-5} \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{refractario}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{manta}} + R_{\text{lamina}} = 0.07309 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$\dot{Q}_{\text{paredes}} = \frac{T_{\text{interna}} - T_{\text{externa}}}{R_{\text{total}}} = \frac{800^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}}{0.07309 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}} = 10466.5481 \text{ W}$$

Al ser 2 paredes laterales iguales el resultado se multiplica por 2 es decir:

$$10466.5481 \cdot 2 = 20933.0962 \text{ W}$$

#### 4.3.2 Piso

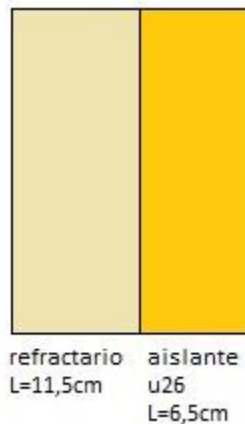


Figura 6. Componentes del piso (lado izquierdo es el interior del horno, lado derecho el exterior, fuente propia).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$R_{\text{piso}} = R_{\text{refractario}} + R_{\text{aislante}}$

$$R_{\text{refractario}} = \frac{L_{\text{refractario}}}{K_{\text{refractario}} \cdot A_{\text{refractario}}} = \frac{0.11\text{m}}{0.9304 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot 3.990606\text{m}^2} = 0.02962 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{aislante}} = \frac{L_{\text{aislante}}}{K_{\text{aislante}} \cdot A_{\text{aislante}}} = \frac{0.065\text{m}}{0.318662 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot 3.990606\text{m}^2} = 0.051114 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{refractario}} + R_{\text{aislante}} = 0.02962 + 0.051114 = 0.080734 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$\dot{Q}_{\text{piso}} = \frac{T_{\text{interna}} - T_{\text{externa}}}{R_{\text{total}}} = \frac{800^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C}}{0.080734 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}} = 9438.403 \text{ W}$$

#### 4.3.3 Parte posterior

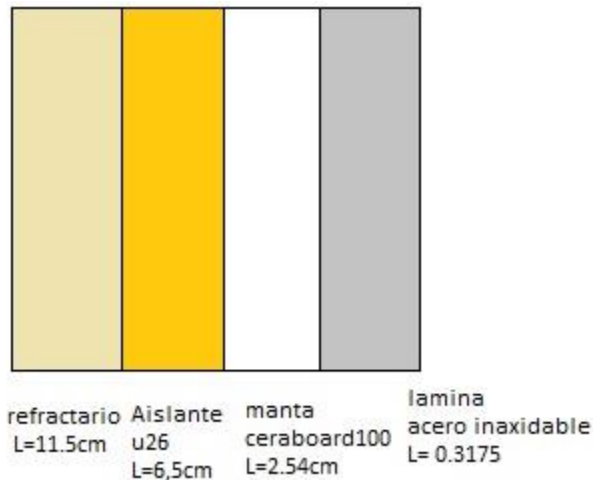


Figura 7. Componentes de la parte posterior (lado izquierdo es el interior del horno, lado derecho el exterior, fuente propia).

$R_{\text{posterior}} = R_{\text{refractario}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{lamina}} + R_{\text{manta}}$

$$R_{\text{refractario}} = \frac{L_{\text{refractario}}}{K_{\text{refractario}} \cdot A_{\text{refractario}}} = \frac{0.11\text{m}}{0.9304 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot 3.6624\text{m}^2} = 0.03228 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$R_{\text{aislante}} = \frac{L_{\text{aislante}}}{K_{\text{aislante}} \cdot A_{\text{aislante}}} = \frac{0.065 \text{ m}}{0.318662 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 3.6624 \text{ m}^2} = 0.055695 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{manta}} = \frac{L_{\text{manta}}}{K_{\text{manta}} \cdot A_{\text{manta}}} = \frac{0.0254}{0.11 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 3.6624 \text{ m}^2} = 0.06305 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{lamina}} = \frac{L_{\text{lamina}}}{K_{\text{lamina}} \cdot A_{\text{lamina}}} = \frac{0.003175}{14.9 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 3.6624 \text{ m}^2} = 5.818 * 10^{-5} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{refractario}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{manta}} + R_{\text{lamina}} = 0.1511 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$\dot{Q}_{\text{posterior}} = \frac{T_{\text{interna}} - T_{\text{externa}}}{R_{\text{total}}} = \frac{800^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{0.1511 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}} = 5095.96 \text{ W}$$

