



**Institución Universitaria**

**DISMINUCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO EN EL PROCESO  
DE PRODUCCIÓN DE CAL, UTILIZANDO RECUPERADORES DE CALOR  
DE LECHO EMPACADO DE COQUE**

**Mónica Lucia Cadavid Diez**

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas  
Medellín, Colombia  
2019



**DISMINUCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO EN EL PROCESO  
DE PRODUCCIÓN DE CAL, UTILIZANDO RECUPERADORES DE CALOR  
DE LECHO EMPACADO DE COQUE**

**Mónica Lucia Cadavid Diez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
en **Magister Desarrollo Sostenible**

Director (a):

Msc. Efrén Giraldo Toro

Codirector:

Msc. Elkin Orlando Vélez

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas  
Medellín, Colombia  
2019



*A mi amor, a mis hijos;  
a mi querida madre y a mi fiel amigo Terry  
a la familia*

## Agradecimientos

A mi esposo, amigo y compañero PhD. John Alexander Pérez docente titular del ITM quien me apoyo en toda la parte emocional, matemática y de laboratorio. A mi asesor, Msc. Efrén Giraldo Toro, su amistad, su paciencia y tolerancia en mis momentos difíciles, y sus regaños en mis mejores momentos. Al Msc. Elkin Vélez, amigo de la vida, de la academia y mi codirector.

A mis profesores de la maestría quienes aportaron conocimiento, alegría y pasión a este trabajo (Diego, Jorge, Juan Carlos, Diana, Juan Camilo, Carlos A, y Lila). Al docente de enlace Diego Fernando, quien con su gran presión logro que culmináramos con éxito todo el programa y Marta, quien a su llegada fue bastante diligente y colaboradora.

A mis compañeros de la maestría, quienes en diferente medida aportaron en lo profesional y personal; con los que, además, he podido compartir momentos muy especiales. En general al ITM por el programa y la oportunidad de estudiar temas actuales y afines con la realidad de Antioquia, el país y el mundo. Al laboratorio de Hidráulica, por prestar los espacios y el recuperador de calor; al laboratorista Vladimir quien me apoyo durante los ensayos.

En general a todos los de cualquier forma apoyaron este excelente y enriquecedor proceso académico.

Gracias totales....

## RESUMEN

Algunos sectores de la industria de la cal en Colombia presentan tecnología obsoleta, los procesos son altamente ineficientes y contaminantes, afectando no solo al ambiente, sino también a la población localizada en las cercanías de las caleras.

El propósito de este proyecto es disminuir el impacto Ambiental mediante el uso de recuperadores de calor de lecho empacado de coque; los gases residuales calientes provenientes del horno de calcinación entran al lecho, le transfieren parte de su energía y salen aún a temperatura alta; si este calor es recuperado sirve para precalentar las materias primas como el coque, logrando disminuir el tiempo necesario para su calentamiento. Cuando esto se logra, se ahorra en combustible y hace que se disminuyan los costos por el combustible ahorrado, como también las emisiones de gases contaminantes al ambiente. En general, al utilizar el recuperador de calor, se mejora el desempeño térmico y productivo y la calidad de vida de los trabajadores y personas que viven en las cercanías.

**Palabras claves:** Recuperador de calor, coque, ahorro energético, eficiencia térmica, calidad del aire.

**ABSTRACT**

The majority of the lime industry in Colombia has obsolete technology, so that the processes are highly inefficient and polluting and this affecting not only the environment, but also the population located near of it.

The purpose of this project is to reduce the environmental impact through the use of coke packed bed heat recovery; the hot waste gases from the calcining oven enter the bed these transfer part of their energy and leave at a lower temperature; This "recovered" heat serves to preheat the materials that go to the process, thus reducing the time needed to heat these materials. When the process time is reduced, it saves on fuel, and this causes the process costs to be reduced and, by the fuel saved, a lot of pollutant gases are also stopped emitting into the environment. In general, when the heat recuperator is used, the productive performance improve thermal and achieve a decrease in process times, with all that this includes; that is, saving money and improving the environment (air quality) in the surroundings of heating and the quality of life of workers and people living nearby of the factory.

**Keywords:** Heat recovery, coke, energy saving, thermal efficiency, air quality.

**CONTENIDO**

<b>RESUMEN .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>Lista de tablas. ....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>12</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
OBJETIVO GENERAL .....	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>1. METODOLOGÍA .....</b>	<b>18</b>
1.1 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN:.....	19
1.1.1 Caracterizar los principales parámetros térmicos y fluido-dinámicos en el recuperador de lecho empacado de coque.....	19
1.1.2 Analizar la incidencia de las variables que intervienen en el lecho empacado de coque con miras a optimizar el rendimiento térmico del proceso.....	19
1.1.3 Plantear un modelo matemático que permita relacionar las variables optimizadas en función de disminuir el impacto ambiental del proceso. ....	20
<b>2. MARCO TEORICO .....</b>	<b>21</b>
2.1 TIPOS DE HORNO PARA EL PROCESO DE CALCINACIÓN .....	22
2.2 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LA CALCINACIÓN.....	24
<b>3. FASE DE EXPERIMENTACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS.....</b>	<b>31</b>
3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	31
3.2 IDENTIFICACIÓN Y MANIFESTACIÓN DEL PROBLEMA.....	32
3.3 FACTORES, NIVELES, RANGOS Y VARIABLE RESPUESTA.....	33
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>37</b>
MODELO EXPERIMENTAL.....	37
CONCLUSIONES .....	46
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXO 1. TABLAS DE RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO 2. FOTOS DEL PROCESO REALIZADO.....</b>	<b>54</b>

**LISTA DE FIGURAS.**

Figura 1 Esquema de un recuperador de calor de lecho empacado. Fuente: modificado de (Alarcón & Domínguez, 2012) .....	27
Figura 2. Esquema horno-recuperador. Fuente: Modificado de (Giraldo, 2013). .....	27
Figura 3 Microestructura del coque. Fuente: (Osborne, 2013). .....	30
Figura 4 . Ubicación de las termocuplas en el intercambiador de calor. Fuente: propia.	34
Figura 5 Gráfico de valores reales Vs valores estimados, según el modelo obtenido. Fuente: propia.....	42
Figura 6 Diagrama de Pareto estandarizado. Fuente propia. ....	43
Figura 7 Gráfica de residuos o errores Vs orden de observaciones, Fuente propia. ....	44
Figura 8 Efectos principales para la temperatura promedio. Fuente propia.....	44
Figura 9 Superficie de respuesta para temperatura promedio Vs los factores flujo de aire, tamaño de partícula. Fuente propia.....	45
Figura 12 Sistema de medidores de temperatura, acoplados a las termocuplas, Fuente propia.....	55

---

## Lista de tablas.

Tabla 1 Guía experimental aleatorizada, donde se describe el orden seguido para la elaboración de los experimentos. Fuente: propia .....	34
Tabla 2. Efectos estimados para Temperatura promedio (°C). Fuente: propia. ....	38
Tabla 3 Tabla ANOVA "Análisis de varianza". Fuente: propia.....	39
Tabla 4 Pruebas de hipótesis del modelo experimental, fuente propia. ....	40
Tabla 5 Coeficientes de regresión para la variable respuesta temperatura promedio.....	41
Tabla 6 Camino de Máximo Ascenso para Temperatura. Fuente propia. ....	42
Tabla 7 Respuesta óptima del modelo según los niveles de los factores, teniendo en cuenta maximizar Temperatura promedio. Fuente propia.....	42

## INTRODUCCION

La presente investigación se enfoca fundamentalmente en la búsqueda de una estrategia para disminuir el impacto ambiental negativo, causado por los gases residuales en el sector más tradicional de la producción de cal. Los gases efecto invernadero en estas industrias son producidos por la combustión principalmente de carbón mineral y de coque. Además del efecto invernadero causado por estos gases, también se produce desperdicio de calor a la atmósfera, lo que incrementa aún más el calentamiento global.

La disminución del impacto ambiental se pretende obtener mediante la implementación y utilización de equipos complementarios denominados “recuperadores de calor de lecho empacado”. Tales implementos extraen parte del calor residual de los gases de salida y lo transfieren al lecho empacado (que para el caso se eligió coque), siendo este precalentado.

El coque precalentado puede ser introducido al horno de calcinación, lo cual disminuye el consumo de este combustible, el tiempo de producción y el impacto ambiental negativo. Lo anterior produce una mayor eficiencia energética y económica del proceso.

El interés principal además de disminuir el impacto ambiental y aumentar la eficiencia energética, es conocer las variables fundamentales que intervienen en el recuperador de calor y cómo es su relación, con el fin de obtener su control. Otro factor de interés es contribuir a llenar el vacío investigativo en este campo. El sector tradicional de la cal ha sido poco estudiado en nuestro país, salvo contadas excepciones, son escasas las investigaciones en este sector.

La metodología empleada consistió en utilizar el recuperador de lecho empacado existente en el laboratorio de fluidos del ITM, realizar las adaptaciones pertinentes y ponerlo a punto, hacer el diseño experimental y las pruebas apropiadas y definidas en el diseño, posteriormente realizar el análisis de los datos obtenidos con el programa estadístico Statgraphics y finalmente obtener las conclusiones acertadas, de ser posible dejar algunas recomendaciones para el futuro.

## **DESCRIPCION DEL PROBLEMA:**

La cal ha tenido fuerte impacto en el desarrollo de la humanidad debido a su variedad de usos: desde la construcción de viviendas y edificios, afirmado de carreteras, productos químicos, producción del acero, entre otros; hasta el uso actual en el tratamiento de aire, aguas residuales y desechos sólidos (Galvan & Velasquez, 2011)

A pesar de su larga historia, esta industria está poco desarrollada en numerosos países del tercer mundo (Asia, África y América Latina); en nuestro país, actualmente hay regiones donde aún se utiliza los hornos verticales (tipo cubilote) y en algunos hornos de foso. Mientras que, en la mayoría de países europeos y América del Norte, estos hornos desaparecieron desde hace varias décadas, debido a su alta contaminación e ineficiencia (Ontiveros-Ortega, 2018).

Para producir una tonelada de cal se requiere entre 1.400 y 2.200 kg de caliza. El consumo del mineral está en función del tipo de producto, de la pureza de la caliza, del grado de calcinación y de la cantidad de productos residuales. Gran parte del material residual se transforma en emisiones atmosféricas de dióxido de carbono (Junta de Andalucía, 2018).

A nivel global el proceso de calcinación aumentó su producción en los últimos años, pasando de 500.000 ton/año en 2012 a 1.500.000 ton/año en 2014, dado que el uso se ha extendido desde los sectores tradicionales a sectores tales como el ambiental, la industria alimenticia y mayor empleo agrícola. Es utilizada para tratar el aire, el agua potable, en cosméticos, desinfectantes, en la producción de cementos, la industria química, etc. (Barba & Villaseñor, 2013).

En lo referente a los procesos industriales, la producción de cal en numerosos países es la segunda fuente de emisiones de carbono, después de la producción de cemento. En China por ejemplo, un estudio reciente muestra que las emisiones de  $CO_2$  debidas a la industria de la cal en el año 2001 fueron de 88,79 millones de

toneladas mientras que en el 2012 pasaron a 141,72 millones de toneladas. Aún hoy en día en este gran país se trabaja en numerosas regiones con hornos tradicionales (ANM.Gov, 2017).

En la producción de la cal se utiliza la caliza como materia prima, carbón como combustible, y aire para producir la combustión (Vallés & Rafael, 2015). Estos materiales entran al horno a temperatura ambiente y se deben calentar hasta temperaturas alrededor de 900 a 1000°C que son las necesarias para que la caliza se transforme en cal (Fundación Entorno, 2013).

Como resultado de este proceso, se emiten por las chimeneas gases residuales a temperaturas mayores a 550°C, desperdiciando la energía contenida en ellos, produciendo ineficiencia en el proceso y causando contaminación térmica que ayuda al calentamiento global (Ochoa et al, 2010); igualmente, se produce alto consumo de combustible con el consiguiente deterioro ambiental: efecto invernadero y oscurecimiento global. Además, graves problemas para la salud debido principalmente al material particulado, los gases emitidos nocivos: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub>, y óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) (Ontiveros-Ortega, 2018).

A nivel productivo se presentan otros problemas como menor producción y baja calidad de la cal, debido principalmente a la contaminación con los residuos de la combustión del carbón y a la cocción extra (Coloma, 2015).

Existen varias maneras de hacer más eficiente el proceso de la cal: mejorar la tecnología y equipos, optimizar las materias primas o emplear combustibles más eficientes y menos contaminantes como el coque y reutilizar el gas residual, método utilizado por los recuperadores de calor (Castillo, 2016)

En Colombia uno de los municipios que más se ha visto perjudicado por la contaminación de los hornos de cal es Nobsa en el departamento de Boyacá, que en primera instancia logró la disminución en la contaminación a través del cambio de combustible, al sustituir el carbón mineral por el coque, en cumplimiento de un programa de reconversión que permitió reducir cerca de 450 toneladas de

---

contaminantes al mes según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Casas, 2017).

En 2002, y debido a estos graves problemas ambientales y que afectaban la salud de los ciudadanos, la Alcaldía Municipal y la Corporación Autónoma de Boyacá, (Corpoboyacá), trabajaron en la Resolución 802 de CORPOBOYACA para la reconversión tecnológica en la producción de Cal; se reunieron con las personas involucradas en la producción de la cal, con el fin de concientizarlos y trabajar en conjunto en un Plan Integral para la Reconversión Tecnológica de los Hornos de Cal que constaba de un componente técnico, ambiental, social y comercial.

En la parte ambiental, la disminución de emisiones contaminantes se logró cambiando el carbón por el coque, el componente social permitió el acercamiento entre los caleros y la administración por medio de brigadas de salud y de actividades culturales y de recreación. En cuanto al componente comercial, la Alcaldía de Nobsa organizó con los productores de cal una comercializadora de su producto, que denominaron Empresa Colombiana de Cales (Ecocal); esta empresa se dedicó a comercializar la cal, evitando intermediarios y logrando que los beneficios fueran para el producto, haciendo que estos beneficios facilitaran la reconversión de tecnologías.

Inicialmente los caleros se acogieron a la ley, pero posteriormente y debido a los costos superiores del coque, ellos retomaron el carbón como su fuente de energía, y hoy los problemas ambientales no solo continúan, sino que se aumentaron; la ley 610 de 2010 para las emisiones contaminantes establece un límite de 100 microgramos por metro cúbico/día, pero en el Valle de Sogamoso lugar donde operan alrededor de 162 hornos que producen 1200 ton de cal, las emisiones alcanzan valores de hasta 180 microgramos por metro cúbico/día.

En el departamento de Antioquia se encuentran diferentes empresas productoras de cal, ubicadas en su mayoría en Puerto Triunfo y Amalfi, aún se trabaja con hornos verticales, donde los recuperadores de calor tienen su aplicación para disminuir el impacto al medio ambiente (Promical, 2018). Estudios de calidad de aire realizados por la universidad Eafit, establecieron que los límites están dentro de lo permitido por la ley; aun así, se deben mejorar las tecnologías y optimizar los procesos.

La finalidad de este trabajo es identificar y cuantificar los niveles de las variables principales, con el objetivo de disminuir el impacto ambiental generado en el proceso de producción de cal, cuando se utilizan recuperadores de calor de lecho empacado, aplicando coque como combustible.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Disminuir el impacto ambiental generado en el proceso de producción de cal, utilizando recuperadores de calor de lecho empacado de coque.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar los principales parámetros térmicos y fluido-dinámicos en el recuperador de lecho empacado de coque con fin de mitigar el impacto ambiental
2. Analizar la incidencia de las variables que intervienen en el lecho empacado de coque con miras a optimizar el rendimiento térmico del proceso y la disminución del impacto ambiental.
3. Plantear un modelo matemático que permita relacionar las variables optimizadas en función de disminuir el impacto ambiental del proceso.

## 1. METODOLOGÍA

La investigación está enmarcada dentro de un enfoque cuantitativo, pues en ella se utilizará recolección de datos, los cuales se analizarán con herramientas matemáticas y estadísticas, que ayudarán a establecer patrones y optimizar los resultados (Mousalli-Kayat, 2015).

El trabajo consta de una serie de etapas secuenciales, comenzando por la revisión de la literatura, pasando por la construcción del marco teórico, la hipótesis y determinando unas variables que se van a medir en pruebas de laboratorio y que se analizarán con métodos estadísticos. Con los resultados obtenidos en el diseño experimental, se realizará el análisis y se procederá a sacar las conclusiones (Sampieri, 2014).

También es preciso hacer una revisión y ajuste del recuperador de calor de lecho empacado, pues fue usado y algunas de sus partes están dañadas y no son funcionales. Se rediseñaron y cambiaron las resistencias, lo mismo que algunas termocuplas.

Inicialmente se realizará un estudio exploratorio que aporte los conceptos necesarios para la investigación. El estudio exploratorio está compuesto por la revisión del estado del arte sobre procesos de la cal, hornos de calcinación, lecho empacado, cambio climático, sostenibilidad, calidad del aire, contaminación térmica, entre otras, cuyos resultados son presentados de forma resumida en el marco teórico.

En el análisis descriptivo se tiene la información procedente de los datos la cual se resumirá en forma gráfica y analítica.

## **1.1 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN:**

La investigación se desarrollará bajo las siguientes etapas:

### **1.1.1 Caracterizar los principales parámetros térmicos y fluido-dinámicos en el recuperador de lecho empacado de coque**

En esta etapa se describirán las variables a utilizar: tamaño de partícula y velocidad del aire. Estas variables se escogieron porque son las más empleadas en la literatura investigada y las más representativas del proceso de recuperación de calor. una de estas variables se les asignará 3 niveles (Garcia, 2014); es decir, 3 tipos de tamaños de partícula y 3 velocidades de entrada del aire (Castaño, 2015).

### **1.1.2 Analizar la incidencia de las variables que intervienen en el lecho empacado de coque con miras a optimizar el rendimiento térmico del proceso**

En esta etapa se utilizará un diseño experimental factorial con una réplica (se hacen todas las posibles combinaciones de los factores en cada ensayo del experimento). El diseño experimental, utiliza una metodología matemática y estadística que garantiza la planificación, organización, evaluación y análisis experimental en la forma más apropiada; permite escoger de forma objetiva los factores apropiados para su estudio, alterarlos, controlarlos y evaluarlos de la forma más eficiente y observar el efecto resultante (Melo & Falla, 2015).

Después de aplicar el diseño experimental y guiados por este, se realizarán los ensayos de laboratorio en el Recuperador de Calor en el Laboratorio de Fluidos del Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM; allí se recolectarán y tabularán los datos para su análisis en la etapa siguiente. En esta etapa inicial se investiga si los

factores independientes influyen en una o varias variables dependientes de interés, denominadas variables respuesta; si tal influencia se da, se cuantifica.

Este modelo permite identificar cómo la velocidad del flujo de aire y el tamaño de partícula afectan de forma directa la temperatura promedio que alcanza el lecho, la cual refleja la capacidad de recuperación de calor del sistema. Se realiza un diseño experimental factorial (Hussam, 2018) con dos factores y la variable respuesta se mide como la temperatura promedio que alcanza el lecho una vez se estabiliza.

### **1.1.3 Plantear un modelo matemático que permita relacionar las variables optimizadas en función de disminuir el impacto ambiental del proceso.**

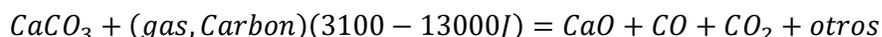
En esta etapa se analizarán los datos experimentales obtenidos de temperatura, velocidad de aire y tamaño de partícula con el programa Statgraphics Plus 5.1., que sirve para establecer las relaciones entre ellos, su significancia en el proceso y el grado de idoneidad del modelo (Castañeda & Cabrera, 2011).

Con el análisis de las variables y niveles, se determina entre los diferentes niveles el tamaño de partícula y velocidad del aire que optimiza el proceso. Se calcula también la cantidad de coque ahorrado, la cual se refleja en ahorro económico y disminución de CO<sub>2</sub> y material particulado a la atmósfera, lo que trae consigo una mejora en el ambiente que se verá reflejado en una mejor calidad de vida de las personas involucradas en el proceso y/o que habitan en cercanías a la planta de calcinación.