#### 4.3.4 Parte superior

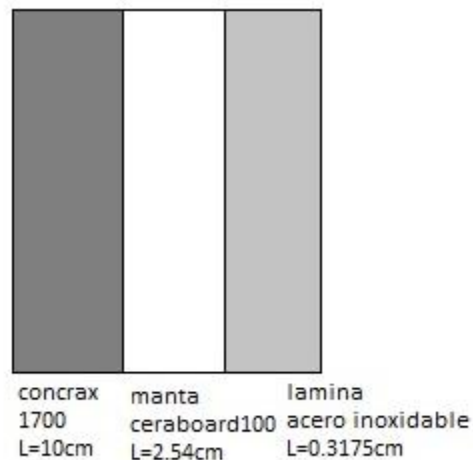


Figura 8. Componentes de la pared superior (lado izquierdo es el interior del horno, lado derecho el exterior, fuente propia).

$$R_{\text{superior}} = R_{\text{concrax}} + R_{\text{manta}} + R_{\text{lamina}}$$

$$R_{\text{concrax}} = \frac{L_{\text{concrax}}}{K_{\text{concrax}} \cdot A_{\text{concrax}}} = \frac{0.1}{15 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} * 3.990606 \text{ m}^2} = 0.001670 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$R_{manta} = \frac{L_{manta}}{K_{manta} \cdot A_{manta}} = \frac{0.0254}{0.11 \frac{W}{m^{\circ}C} * 3.990606m^2} = 0.05786 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_{lamina} = \frac{L_{lamina}}{K_{lamina} \cdot A_{lamina}} = \frac{0.003175}{14.9 \frac{W}{m^{\circ}C} * 3.990606m^2} = 0.00005339 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_{total} = R_{concrax} + R_{manta} + R_{lamina} = 0.059583 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$\dot{Q}_{superior} = \frac{T_{interna} - T_{externa}}{R_{total}} = \frac{800^{\circ}C - 37^{\circ}C}{0.059583 \frac{^{\circ}C}{W}} = 12805.666W$$

#### 4.3.5 Parte delantera

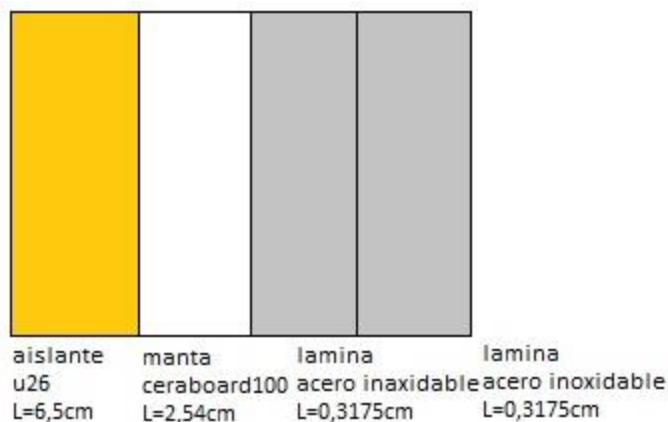


Figura 9. Componentes de la pared delantera (lado izquierdo es el interior del horno, lado derecho el exterior, fuente propia).

$$R_{delantera} = R_{aislante} + R_{manta} + R_{lamina} * 2$$

$$R_{aislante} = \frac{L_{aislante}}{K_{aislante} \cdot A_{aislante}} = \frac{0.065m}{0.318662 \frac{W}{m^{\circ}C} * 3.6624m^2} = 0.055695 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_{manta} = \frac{L_{manta}}{K_{manta} \cdot A_{manta}} = \frac{0.0254}{0.11 \frac{W}{m^{\circ}C} * 3.66246m^2} = 0.06305 \frac{^{\circ}C}{W}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$R_{\text{lamina}} = \frac{L_{\text{lamina}}}{K_{\text{lamina}} * A_{\text{lamina}}} = \frac{0.003175}{14.9 \frac{W}{m^{\circ}C} * 3.6624 m^2} = 5.818 * 10^{-5} \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{aislante}} + R_{\text{manta}} + R_{\text{lamina}} * 2 = 0.11886 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$\dot{Q}_{\text{delantera}} = \frac{T_{\text{interna}} - T_{\text{externa}}}{R_{\text{total}}} = \frac{800^{\circ}C - 47^{\circ}C}{0.11886 \frac{^{\circ}C}{W}} = 6335.184 W$$

#### 4.3.6 Total del horno

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{paredes}} + \dot{Q}_{\text{piso}} + \dot{Q}_{\text{posterior}} + \dot{Q}_{\text{superior}} + \dot{Q}_{\text{delantera}}$$


$$\dot{Q}_{\text{total}} = 20933.1 + 9438.4 + 5096 + 12805.7 + 6335.2 = 54608 W \text{ ó } 54.608 kW$$

#### 4.4 Cálculo del calor de combustión

De la factura de gas (Anexo 2) se tiene que el consumo mensual para los dos hornos es en promedio  $8949 m^3$ , es decir en cada horno consume en promedio  $4474.5 m^3$  al mes. En la factura se reporta que el poder calorífico del gas natural consumido es  $37258.9465 \frac{kJ}{m^3}$ . En promedio se realizan 77 cremaciones por horno en el mes es decir 3 por día, asumiendo la duración promedio de una cremación 2 horas nos da un total de 648000 segundos.

$$\dot{Q}_{\text{combustion}} = \frac{4274.5 m^3 * 37258.9465 \frac{kJ}{m^3}}{648000 s} = 245.777 kW$$

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 <b>GAS NATURAL REGULADO 103095880</b>																									
<b>INFORMACIÓN BÁSICA</b> Categoría: Comercial Unica Cr 51 Cl 68 -68 (interior 1 ) Antioquia - Medellín Instalación: 05652100800680001 Plan: No Residencial Tarifa Plena	<b>INFORMACIÓN CONSUMO</b> Consumo Del 01 Feb Al 29 Feb Días De Consumo 29 Consumo 8,549 M3 Poder Calor. 37258.9465 Kj/m3 Equivalencia Kwh 88,480.000 (consumo * Poder Calorif / 3600)																								
<b>INFORMACIÓN TÉCNICA</b> Duración Interru .00 Horas Ind.presión 100.00 % Ind.respuesta 100.00 % Ind.odorización 100.00 % Interrupción Max .00	PAGO PERIODO ANTERIOR \$12,677,020.00 <b>VALORES FACTURADOS</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>M3</th> <th>Costo</th> <th>Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Consumo</td> <td>8,549x</td> <td>1,311.860=</td> <td>11,215,091.14</td> </tr> <tr> <td>Cargo Fijo</td> <td></td> <td>\$</td> <td>2,860.77</td> </tr> <tr> <td>Contrib Consumo</td> <td></td> <td>\$</td> <td>998,143.11</td> </tr> <tr> <td>Contrib Cargo Fijo</td> <td></td> <td>\$</td> <td>254.61</td> </tr> <tr> <td>Ajuste</td> <td></td> <td>\$</td> <td>.37</td> </tr> </tbody> </table>		M3	Costo	Valor	Consumo	8,549x	1,311.860=	11,215,091.14	Cargo Fijo		\$	2,860.77	Contrib Consumo		\$	998,143.11	Contrib Cargo Fijo		\$	254.61	Ajuste		\$	.37
	M3	Costo	Valor																						
Consumo	8,549x	1,311.860=	11,215,091.14																						
Cargo Fijo		\$	2,860.77																						
Contrib Consumo		\$	998,143.11																						
Contrib Cargo Fijo		\$	254.61																						
Ajuste		\$	.37																						
<b>COMPONENTES DEL COSTO</b> Componentes Variables: (\$/m3) Compra 716.46 Distribución 223.51 Transporte 371.88 Confiabilidad .00 Comercializac .00 Componentes Fijas (\$/factura) Comercializac 2,860.77																									
<b>TOTAL GAS NATURAL REGULADO \$ 12,216,350.00</b>																									
<b>TOTAL GAS \$ 12,216,350.00</b>																									

Anexo 2. Factura de gas.