Finalmente, para la presentación de los resultados se realizará el análisis descriptivo, donde se toman los datos obtenidos en laboratorio, y los datos optimizados y se realizarán comparaciones por medio de gráficas y tablas; también se hace de forma descriptiva donde se requiera (Fernandez & Manuel, 2013).

## 2. MARCO TEORICO

La cal se extrae de la roca caliza, mediante un proceso que se llama calcinación. La roca es extraída en las minas, se tritura y se muele y posteriormente se lleva a los hornos que funcionan con carbón o con gas; allí la caliza es “calcinada” a temperaturas mayores de 900°C logrando liberar el dióxido de carbono y obteniendo el óxido de calcio (cal) La siguiente es la reacción del proceso de calcinación (Romero, 2011):



Ante la necesidad de aumentar la eficiencia de los procesos industriales de la cal (Adonis, 2017), en los últimos años se han investigado algunas alternativas para la reutilización de los gases residuales que salen de las chimeneas, mediante recuperadores de calor de lecho empacado. En este proceso, los gases residuales son utilizados para precalentar todos o algunos de los materiales que intervienen, ya que es en esta etapa donde se presentan mayores pérdidas energéticas (Sagastume & Cogollos, 2012).

En la investigación realizada en la Universidad de Antioquia (Motato, 2007), se precalentó aire, consiguiendo disminuir el consumo energético hasta un 60% en la producción de fundición gris en un prototipo de horno de cubilote. Esta misma investigación concluyó que la productividad se puede incrementar hasta un 50%.

Giraldo (2013) en su tesis de Maestría definió que en el proceso estudiado, con la reutilización de los gases residuales para precalentar la caliza, se obtiene un ahorro de carbón de 82 ton/mes, que equivalen a 8200000\$/mes y se evitan emitir 300 ton de CO<sub>2</sub>/mes, concluyendo que el uso de recuperadores de calor es viable económica y ambientalmente en los procesos donde se genera calor residual a altas temperaturas, pues ahorran tiempos de proceso, cantidad de combustible y disminuye los gases contaminantes (Herz & Hallak, 2015).

En esta investigación, se empleará el recuperador de calor que se encuentra en el Laboratorio de Fluidos del ITM para realizar un estudio comparativo sobre lechos

empacados de caliza (Giraldo, 2013) y lecho empacado de coque, con lo cual se podrá determinar cuál lecho es más eficiente. Se decide precalentar coque dado que este presenta mayor poder calorífico que el carbón; además, en el proceso de transformación de carbón a coque se pierde agua, alquitrán y gases, siendo de esta manera mucho más amigable con el medio ambiente.

Con el precalentamiento del combustible se espera que el proceso de la cal sea mucho más eficiente, no sólo por el uso de un combustible con mayor poder calorífico, sino también porque los materiales entrarán al proceso con temperaturas alrededor de 300°C lo que disminuirá sustancialmente el tiempo de proceso (McTigue & White, 2017), la cantidad de combustible requerido, que se traduce en ahorro de dinero, y disminución de emisiones contaminantes y de material particulado que es el causante de problemas respiratorios; se logra reducir también la temperatura de los gases que van a la atmósfera y se aprovecha un recurso poco empleado en nuestro medio hasta ahora, como es calor residual lanzado a la atmósfera (Evans & Strezov, 2012).

Los recuperadores de calor son los equipos más indicados para recobrar el calor sensible de los gases residuales, pues lo hacen a unos costos bajos y de una manera funcional (Kevin & Ho, 2017).

## **2.1 TIPOS DE HORNOS PARA EL PROCESO DE CALCINACIÓN**

El tipo de horno usado desempeña un rol fundamental en los costos de inversión de capital y de producción, en la calidad de la cal obtenida y en el impacto ambiental causado (Bel Anzué & al, 2017).

Para la calcinación se utilizan básicamente tres tipos de hornos, el más antiguo es de foso que básicamente consiste en un hoyo en la tierra dentro de una ladera, en la parte inferior de esta se perfora un orificio. Allí ocurre la transformación de la caliza a cal, la cual se extrae por la parte inferior después de la calcinación; no tiene un control de temperatura, por lo cual la calidad de la cal no está garantizada. El proceso para producir una carga de cal en los algunos hornos de foso tiene un ciclo de aproximadamente 70 horas (Ho, 2016).

Otro tipo de horno utilizado en la calcinación es el vertical tipo cubilote muy empleado en la pequeña y mediana industria. Es común verlos en las regiones del oriente y nordeste antioqueño. Esta clase de horno emplea piedra caliza con un rango de tamaño de partículas entre 50 a 150 milímetros. Usa carbón en capas alternas con la caliza. La calidad de la cal tiende a ser media. Producir una carga de cal en este tipo de horno tiene un ciclo aproximado de 50 horas. A nivel de las grandes empresas se emplean hornos rotatorios horizontales, también verticales mejorados. Los hornos de cubilote y de foso presentan altas pérdidas energéticas a través de los gases residuales y de las paredes, bajas eficiencias térmicas y productivas (aprox. 30-40%) (Ccorimanya, 2018).

El tercer tipo de horno para la calcinación de la caliza es el rotatorio, es el más eficiente de los tres mencionados, con una producción de carga en tan solo 17 horas, pero su instalación es muy costosa. A nivel global las regulaciones ambientales y la falta de competitividad en las compañías caleras han llevado en Europa y USA al cierre de algunas, pues los costos de nuevas instalaciones son prohibitivos para muchas de ellas (Salas, 2019).

## 2.2 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LA CALCINACIÓN

En los tipos de hornos tradicionales se producen grandes cantidades de flujos másicos de gases residuales que salen de las chimeneas a temperaturas mayores de 550°C; los procesos presentan baja eficiencia térmica y alto consumo de combustible (Sagastume & Cogolos, 2012), (Ricon, 2008).

Además de liberar calor a la atmósfera, los gases desechados también arrastran partículas sólidas y diversos contaminantes, lo cual origina impacto ambiental negativo al entorno (Ochoa & Cogollos, 2010)

Cualquier corriente de gas residual con temperaturas superiores a 150°C son susceptibles de recuperación (Giraldo, 2013); este calor residual puede ser aprovechado en varios procesos de precalentamiento: carga en un horno, aire de combustión, calentamiento de agua, precalentamiento de materiales, entre otros; no se han encontrado evidencias de estudios realizados a hornos de foso para calcinación y hay poco sobre los procesos de la cal y lechos de caliza aplicados a hornos verticales tipo cubilote para recuperar el calor residual, esto también lo confirma la literatura revisada (Ochoa & Cogollos, 2010).

Un recuperador de calor de lecho empacado en un cilindro metálico aislado, y en su parte interior va un refractario apropiado. Al interior va el denominado lecho empacado, en este caso el coque, el cual tiene la capacidad de almacenar el calor residual (Ochoa & Cogollos, 2010).

Las partículas dentro de un lecho empacado crean un medio poroso, en donde el tamaño de los poros (espacio entre partículas o canales al interior) depende del tamaño de las partículas. El flujo en el medio poroso facilita la transferencia de calor entre el gas residual y las partículas (Saurish, Niels, & Kuipersa, 2016)

En el caso de que el coque precalentado sea introducido al horno de calcinación, no habrá que precalentar el coque dentro del horno y se producirá ahorro de energía, disminución de tiempo de calcinación, y costos del proceso (Addal & Daweagret, 2018)

También se puede precalentar el aire de combustión que va a entrar el horno de calcinación (Bunjaku, Filkoski, & Sahiti, 2017)

---

En cuanto a los hornos de foso y de cubilote la solución de ahorro energético ha sido poco estudiadas en nuestro país salvo contadas excepciones, (Giraldo, 2013) y (Castaño et al, 2015). Existe mayor estudio a nivel internacional para recuperar calor residual de hornos tipo cubilote (Ochoa & Cogollos, 2010).

Los gases efecto invernadero absorben la radiación infrarroja aumentando el calor retenido en la atmósfera y produciendo calentamiento global. Las partículas de hollín incrementan el oscurecimiento y el calentamiento global. Los SOx se combinan con el hidrógeno y generan lluvias ácidas. Toda esta contaminación afecta directamente el aire y la tierra, y repercute en la salud del hombre, aqueja animales, plantas y fuentes de agua de la región donde está ubicada la fuente de contaminación (Qiancheng, 2015).

En los procesos industriales hay también pérdidas energéticas, que son debidas a la ineficiencia de los equipos y/o las leyes de la termodinámica, cuya segunda ley afirma que, en todo proceso real deséese o no, habrá un desecho de calor al entorno y la cantidad de energía útil generada para el proceso siempre será menor que la energía de entrada (Lecca & Huatuco, 2015). Se estima que las pérdidas energéticas pueden estar entre el 20 al 50% en los procesos industriales.

Una de las formas en que se disipa energía es a través de los gases de desecho o gas residual. El gas residual contiene energía térmica; es una energía denominada en termodinámica calor sensible porque está relacionada directamente con el aumento o disminución de temperatura, Esta energía también va a la atmósfera e incrementa aún más el calentamiento global (Cengel & Boles, 2017). En Estados Unidos, se considera que la industria consume aproximadamente un tercio de la energía total que produce ese país.

Un 50 % de los gases efecto invernadero producidos en Estados Unidos, corresponden a la industria y a las plantas térmicas de generación de electricidad (por carbón). Las emisiones de totales de dióxido de carbono lanzadas a la atmósfera en el año 2017 corresponden a 5.107.393 kilo toneladas. Lo que equivale a unas emisiones per cápita de 15.74 toneladas (IBERDROLA, 2018).

En cuanto a nuestro país, Colombia aporta 0.37 % del total de dióxido de carbono emitido a nivel global. Las emisiones per cápita son de 3,6 toneladas de este gas (Instituto de Hidrología, 2016)

Los datos anteriores muestran que es necesario estudiar los gases residuales y la forma de reutilizarlos en diferentes procesos. Estos se pueden reutilizar según su temperatura.

Si la temperatura es mayor de 650 °C, se dispone de un calor residual de alto potencial. Su uso más común es producir vapor para generación de electricidad en plantas de cogeneración o trigeneración o para precalentamiento de aire o materia prima en procesos de alta temperatura (Jouhara & Khordehga, 2016).

Es de anotar, que generalmente el tope de temperatura para el uso del gas residual está alrededor de 880 °C por la limitación de materiales para el manejo de tales temperaturas. La mayoría de aceros para los implementos de recuperación no soporta temperaturas más altas (Jouhara & Khordehga, 2016).

El gas residual con temperaturas entre 316 °C y 650 °C se considera de potencial medio; se emplea en plantas de generación eléctrica que laboran en ciclos Rankine (ciclo termodinámico para generación de energía). Igualmente, esta energía se puede emplear para precalentar materia prima o el aire para combustión en los procesos que no requieran temperaturas muy altas; también en producción de vapor para usos no muy exigentes.

Si los gases residuales se encuentran a una temperatura inferior de 316 °C son de bajo potencial, y pueden ser empleados en calentamiento de aguas para uso industrial no exigente o doméstico, en bombas de calor, y en otras aplicaciones (Luoa, Andresen, & Clarke).

Otros factores a considerar en la recuperación de calor del gas residual son: el tipo de contaminantes que pueda llevar, el costo de los equipos a emplear, la relación costo beneficio de la energía obtenida y el uso (Shat, 2014).

En éste trabajo se considera un lecho empacado de coque de tamaño de partícula homogéneo, (tamaños promedio de las partículas), figura 1. El lecho tiene entrada y salida

del gas residual, facilidad de cargue y descargue del coque y en él, el gas residual asciende con flujo turbulento desde la entrada hasta la salida para incrementar la transferencia de calor entre los gases residuales y las partículas de coque (Levenspiel, 2012)

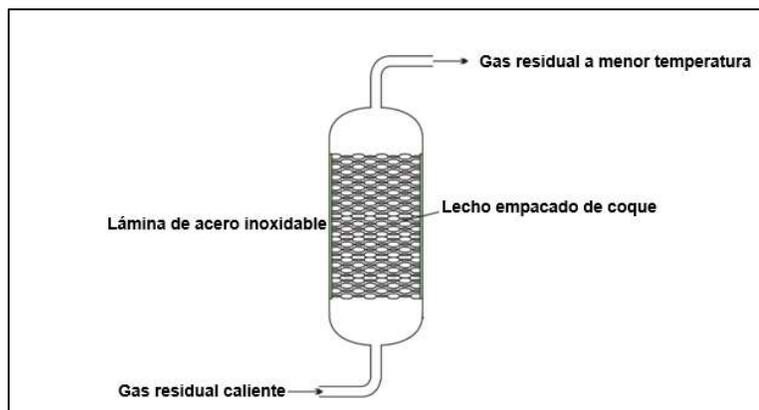


Figura 1 Esquema de un recuperador de calor de lecho empacado. Fuente: modificado de (Alarcón & Domínguez, 2012)

La Figura 2, muestra un horno vertical con un recuperador de calor en la parte superior y con la indicación de la posición de diferentes equipos de medición; se puede observar la entrada de los gases residuales calientes que provienen de la chimenea del horno de calcinación, ascienden a través del lecho a través de los espacios vacíos (poros).

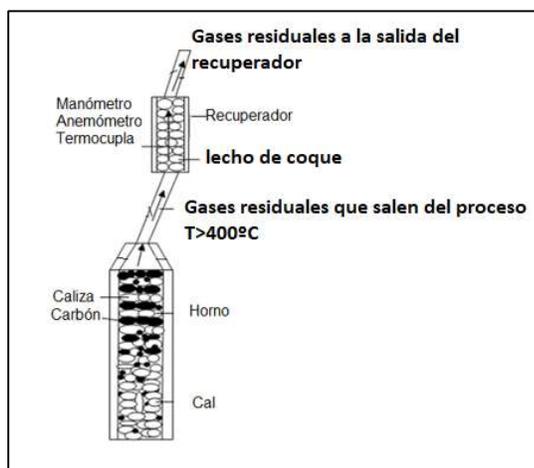


Figura 2. Esquema horno-recuperador. Fuente: Modificado de (Giraldo, 2013).

Se transfiere parte de la energía térmica del gas residual al coque y los gases residuales salen a menor temperatura y presión.

En un proceso real de la industria, el recuperador se acopla al horno en la zona de la chimenea por donde salen los gases residuales. Las temperaturas de los gases residuales están alrededor de 545°C; la simulación de los gases se realiza usando un prototipo de recuperador a escala que se encuentra en el Laboratorio de Fluidos del Instituto Tecnológico Metropolitano, dicho recuperador fue inicialmente diseñado y construido en el trabajo de Maestría (Giraldo, 2013), (Saurish, Niels, & Kuipersa, 2016).

En el proceso de producción de cal, se pueden utilizar diferentes tipos de combustibles; la selección depende de factores como tipo de horno, calidad de la cal que se desee obtener, el presupuesto y los controles ambientales que se tengan (Salas, 2019).

En los procesos industriales, el combustible más utilizado es el carbón, debido su bajo precio y abundancia. El carbón es una roca sedimentaria, es una mezcla de componentes orgánicos acumulados en pantanos, lagunas, o zonas marinas que han sido recubiertos por sedimentos y diversas capas geológicas. Con el tiempo, los residuos orgánicos son transformados primero por bacterias anaeróbicas a compuestos con alto contenido de carbono y luego por las capas geológicas a presiones y temperaturas que los transforman en una roca sedimentaria: el carbón mineral (Christie & Barke, 2016).

Según el grado de transformación alcanzado se forma: turba, lignito, hulla, antracita. La energía contenida en el carbón depende fundamentalmente del %C presente en él. Debido al alto porcentaje de carbono contenido el carbón, es empleado como fuente de energía; y en algunos procesos es transformado en coque para mayor eficiencia, y por la alta exigencia de resistencia mecánica, ambiental y calórica de ciertos procesos (World Coal Institute, 2018).

Ciertos tipos de carbón pueden presentar un promedio de carbono de 73.0 % por kg de C, mientras que el coque producido a partir de él puede presentar un contenido de C de 77.0 % por kg de C. Por tanto, el coque es más eficiente desde el punto de vista energético. Los carbones más utilizados por sus características para producción de coque son la hulla y la antracita. El coque es entonces un producto de la descomposición seca del carbón a temperaturas altas (1000°C - 1300°C) sin la presencia de oxígeno.

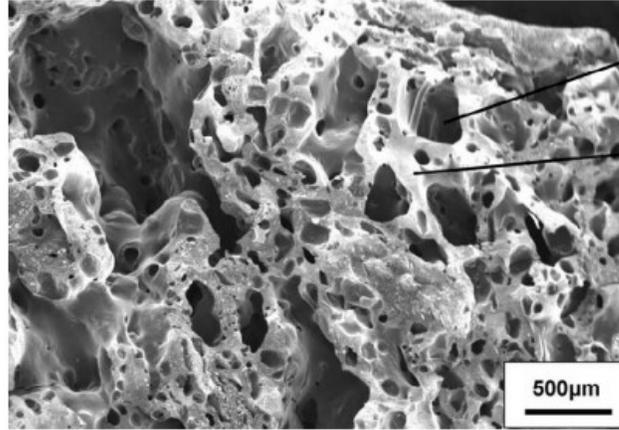
La energía de un combustible se denomina poder calorífico ( $kJ/kg$ ). El coque puede llegar a presentar un poder calorífico hasta de  $77.000 \frac{kJ}{kg}$  según el tipo (Cengel & Boles, 2017).

En el proceso del carbón a coque ocurre la extracción ciertos componentes: ( $CO_2$ ),  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $HO_2$ , alquitrán y tar que es un subproducto (Addal & Daweagret, 2018)

Al presentar mayor concentración de energía y menos porcentajes de contaminantes, el coque es más apropiado y más ecológico que el carbón en los procesos industriales. Al requerir menos cantidad de coque que de carbón los procesos se hacen más eficientes térmica y ecológicamente y requieren menos tiempo. El coque es un sólido gris poroso con alta resistencia mecánica. Está compuesto fundamentalmente por carbono (88 %) y el restante 12% son pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, agua, etc. alrededor de 12% (Swapan, Saxena, & Samardeep, 2013).

El uso principal del coque es en el proceso metalúrgico de obtención del acero y las fundiciones; también se emplea en el proceso de la cal y algunos otros de combustión.

La estructura del coque consiste en una matriz carbonosa sólida con inclusiones orgánicas e inorgánicas atravesada por una red de microporos y fracturas distribuidas aleatoriamente como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3** Microestructura del coque. Fuente: (Osborne, 2013).

Colombia posee las mayores reservas de carbón de Latinoamérica. Y su carbón es apetecido por ser bajo en azufre (contaminante y fragilizador del acero) y su alto porcentaje de volátiles. El país es el quinto exportador de carbón a nivel global. En el 2016 se exportaron más de 90 millones de toneladas. En Colombia se emplean los carbones procedentes de: Barrancas (Guajira), La jagua de Ibirico (Cesár), Zulia (Norte de Santander), Zipaquirá (Cundinamarca), Monte Líbano (Córdoba), Amagá (Antioquia) y Jamundí (Valle) (UPME, 2019).

### **3. FASE DE EXPERIMENTACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS**

La parte experimental se realiza mediante un diseño estadístico de experimentos, seguidamente se realiza la estandarización del recuperador de calor que está localizado en el Laboratorio de Fluido del Instituto Tecnológico Metropolitano, y luego se procede con la recolección de datos.

#### **3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL**

Para que el diseño experimental arroje resultados óptimos los datos deben ser tomados cuidadosamente, de esto depende que los resultados obtenidos sean una base para tomar decisiones en el proceso. En esta parte del estudio, se deben considerar un número mínimo de experimentos, para que el estudio sea representativo y lo más acertado posible (Ruiz & López, 2013).

Para el diseño experimental se debe utilizar una metodología matemática y estadística que garantice la planificación, organización, evaluación y análisis experimental en la forma más apropiada. Tal metodología es la disciplina denominada “Diseño estadístico de experimentos”, que permite obtener modelos cuya significancia se puede demostrar mediante estadísticos de prueba, lo cual genera conclusiones ciertas sobre el experimento a realizar (Condo & Pazmiño, 2015).