#### 4.5 Cálculo calor perdido en los humos

De las pruebas isocinéticas se tiene que:

- Caudal humos =  $\dot{V}_{\text{humos}} = 23.7 \frac{m^3}{min} = 0.395 \frac{m^3}{s}$
- Temperatura promedio chimenea = 189°C = 462.15K

Mediante el software ESS se halló que para una temperatura de 189°C la densidad del aire

es  $0.6483 \frac{kg}{m^3}$ . Por lo cual el flujo másico es:

$$\dot{m} = \rho * \dot{V}$$

$$\dot{m} = 0.6483 \frac{kg}{m^3} * 0.395 \frac{m^3}{s} = 0.256 \frac{kg}{s}$$

El cálculo de pérdidas de calor en los gases de la chimenea se obtiene con la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \dot{m} * (h_{\text{interna}} - h_{\text{ambiente}})$$

Donde h es la entalpía específica.

$$\dot{Q} = 0.256 \frac{kg}{s} * (h_{600^\circ\text{C}} - h_{20^\circ\text{C}})$$

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\dot{Q} = 0.256 \frac{kg}{s} * (903.2 \frac{kJ}{kg} - 293.5 \frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{Q}_{\text{humos}} = 156 \frac{kJ}{s} \text{ ó } 156 \text{ kW}$$

#### 4.6. Calor de la carga

En el caso de los hornos crematorios la carga equivale a los cuerpos que son incinerados; como los cuerpos que llegan diariamente a cremación son tan variables, el análisis se hará con un cuerpo promedio de peso 80kg. Para este análisis se supondrá que el cuerpo humano es 60% agua, lo que equivaldría a 48kg de agua en este caso.

La entalpia del agua a 20°C (temperatura ambiente) es igual a  $h_{\text{agua}} = 83.915 \frac{kJ}{kg}$

Una vez el cuerpo en el horno a una temperatura de 800°C el agua ya es vapor y a una presión de 0.1MPa, la entalpia es  $h_{\text{vapor}} = 4160.2 \frac{kJ}{kg}$

$$\dot{Q}_{\text{carga}} = \frac{m}{\Delta t} (h_{\text{caliente}} - h_{\text{frio}}) = \frac{48kg}{2*3600} (4160.2 - 83.915) \frac{kJ}{kg}$$

$\Delta t$  = corresponde al tiempo de exposición del cuerpo (tiempo de cremación(2horas))

$$\dot{Q}_{\text{carga}} = 27.15 \text{ Kw}$$

#### 4.7 Balance de energía

$$\sum \dot{Q}_{\text{entrantes}} - \sum \dot{Q}_{\text{salientes}} = 0$$

$$(\dot{Q}_{\text{combustión}}) - (\dot{Q}_{\text{carga}} + \dot{Q}_{\text{perdidas paredes}} + \dot{Q}_{\text{humos}} + \dot{Q}_{\text{otros calores}}) = 0$$

$$(245.777 \text{ kW}) - (27.15 \text{ kW} + 54.608 \text{ kW} + 156 \text{ kW} + (-8 \text{ kW})) = 0$$

Existe un desbalance de 8 kW, el cual es un 3% del calor de combustión total, valor que se considera razonablemente preciso para este análisis. Las razones para que exista un desbalance son infiltraciones y otras pérdidas de calor no consideradas.

La eficiencia de primera ley en este caso es:

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{carga}}}{\dot{Q}_{\text{combustión}}} = \frac{27.15\text{kW}}{245.777\text{kW}} = 11\%$$