En esta etapa se utilizan herramientas estadísticas como Statgraphics que ayudan a corregir y disminuir los grados de incertidumbre y error, incluso ayudan a realizar la correcta interpretación de los resultados.

El diseño estadístico de experimentos está basado en las matemáticas estadísticas y en la programación computacional, ambas sirven para determinar si los factores independientes influyen o no en la variable respuesta; si es positivo, se cuantifica

el grado de dependencia; como ventaja adicional, se puede determinar si existen otros factores que influyan sobre la variable respuesta. Esta disciplina permite al investigador escoger de forma objetiva los factores más apropiados para su estudio, alterarlos, controlarlos y evaluarlos de la forma más eficiente y observar el efecto resultante (Ferre & Rius, 2015).

Con esta metodología, se puede determinar la variación de los factores de interés con un mínimo de experimentos. Se define como factor, una variable representativa del experimento que se quiera estudiar, y los diferentes valores de la variable en estudio, denominan niveles, un factor puede tener diferentes niveles o valores.

La respuesta es el conjunto de todas las posibilidades del fenómeno estudiado dentro de los rangos de los factores experimentados. Con estos datos prácticamente conocemos lo que se necesita sobre nuestro proceso (Montgomery, 2016).

### **3.2 IDENTIFICACIÓN Y MANIFESTACIÓN DEL PROBLEMA**

En los capítulos anteriores, se estudió que los procesos industriales que trabajan con hornos de foso y hornos verticales, producen gases residuales contaminantes que salen a temperaturas superiores a 350°C, van a la atmósfera y causan problemas ambientales y problemas en la salud de los operarios y residentes de la zona; así como también se pierden los contenidos de calor que poseen. Una forma para hacer más eficiente este tipo de procesos, es recuperar estos calores y reutilizarlos en el proceso para precalentar el lecho de coque, va a disminuir el consumo de combustible necesario, mejora la eficiencia del proceso, traduciéndose en ahorro económico y ambiental, pues los gases restantes saldrían a menor temperatura y menos cargados de contaminantes.

El diseño experimental procura entonces, hacer un análisis de los factores que fueron seleccionados, dependiendo de la importancia en el proceso y así evaluar la eficiencia del prototipo de recuperador de calor.

### **3.3 FACTORES, NIVELES, RANGOS Y VARIABLE RESPUESTA**

Después de algunos análisis teóricos, se toman dos factores como los principales del sistema: Tamaño de partícula de coque y velocidad del flujo de aire a la entrada del recuperador.

Al tamaño de partícula de coque se le asignan tres niveles: pequeño 1 cm, mediano 1.5 cm y grande 2 cm; a la velocidad del aire circulante en el recuperador, tres niveles: alto 4 m/s, medio 3 m/s y bajo 2 m/s; dentro del recuperador, se colocan termocuplas en tres niveles: en la mitad del recuperador, a 3/4 de la entrada del aire caliente y a la salida de los gases; estas termocuplas se conectaron tres con el fin de hallar una temperatura promedio del flujo circulante por el cañón del recuperador. El flujo de aire se suministra y controla mediante un ventilador centrífugo, regulado por la frecuencia del motor, así: para una velocidad de 4 m/s, le corresponde una frecuencia de 47 Hz, para 3 m/s de 35 Hz y 2 m/s 22 Hz de entrada de aire (ver anexo 2)

Como variable respuesta se toma el promedio de temperaturas del cilindro del recuperador, que se obtienen en 3 de las 4 termocuplas (termocuplas 1, 2 y 3) instaladas en el equipo, localizadas en los diferentes puntos del dispositivo y diferentes distancias verticales a partir de la entrada inferior del aire, de la siguiente forma: inicialmente se coloca una termocupla 0 a la entrada para monitorear y controlar la temperatura de entrada de los gases al dispositivo, luego la termocupla 1 a 13.6 cm, termocupla 2 a 27 cm y termocupla 3 a 40 cm, la ubicación, así como un esquema del prototipo se aprecia en la figura 4 (ver anexo 2)

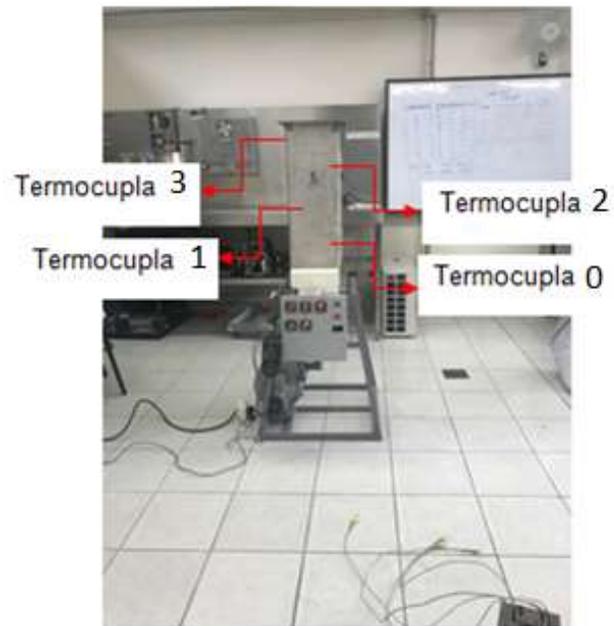


Figura 4 . Ubicación de las termocuplas en el intercambiador de calor. Fuente: propia.

En este modelo se tiene el factor A (tamaño de partícula) con niveles  $i = 1, 1.5$  y  $2$ ; el factor B (flujo de aire) con niveles  $j = \text{bajo, medio, alto}$ . Cada tratamiento tiene una réplica. Por tanto se tienen  $3^2 * 2 = 18$  observaciones Ver tabla 1.

Tabla 1 Guía experimental aleatorizada, donde se describe el orden seguido para la elaboración de los experimentos. Fuente: propia

Flujo de aire	Tamaño de partícula en centímetros		
	<u>1</u>	<u>1.5</u>	<u>2</u>
<b>Bajo (2 m/s)</b>	3	6	7
<b>Medio (3 m/s)</b>	2	9	1
<b>Alto (4m/s)</b>	8	5	4

### 3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL: MODELO FACTORIAL

El diseño experimental que se plantea es factorial y la técnica estadística es el análisis de la varianza con dos factores y tres niveles. La terminología subyacente la vamos a introducir mediante los siguientes supuestos prácticos.

1. La temperatura en el momento de llegar al equilibrio en el intercambiador es constante en toda longitud.
2. Las partículas de coque tienen la misma composición y uniformidad de tamaño, el cual es dado por la malla seleccionada para cada caso.
3. El flujo de aire es constante y turbulento en cada uno de los niveles propuestos.
4. Como el sistema no se alcanza la temperatura de ignición ( $550^{\circ}\text{C}$ ) del lecho empacado, por tanto, no hay ninguna reacción química involucrada.

Como hipótesis central, se tiene que tanto el tamaño de partícula de coque como el flujo de aire suministrado al sistema, son fundamentales al momento de alcanzar la temperatura de equilibrio del sistema.

Se usa el modelo factorial porque para el fin de la investigación, éste considera todas las posibles combinaciones de los factores en cada ensayo completo del experimento (Salazar & Baena, 2009).

El modelo permite identificar cómo el tamaño de partícula y el flujo de aire afectan de forma directa la temperatura promedio que alcanza el lecho, la cual finalmente es el reflejo de la capacidad de recuperación de calor del sistema

Se analiza el efecto de cada factor, como aquel cambio que se produce en la variable respuesta como resultado de la variación del nivel del factor. El diseño seleccionado admite, por tanto, estimar los efectos de un factor en los otros niveles

de la investigación, permitiendo obtener conclusiones válidas sobre toda la extensión de las condiciones del experimento.

Para obtener la significancia de cada uno de los efectos sobre el modelo matemático, se analizan los resultados de los parámetros, que a su vez permiten mediante pruebas de hipótesis descartar o demostrar que tienen o no un peso significativo como posible generador de pronósticos de la variable respuesta.

Para cada corrida de experimento, el flujo másico y la temperatura a la entrada del recuperador son constantes. Como no se alcanza la temperatura de ignición (550°C) del lecho empacado, ninguna reacción química está involucrada, lo cual simplifica los cálculos. Por tanto, sólo se considera el calentamiento promedio del recuperador como fenómeno predominante. En los diferentes experimentos se varía el tamaño de partícula y el flujo másico con el objetivo de valorar su efecto sobre la temperatura.

El diseño experimental busca encontrar las diferentes interacciones que pueden coexistir entre los diferentes factores, con respecto a la variable respuesta temperatura promedio del lecho. Se aleatoriza el experimento y se procesan los datos con la ayuda del paquete estadístico Statgraphics Centurion, el cual brinda la facilidad de obtención de resultados confiables, considerando como eje central del proceso una guía experimental, completamente aleatorizada. que analiza los diversos grados de sensibilidad que generan los diferentes estadísticos, lo cual permiten investigar mediante pruebas de significancia cada uno de los factores, así como la idoneidad del modelo.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los resultados que se muestran a continuación son procesados y generados por el paquete estadístico, según la guía experimental planteada y que se puede consultar en el anexo uno.

##### MODELO EXPERIMENTAL

Para estudiar los efectos de las variables en el de lecho empacado, se realiza el diseño de experimentos completo con los dos factores ( $T_\alpha, T_\beta$ ) y una réplica. Se tiene entonces un modelo matemático dado por la ecuación (1) (Montgomery, 2016):

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

La ecuación (1) corresponde al modelo ( $y_{ijk}$ ) propuesto para los factores A flujo de aire circulante en el lecho empacado, B tamaño de partícula, en los niveles ( $ijk$ ) respectivamente. De donde ( $y_{ijk} = T_{ijk}$ ) es la temperatura promedio para cada corrida experimental,  $\mu$  el efecto global que mide el nivel medio de todos los experimentos. Además  $\alpha_i$  es el efecto generado por el factor A,  $\beta_j$  el efecto generado por el factor B,  $(\alpha\beta)_{ij}$  es el efecto generado por la interacción de los factores tamaño de partícula y flujo de aire ( $\varepsilon_{ijk}$ ), es el efecto residual debido debido al error aleatorio experimental.