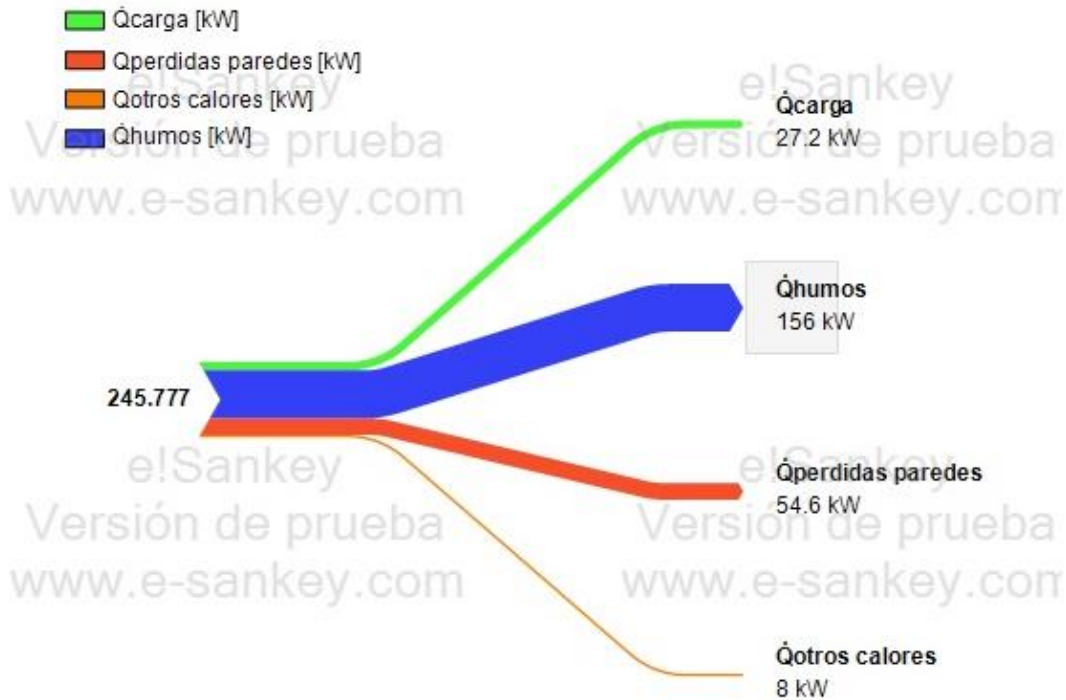


Figura 10. Diagrama balance de energía (fuente propia desarrollada con e-sankey)

#### 4.8. Alternativas para aumentar la eficiencia

A continuación, se plantearán 2 alternativas viables tanto en consumo de recursos como en ahorro real de energía, las cuales fueron presentadas a la parte administrativa del cementerio para que realicen un estudio de viabilidad por costos y obtención de beneficios.

##### 4.8.1. Recirculación de los humos de la chimenea

Consiste en tomar una cantidad del humo que sale por la chimenea (en este caso el 50%) y hacerlo pasar nuevamente por el quemador, de modo que se necesitara una menor temperatura de la llama lo que se traduce en un menor consumo de energía y por tal razón un ahorro significativo en la factura del gas.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

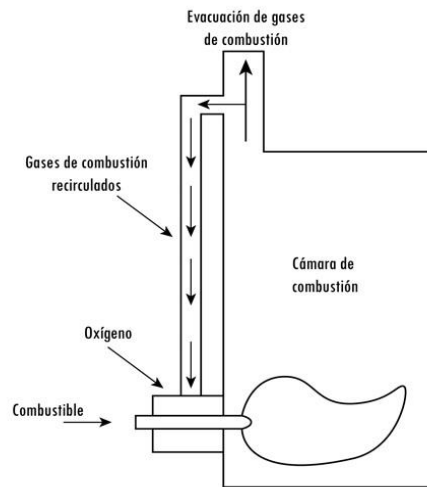


Figura 11. Grafica recirculación de energía. (Madero & Munera, 2013)

Como tenemos que por la chimenea salen 156kW de potencia y al pretender recuperar el 50% tenemos que serían integrados nuevamente al sistema 78kW por lo que el ahorro (por horno) se puede calcular así:

$$78 \frac{kJ}{s} * \frac{1m^3}{37258.95kJ} * 1311 \frac{pesos}{m^3} * 648000s = 1778450.11 \text{ pesos/mes}$$

Donde:

- $78 \frac{kJ}{s}$  es la potencia de los humos que se haría recircular al sistema
- 37258.95kJ es el poder calorífico del gas (dado por la factura)
- $1311 \frac{pesos}{m^3}$  es el precio del gas por metro cúbico
- 648000 son la cantidad de segundos en la que opera un horno en un mes

La eficiencia en este caso es:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{carga}}{\dot{Q}_{combustión}} = \frac{27.15kW}{245.777kW - 78kW} = 16.3\%$$

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

No se considera un porcentaje mayor de recirculación de gases porque en la práctica la combustión se hace difícil de estabilizar con un exceso tan alto de aire y porque la temperatura de combustión disminuye.

#### 4.8.2 Calentamiento de agua en un intercambiador de calor a contraflujo

Lo que se pretende en esta alternativa es utilizar la potencia de los humos que sale por la chimenea caliente agua, la cual puede ser utilizada en las duchas y otras aplicaciones en las cuales se necesiten agua caliente.

Se va a enfriar aire en un intercambiador de tubo doble a contraflujo, desde  $600^{\circ}\text{C}$  hasta  $200^{\circ}\text{C}$ , cuyo flujo másico es  $0.256 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ . El enfriamiento se va a realizar por medio de agua de la red de la que se dispone a  $20^{\circ}\text{C}$  con un flujo másico de  $1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ . El tubo interior es de pared delgada y tiene un diámetro de 15 cm.

Si el coeficiente de transferencia de calor total del intercambiador es de  $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$ , (tabla 11-1 libro Transferencia de calor Cengel 4ta edición) por lo que se requiere determinar la longitud necesaria de ese intercambiador para lograr el enfriamiento deseado.

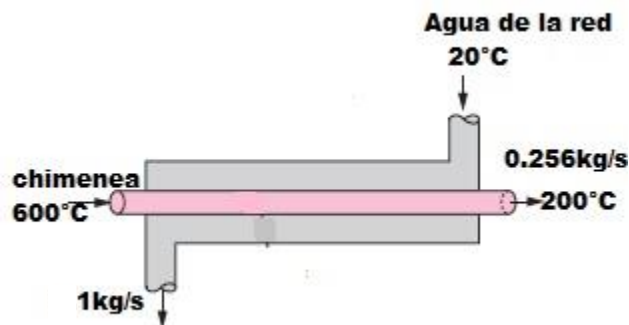


Figura 12. Diagrama intercambiador de calor de tubo doble a contraflujo (Cengel, 2007)

#### Suposiciones

- 1 Existen condiciones estables de operación.
- 2 El intercambiador de calor está bien aislado de modo que la pérdida de calor hacia los alrededores es despreciable.
- 3 Los cambios en las energías cinéticas y potenciales de las corrientes de los fluidos son despreciables.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- 4 No se tiene incrustación.
- 5 Las propiedades de los fluidos son constantes y se determinan a partir de las tablas de los apéndices del libro Transferencia de calor Cengel 4ta edición para aire (A-15) y agua (A-9).

Lo primero es determinar la tasa de la transferencia de calor, que se puede determinar a partir de un balance de primera ley:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{recuperado}} &= [\dot{m}C_p(T_{\text{entrada}} - T_{\text{salida}})]_{\text{aire}} \\ &= \left[ 0.256 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1.069 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} * (600^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}) \right] = 106.9 \text{ kW} \end{aligned}$$

Nuevamente utilizando primera ley:  $\dot{Q} = [\dot{m}C_p(T_{\text{salida}} - T_{\text{entrada}})]_{\text{agua}}$

Despejando la temperatura de salida para el agua:

$$T_{\text{salida}} = T_{\text{entrante}} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}C_{p\text{agua}}}$$

$$= 20 + \frac{106.9 \text{ kW}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}})}$$

$$= 45.5^\circ\text{C}$$

Conocidas las temperaturas de entrada y de salida de los dos fluidos, la diferencia de temperatura media logarítmica ( $T_{ml}$ ) para este intercambiador a contraflujo queda

$$\Delta T_1 = T_{h\text{entrada}} - T_{c\text{salida}} = (600^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}) = 555^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{h\text{salida}} - T_{c\text{entrada}} = (200^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 180^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{555 - 180}{\ln\left(\frac{555}{180}\right)} = 333.03^\circ\text{C}$$



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ahora necesitamos saber el área superficial del intercambiador  $A_s$

$$\dot{Q} = U * A_s * \Delta T_{ml}$$

$$A_s = \frac{\dot{Q}}{U * \Delta T_{ml}} = \frac{106900W}{1000 \frac{W}{m^2 * ^\circ C} * 333.03^\circ C} = 0.32m^2$$

Sabiendo el área superficial tenemos que calcular la longitud de la tubería que sería necesaria teniendo en cuenta un diámetro de tubería de diámetro de 15cm.

$$A_s = \pi * D * L$$

$$L = \frac{A_s}{\pi * D} = \frac{0.32m^2}{\pi * (0.15m)} = 0.67m$$

Esta es una longitud de intercambiador razonable que puede ser fabricado en la realidad.