## Análisis Experimental - Temperatura promedio

Los resultados arrojados por el programa Statgraphics se recopilan en el siguiente análisis para la variable respuesta temperatura promedio del lecho.

**Tabla 2. Efectos estimados para Temperatura promedio (°C). Fuente: propia.**

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	443,452	9,71758	
A:Flujo de aire	35,1117	10,6451	1,0
B:Tamaño de partícula	47,7617	10,6451	1,0
AA	-5,54167	18,4378	1,0
AB	-18,05	13,0375	1,0
BB	94,3834	11,8375	1,0

Según la Tabla 2, se muestran las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. Siendo AA el efecto cuadrático del flujo de aire y AB es la interacción o combinación del factor A (Flujo de aire) y B (Tamaño de partícula). También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo donde se ve que la variabilidad máxima se encuentra en la interacción combinada, dejando ver que esta puede ser poco significativa para el modelo. Sobresale que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0, índice que mide hasta qué punto la varianza o el coeficiente de regresión estimado del modelo se incrementa a causa de la colinealidad. Para un diseño óptimo, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión entre los efectos.

Ecuación del modelo obtenido antes del ajuste:

*Temperatura promedio = 443,452 + 35,1117\*Flujo de aire + 47,7617\*Tamaño de partícula -5,54167\*flujo de aire^2 -18,05\*Flujo de aire\*Tamaño de partícula + 94,3834\*Tamaño de partícula^2.*

Análisis de Varianza (ANOVA), para la variable temperatura promedio del recuperador de calor.

**Tabla 3** Tabla ANOVA "Análisis de varianza". Fuente: propia

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Flujo de aire	3698,49	1	3698,49	10,88	0,0064
B:Tamaño de partícula	6843,53	1	6843,53	20,13	0,0007
AA	30,7101	1	30,7101	0,09	0,7689
AB	651,605	1	651,605	1,92	0,1914
BB	1944,08	1	1944,08	5,72	0,0341
Error total	4079,43	12	339,953		
Total (corr.)	17247,8	17			

R-cuadrada = 76,3481 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 66,4932 por ciento

Error estándar del est. = 18,4378

Error absoluto medio = 11,7033

Estadístico Durbin-Watson = 2,35304 (P=0,6798)

La tabla 3 ANOVA identifica la variabilidad de la variable respuesta "Temperatura promedio" es el mecanismo que prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. Para nuestro caso, tres efectos tienen una valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%, según las siguientes pruebas de hipótesis.

**Tabla 4 Pruebas de hipótesis del modelo experimental, fuente propia.**

$H_0: \alpha_i = \alpha_j = 0$ $H_a: \alpha_i \neq \alpha_j \neq 0$ $\alpha = 0.05$ $Vp = 0.0064$	$H_0: \beta_i = \beta_j = 0$ $H_a: \beta_i \neq \beta_j \neq 0$ $\alpha = 0.05$ $Vp = 0.0007$
$Vp < \alpha$ por tanto se rechaza $H_0$ y se concluye con una confianza del 95%, que el factor del flujo de aire es significativo para la temperatura promedio en el lecho empacado del intercambiador.	$Vp < \alpha$ por tanto, se rechaza $H_0$ y se concluye con una confianza del 95%, que el factor del tamaño de partícula es significativo para la temperatura promedio en el lecho empacado del intercambiador.

Tomando los resultados de la tabla 4 y siguiendo el mismo procedimiento se observa cómo el factor cuadrático del tamaño de partícula también es significativo para el modelo mientras los demás (AA, AB) no lo son, por lo que en el modelo final podemos omitirlos.

El estadístico R-Cuadrado muestra que el modelo, así ajustado, explica 76,3481% de la variabilidad en Temperatura promedio. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 18,4378. Se infiere que el modelo o diseño experimental permitió explicar la variable respuesta de una forma acertada, Se considera que general, para fines de predicción se recomienda un coeficiente de terminación ajustado de al menos 70% (Gutierrez & De la Vara, 2008).

El estadístico de Durbin-Watson (DW) determina si los residuos presentan o no alguna correlación significativa basada en los datos obtenidos en las diferentes pruebas. Puesto que el valor-P (0.6798) es mayor que 5,0%, no hay indicación de

auto correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%. lo que nos deja clara la idoneidad de los ensayos realizados.

Según el análisis anterior el modelo estimado no debe contener los efectos de AA y AB, puesto que no son significativos y contribuyen a aumentar el error residual final.

**Tabla 5 Coeficientes de regresión para la variable respuesta temperatura promedio.**

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
Constante	10,4692
A:Flujo de aire	69,3557
B:Tamaño de partícula	296,664
BB	-94,3834

Según la tabla 5, la estimación del modelo estadístico, se obtiene la ecuación de pronóstico cuyos coeficientes se muestran a continuación.

### **Ecuación del modelo ajustado**

$$\text{Temperatura promedio} = 104.692 + 69.3557 * \text{Flujo de aire} + 296.664 * \text{Tamaño de partícula} - 94,3834 * \text{Tamaño de partícula}^2$$

### **Resultados Estimados para Temperatura promedio**

Una vez establecido el modelo de pronóstico, se genera el siguiente grafico que contrasta el valor real obtenido Vs los valores estimados, ver figura 5.

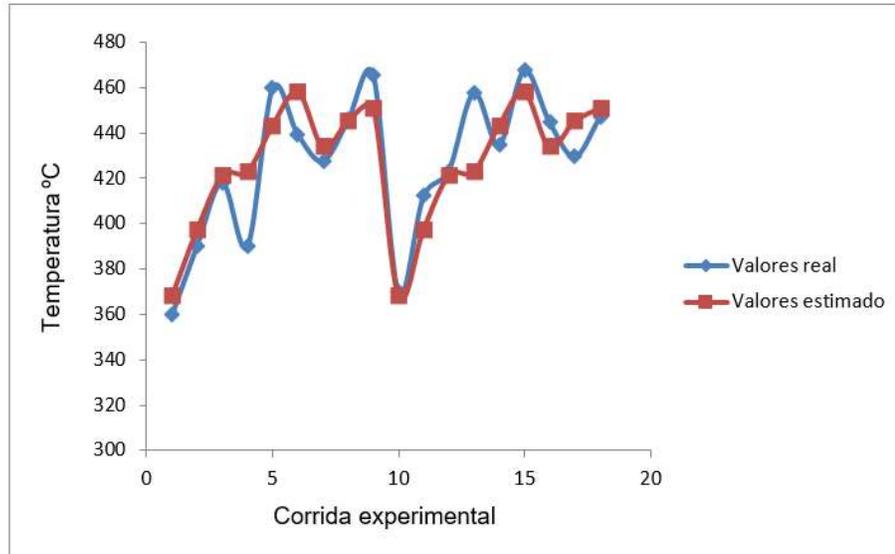


Figura 5 Gráfico de valores reales Vs valores estimados, según el modelo obtenido. Fuente: propia.

El modelo según la figura 5, tiene una buena capacidad de predicción, con una baja variabilidad, salvo los experimentos 4 con alto flujo de aire y tamaño grande de partícula, y el experimento 13 que presenta, lo que tiende a interpretarse como que en estos niveles se encuentra una posible tendencia que a mayor tamaño de grano y flujo de aire mayor el modelo tiende a ser inestable.

Tabla 6 Camino de Máximo Ascenso para Temperatura. Fuente propia.

Flujo de aire	Tamaño de partícula	Predicción para Temperatura promedio (°C)
3,0	1,5	443,452
4,0	1,68269	460,722

Tabla 7 Respuesta óptima del modelo según los niveles de los factores, teniendo en cuenta maximizar Temperatura promedio. Fuente propia.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Flujo de aire	2,0	4,0	4,0
Tamaño de partícula	1,0	2,0	1,66832

Las tablas 6 y 7 muestran la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Temperatura promedio sobre la región indicada, estableciendo un valor óptimo de 460.74, lo que nos muestra que el recuperador de calor logra los objetivos buscados de almacenar calor, disminuyendo las temperaturas hacia el medio ambiente emitido por los hornos de cal.

### Análisis de normalidad

El estudio de la Normalidad de los residuos, se realiza mediante procedimientos que nos presenta el diagrama de Pareto y Gráfico de residuales, además se identifica el comportamiento de la temperatura según tanto en sus efectos (gráfico 3) y en tres dimensiones con el modelo de superficie (gráfico 4).

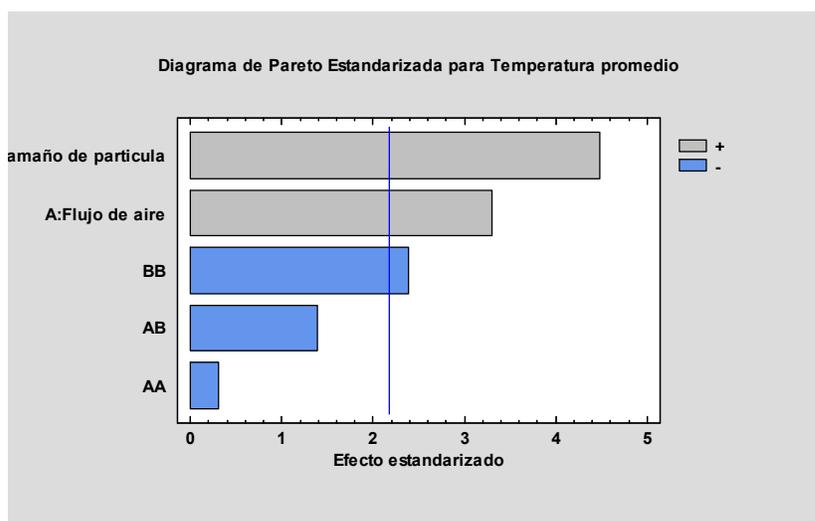


Figura 6 Diagrama de Pareto estandarizado. Fuente propia.

En la figura 6, uno muestra cómo los factores seleccionados por el diseño experimental, tienen un valor muy significativo para maximizar la temperatura de recuperación del proceso.