El ahorro en este caso es:

$$106.9 \frac{kJ}{s} * \frac{1m^3}{37258.95kJ} * 1311 \frac{pesos}{m^3} * 648000s = 1778450.11 \text{ pesos/mes}$$

La eficiencia en este caso es:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{carga}}{\dot{Q}_{combustión}} = \frac{27.15kW}{245.777kW - 106.9kW} = 19.6\%$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Durante el estudio realizado a los hornos crematorios del cementerio San Pedro, se logró detectar que debido a su gran e importante aislamiento hace que una cantidad considerable de la energía que entra en él se pierda a través de las paredes, también se notó que la cantidad de aire que entra al horno es excesiva. Esto se puede deber a las filtraciones normales del horno como son la puerta, juntas de las paredes, tornillería, entre otras formas por las cuales le puede entrar más aire a la combustión del necesario.

No todos los procesos de cremación resultan de igual manera, ya que hay algunos factores que influyen durante el procedimiento como lo son: el peso del cuerpo, temperatura a la que se encuentre el horno en el momento de iniciar la cremación, inclusive el género del cuerpo hace que el proceso cambie; esto se debe a que un cuerpo masculino no tiene exactamente la misma combustión que un cuerpo de sexo femenino, al igual el hecho de que en ocasiones se realizan cremaciones de los restos que se sacan después de un entierro de aproximadamente 4 años, lo cual deja solo los restos óseos lo que hace que la cremación sea más corta en cuestión de tiempo y gasto de combustible.

El balance de energía nos permite ver que si es posible plantear algunas alternativas de ahorro. Para el trabajo se propusieron dos alternativas, pero es evidente que para una magnitud tal de energía es posible plantear algunas otras opciones de ahorro igual de viables y beneficiosas, la cuestión con algunas de ellas es el costo de las modificaciones, los tiempos de para de los hornos, el espacio locativo con el que se cuenta. Otro aspecto importante a tener en cuenta a la hora de elegir alternativas para el ahorro energético es el

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

hecho de no infringir con la normativa vigente para el funcionamiento de hornos crematorios.

Como recomendación, siempre será importante tener los equipos operando en óptimas condiciones, lo cual es fundamental para garantizar que los análisis obtenidos durante la auditoria se mantengan constantes, además para evitar que hayan fallas en los procesos y contribuir así tanto al cumplimiento de la norma, como al cuidado del medio ambiente hecho que toma más importancia en un mundo como el de hoy. Para ello es muy importante también que la empresa piense en implementar un plan de mantenimiento que permita que tales condiciones de operación sean siempre una constante.

Parte del trabajo a futuro depende en gran medida, de las decisiones que tome la empresa en base al informe que se entregó donde se plantean las opciones para el ahorro de energía y una vez ellos vean viabilidad y se inclinen por alguna.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

- A. G., G. L., V. V., & H. V. (2013). *Combustion en hornos. distintos tipos de combustible. Cementerio San Pedro*. (s.f.). Obtenido de <http://www.cementeriosanpedro.org.co/>
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa 3° edición*. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A.
- Gordillo Muñoz, G. A., & Valero Mateus, R. (2005). *Evaluación de perdidas energéticas en la planta de fundición de la empresa de herrajes fantaxias Ltda*. Bucaramnga.
- Historia de la cremación*. (s.f.). Obtenido de <http://www.metaltech.com.br/arquivos/histcrem.pdf>
- Historia de los hornos*. (s.f.). Obtenido de <http://www.hornomoruno.com/historia-de-los-hornos.html>
- Hornos incineradores con tratamiento de gases*. (s.f.). Obtenido de <http://imad.com.co/spanish/productos.html>
- Madero, K. C., & Munera, B. H. (2013). *Revisión de la combustión con aire enriquecido con oxígeno como estrategia para incrementar la eficiencia energética*. Medellín.
- R. S., & Zapata, J. C. (2012). *Manual de auditorías energéticas en comunidades de regantes*. Editorial club universitario.
- Reina, J. J. (2014). *Auditoria energetica de un horno de temple de piezas de vidrio*. la rioja.
- Sanchez Mero, J. (2012). *Elaboracion de un programa de mantenimiento para hornos middleby marshall*. Quito.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Johan Alexis Rendon Valle

FIRMA ASESOR [Signature]

SEGUNDA ENTREGA DE INFORME FINAL CON CORRECCIONES  
 PARA CUMPLIR OBJETIVO ESPECIFICO 4. SE SOMETE DE  
 NUEVO A EVALUACION.

FECHA ENTREGA: 28/02/2017  
5:30 PM

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO \_\_\_      ACEPTADO \_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES \_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_  
FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_  
FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_