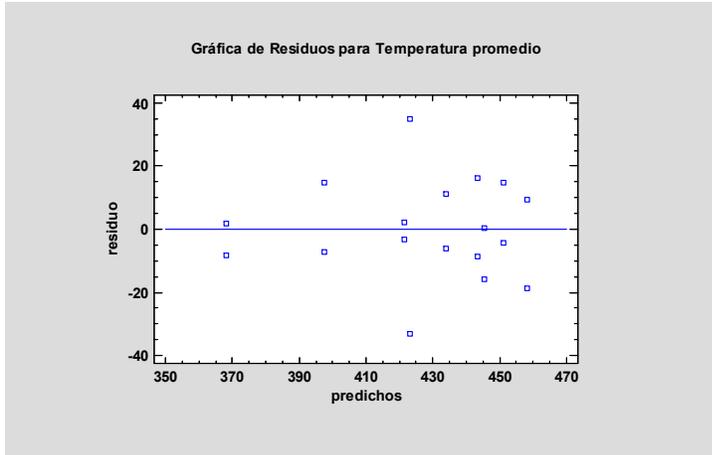


Figura 7 Gráfica de residuos o errores Vs orden de observaciones, Fuente propia.

En la figura 7 se aprecia que los errores no presentan un patrón específico, pese a que se ve más agrupación de los puntos hacia la derecha, están distribuidos de manera aleatoria a ambos lados de la línea media, lo que implica que son independientes (no correlacionados); no obstante, se observa como para una temperatura de 427°C, se tienen valores extremos, que pueden mostrar posible inestabilidad del modelo.

Además, nos muestran que los residuos o errores no presentan patrones por lo que se concluye que las varianzas son iguales parámetro del supuesto de Homogeneidad.

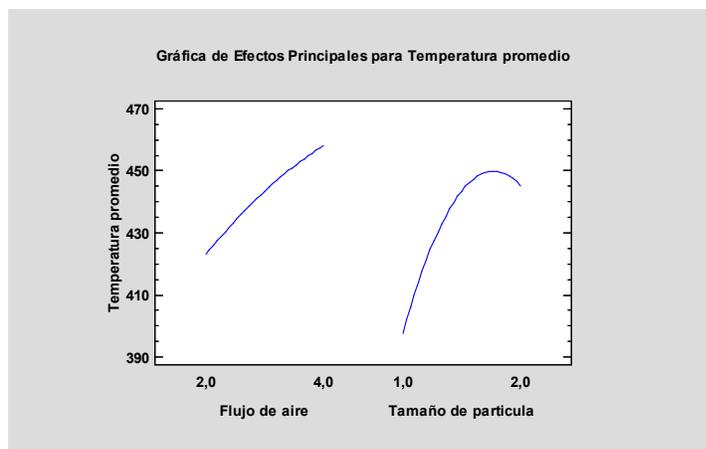
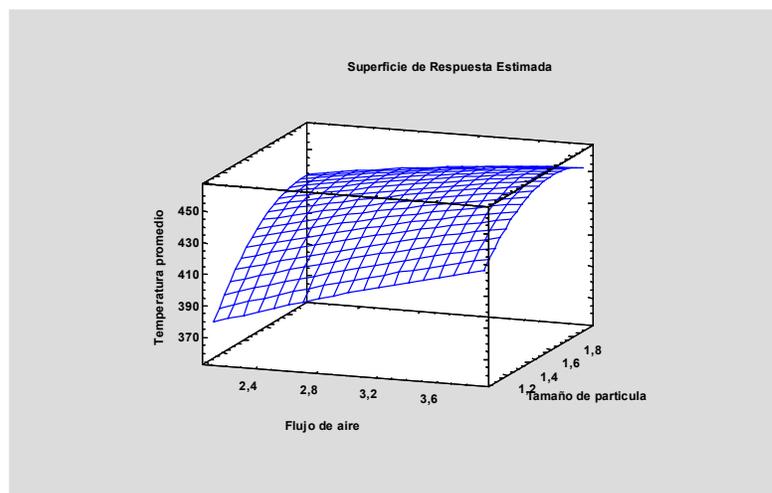


Figura 8 Efectos principales para la temperatura promedio. Fuente propia

En la figura 8 se observa que los efectos principales en cuanto a la temperatura promedio del lecho empacado según los resultados en el caso del flujo de aire es aproximadamente lineal, mientras que el factor de tamaño de partícula tiene un efecto marcadamente cuadrático, son efectos estadísticamente independientes, puesto que no se evidencia una correlación directa entre el tamaño de partícula y el flujo de aire suministrado por la fuente.



**Figura 9 Superficie de respuesta para temperatura promedio Vs los factores flujo de aire, tamaño de partícula. Fuente propia.**

Figura 9 muestra cómo la variable respuesta “Temperatura promedio del lecho fluido” tiene un comportamiento cuadrático según el tamaño de partícula, y lineal en cuanto al flujo de aire, se puede notar como se puede obtener un punto máximo aproximadamente hacia 460 para un tamaño de partícula de 1.5 y un flujo de aire de 3.

## CONCLUSIONES

El estado del arte permitió evidenciar que, en el proceso de producción de cal, la contaminación ambiental alta y afecta a las personas que habitan la zona de influencia y a los operarios, por lo que es fundamental acogerse estrictamente a las normas e implementar tecnologías que propendan por una renovación tecnológica del sector.

Según los resultados obtenidos tanto en el laboratorio, así como en los análisis estadísticos se concluye que la selección de las variables principales: flujo de aire y tamaño de partícula son los parámetros térmicos y fluido-dinámicos más significativos para el proceso en el recuperador de lecho empacado de coque con el fin de mitigar el impacto ambiental.

El modelo matemático obtenido mediante el diseño experimental permite relacionar la variable respuesta, según se demuestra en los valores estimados con sus respectivos intervalos de confianza, que implican que se puede modelar el proceso en función de disminuir el impacto ambiental de esta industria.

El empleo de recuperadores de calor de lecho empacado de coque es una buena solución para los problemas ambientales generados en la producción de cal porque el calor recuperado que sirve para precalentar el coque disminuye los tiempos de producción, la cantidad del combustible utilizado, reduciendo considerablemente los costos y el impacto ambiental causado, al disminuir la cantidad de combustible requerido y mitigan por tanto el calentamiento global y los efectos nocivos de los calores residuales arrojados al medio ambiente.

Según el análisis de resultados del diseño experimental podemos concluir que, la acción conjunta de los factores velocidad de flujo con 4 m/s y tamaño de partícula 1.5 cm, son los que mayor incidencia tienen para que el recuperador alcance una temperatura homogénea máxima de 460 °C, que finalmente es el calor recuperado que deja de emitirse al medio ambiente demostrando así que se disminuye la carga contaminante al ambiente, mejorando las condiciones del aire en el área circundante de la empresa.

## **RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

Debido a los problemas ambientales en la actualidad se hacen necesario profundizar en el tema de los recuperadores de calor como una medida para optimizar el proceso de la cal, y que puede ser extendido a otros sectores de la industria donde se trabaje con calores residuales superiores a 350°C.

Se plantea con esta investigación la ventana de aplicación en trabajos futuros que puedan considerar otros aspectos del fenómeno térmico del recuperador que no se consideraron como: la distribución radial de la temperatura, las variaciones de condiciones de flujo en las paredes del recuperador, el empleo de redistribuidores de flujo uniforme al interior del recuperador y utilizar tamaños de partícula de coque mayores, con el objeto que la experimentación sea lo más cercana posible a la del proceso real.

Es importante extender la recuperación de calor a otros sectores de la industria, por eso se recomienda hacer análisis con otros materiales y combinación entre ellos, con el fin de poder comparar y definir como optimizar diferentes procesos.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Addal, K., & Daweagret, A. (2018). ENHANCED HEAT TRANSFER IN SOLAR AIR HEATERS. *Asian Jr. of Microbiol. Biotech*, 843-847.
- Adonis, A. (2017). Smart Power. *National Infrastructure Commission report* , 66-85.
- Alarcón, T., & Domínguez, M. (2012). *FACTIBILIDAD TEÓRICA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON EL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA DE LACTEOS RENY PICOT* . México: Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
- Albrecht, K., & Ho, C. (2017). HEAT TRANSFER MODELS OF MOVING PACKED-BED PARTICLE-TO-SCO<sub>2</sub> HEAT. *Power and Energy Conference*, 1-10.
- Álvarez, L., & Guerra, J. (2018). Diseño factorial 2k aplicado a la caracterización reológica de suspensiones de caolín. *Prospectiva*, 18-25.
- ANM.Gov. (2017). El carbon en la sociedad Colombiana. *Agencia Nacional Minera*, 9.
- Barba, L., & Villaseñor, I. (2013). *La Cal. Historia, Prpiedades y Uso*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bel Anzué, P., & al, e. (2017). *Influence of the calcination process in traditional gypsum with structural behavior*. La Rioja: Dialnet.
- Bunjaku, F., Filkoski, R., & Sahiti, N. (2017). Thermal Optimization and Comparison of Geometric Parameters of Rectangular and Triangular Fins with Constant Surfacing. *ournal of Mechanical Engineering*, 439-446.
- Casas, S. (2017). *EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL A RECURSO AIRE POR EXPLOTACIÓN DE CAL EN EL MUNICIPIO DE NOBSA, BOYACÁ*. Bogotá: Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales.
- Castañeda, M., & Cabrera, A. (2011). *Procesamiento de datos y análisis estadísticos*. Río Grande do Sul: Pontificia Universidad Católica Do Río Grande do Sul.
- Castaño, O. G. (2015). Desarrollo de un prototipo recuperador de calor residual de lecho empacado de caliza y . *Scientia et Technica* , 343-349.
- Castillo, R. F. (2016). *Propuestas de la implementación de mejoras en el método de verificación en una planta de hidróxido de calcio*. Mexico: Instituto Politécnico Nacional - Escuela superior de de ingeniería química e industrias extractivas.
- Ccorimanya, E. (2018). *Maerz*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/411712403/238916276-Horno-Maerz-pdf>
- Cengel, Y., & Boles, M. (2017). *Termodinamica Cengel 7th*. México: Mc Graw Hill.

- Christie, A., & Barke, R. (2016). MINERAL, COAL AND PETROLEUM RESOURCES: PRODUCTION,. *MINERAL, COAL AND PETROLEUM RESOURCES*, 300-329.
- Coloma, A. G. (2015). *La cal cao más alto implica ahorro de energía y agua*. Santiago: Instituto de ingenieros de minas de Chile.
- Condo, L., & Pazmiño, J. (2015). *Diseño Experimental*. La Habana: Instituto de Investifaciones.
- Datosmacro. (16 de Julio de 2018). Obtenido de [www.datosmacro.com](http://www.datosmacro.com):  
<https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/usa>
- Evans, A., & Strezov, V. (2012). Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. *Renewable and Sustainable Energy*, 41-47.
- Fernandez, D., & Manuel, G. (2013). *Estadística descriptiva y análisis de datos*. Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional.
- Ferre, J., & Rius, X. (2015). *INTRODUCCIÓN AL DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS*. Tarragona.
- Filkoski, R. V. (2018). Optimización energética del funcionamiento del horno vertical en el proceso de calcinación de dolomita. *Thermal Science* , 58-76.
- Fundación Entorno. (2013). Directiva 96/61 relativa a la prevención - Fabricación de cal y derivados. *Guías Tecnológicas*, 3-18.
- Galvan, M., & Velasquez, R. (2011). Cal, un antiguo material como una renovada opción para la construcción. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 52-55.
- Garcia, G. V. (2014). *Caracterización de la transferencia de calor pared-lecho y análisis del efecto de la compresibilidad del gas en un lecho fluidizado mediante simulación CFD*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Giraldo, T. E. (2013). *Desarrollo de un recuperador de calor de lecho empacado de caliza para el proceso de calcinación*. Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Gutierrez, P. H., & De la Vara, S. R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Herz, F., & Hallak, B. (2015). *Simulation of the limestone calcination in normal shaft kilns*. Gaia (Porto): 10th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB).
- Ho, C. (2016). A review of high-temperature particle receivers for concentrating. *Applied Thermal Engineerin*, 958-969.

- Hussam, J. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 268-289.
- IBERDROLA. (2018). *Informe de gases de efecto invernadero*. Madrid. Obtenido de [https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es\\_ES/inversores/docs/IA\\_InformeIntegrado15.pdf](https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/inversores/docs/IA_InformeIntegrado15.pdf)
- INECC. (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de*. Mexico: Secretaria de medio ambiente y recursos Naturales.
- Instituto de Hidrología, M. y. (2016). *CAMBIO CLIMÁTICO*. Bogotá.
- Jouhara, H., & Khordehga, N. (2016). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 268-289.
- Junta de Andalucía. (2018). *Guía de apoyo para la notificación de la industria*. Sevilla: CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y.
- Kevin, A., & Ho, C. K. (2017). Modelos de transferencia de calor de intercambiadores de calor de partículas de lecho empacado en movimiento a SCO 2. *Journal of Solar Energy Engineering*.
- Lecca, E., & Huatucu, R. (2015). Valoración económica ambiental: el problema. *Industrial Data*, 61-71.
- Levenspiel, O. (2012). *Chemical Reaction Engineering*. New York: Limusa Wiley.
- Luo, Y., Andresen, J., & Clarke, H. (s.f.). A decision support system for waste heat recovery and energy efficiency improvement in data centres. *Applied Energy*, 1217- 1224.
- Maerz. (2018). *Tecnología de calcinación para cal y dolomita*. Zurich: Maerz Company.
- McTigue, J., & White, A. (2017). A Comparison of Radial-flow and Axial-flow Packed Beds for Thermal Energy Storage. *Energy Procedia*, 92 - 97.
- Melo, O., & Falla, A. C. (2015). Efecto de datos influyentes en el análisis de diseños factoriales de efectos fijos. *Ingeniería y ciencias*, 121-150.
- Montgomery, D. (2016). *Diseño y análisis de experimentos*. Arizona: Limusa Wiley.
- Motato, J. H. (2007). Metodología para el cálculo de la distribución de temperatura transitoria en un regenerador térmico de lecho poroso empacado. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 66-83.
- Mousalli-Kayat, G. (2015). *Métodos y diseños de investigación cuantitativa*. Mérida: Universidad de los Andes (Venezuela).

- Ochoa, P., & Cogollos, J. (2010). Cleaner production in a small lime factory by means of process control. *Journal of Cleaner Production*, 1171-1176.
- Ontiveros-Ortega, E. (2018). Thermal decomposition of the CaO in traditional lime kilns. Applications in cultural heritage conservation. *Construction and Building Materials*, 190, 349 - 362.
- Osborne, D. (2013). *The Coal Handbook*. Oxford: Woodhead Publishing .
- Panelles, M. (5 de Diciembre de 2018). Las emisiones mundiales de CO2 crecen y vuelven a marcar un récord.
- Promical. (2018). *Estudio economico de concentración proceso de la cal*. Bogotá: Superintendencia de industria y comercio.
- Qiancheng, M. (2015). *Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide*. Obtenido de NASA, National Aeronautics and Space Administration: [https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/ma\\_01/](https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/ma_01/)
- R.2, G.–R. M.–C. (s.f.).
- Ricon, H. (2008). *DESARROLLO DE UN MODELO PARA EL PROCESO DE COQUIZACION EN CRUDOS COLOMBIANOS*. Bucaramanga.
- Riefler, N., H. M., & Rábiger, N. (2012). Pérdida de presión y esfuerzo cortante de la pared en el flujo a través de empaques de esferas confinadas. *Ciencia de ingeniería química*, 129-137.
- Romero, L. (2011). *Simulación del proceso de carbonatación* . Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- RUIZ, H. A. (2016). *EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL MÉTODO DE CALCINACIÓN COMO ALTERNATIVA AMBIENTAL DE REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA DE CURTIDO DE SAN BENITO*. Bogotá: Universidad de la Salle.
- Ruiz, S., & López, I. (2013). *Metodología del Diseño Experimental*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/283351444\\_Metodologia\\_del\\_Disenio\\_Experimental](https://www.researchgate.net/publication/283351444_Metodologia_del_Disenio_Experimental)
- Sagastume, A., & Cogollos, J. (2012). Energy and Exergy . *Applied Thermal Engineering*, 273-280.
- Sagastume, G. A., & Cogollos, M. J. (2012). Energy and exergy assessments of a lime shaft kiln. *Elsevier*, 273-288.

- Salas, P. (2019). *Tecnología de calcinación Maerz*. Obtenido de <https://www.tkirus.com/assets/pdf/brochures/pyroprocessing/MAERZ-Kilns-en.pdf>
- Salazar, J., & Baena, A. (2009). ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS APLICADOS A ESTUDIOS DE SIMULACIÓN. *DYNA*, 249-257.
- Sampieri, H. (2014). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw Hill.
- Saurish, D., Niels, D., & Kuipersa, J. (2016). *Catalysis Today*, 140-150.
- Shat, Y. (2014). *Thermal Energy*. New York: CRC PRESS.
- Swapan, S., Saxena, V.-K., & Samardeep, P. (2013). A Fundamental Concept about Coke Making In Coke Plant. *International Journal of Engineering*, 1004-1018.
- UPME, U. d. (2019). *UPME*. Obtenido de ZONAS CARBONÍFERAS DE COLOMBIA: [http://www.upme.gov.co/guia\\_ambiental/carbon/areas/zonas/indice.htm](http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/areas/zonas/indice.htm)
- Vallés, U., & Rafael, M. (2015). *Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Villanueva, T. (2009). *El Carbon en Castilla y Leon*. Castilla España: Junta de Castilla y Leon.
- World Coal asociation. (19 de Julio de 2019). *worldcoal.org*. Obtenido de <https://www.worldcoal.org/coal>
- World Coal Institute. (2018). Obtenido de World Coal Intitute: [https://www.worldcoal.org/file\\_validate.php?file=coal\\_resource\\_overview\\_of\\_coal\\_report%252803\\_06\\_2009%2529.pdf](https://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=coal_resource_overview_of_coal_report%252803_06_2009%2529.pdf)
- Zolkowski, J. T. (2009). Waste Heat Recovery. *Energy Engineering* , 106.

## ANEXO 1. TABLAS DE RESULTADOS

Flujo de aire	Tamaño de partícula en centímetros		
	<u>1</u>	<u>1.5</u>	<u>2</u>
<b>Bajo (2 m/s)</b>	3	6	7
<b>Medio (3 m/s)</b>	2	9	1
<b>Alto (4m/s)</b>	8	5	4

Expeireimento	Factor	Velocidad	Tamaño de grano	Temperatura promedio
1	1	2	1	359,77
2	1	3	1	390,3
3	1	4	1	418,27
4	1	2	1,5	390,07
5	1	3	1,5	459,73
6	1	4	1,5	439,5
7	1	2	2	427,7
8	1	3	2	445,77
9	1	4	2	465,67
10	2	2	1	370,03
11	2	3	1	412,3
12	2	4	1	423,4
13	2	2	1,5	457,9
14	2	3	1,5	434,83
15	2	4	1,5	467,6
16	2	2	2	445,1
17	2	3	2	429,6
18	2	4	2	446,8

**ANEXO 2. FOTOS DEL PROCESO REALIZADO.**

**Figura 10. Recuperador de calor laboratorio de hidráulica – ITM, fuente propia.**



**Figura 11 coque, cilindros donde se deposita el coque y la tapa, con las termocuplas.**



Figura 102 Sistema de medidores de temperatura, acoplados a las termocuplas, Fuente propia.



Figura 13 Proceso de adecuación de las resistencias, fuente propia.



Figura 14 Recuperador de calor en funcionamiento, laboratorio de hidráulica – ITM



Figura 15 Proceso de calibración del flujo de aire a la entrada del recuperador, fuente propia



**Figura 16** Coque en los diferentes tamaños seleccionados



**Figura 17** Sistema de resistencias nuevas, más resistentes a altas temperaturas



**Figura 18** Cilindro con coque después del proceso luego del paso por el recuperador.



**Figura 19** Cilindro con coque caliente, listo para enfriarse.



**Figura 20 Coque residual enfriándose, sobre ladrillo refractario**