

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

# **Diseño de un prototipo de recuperador de calor residual de lecho empacado de caliza y carbón**

**Luis Bernardo Velásquez Gómez**

**Leonardo Aragón Molina**

**Ingeniería Electromecánica**

**Ph.D Carlos Alberto Acevedo Álvarez**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**MEDELLÍN-COLOMBIA**

**2014**

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## RESUMEN

---

*Palabras clave:* Rediseño de Prototipo, Recuperador de calor, lecho empacado, transferencia de calor y calor residual.

Se realizó el rediseño de un prototipo de recuperador de calor de lecho empacado de caliza y carbón, a partir de uno existente en el laboratorio de fluidos del ITM. El rediseño consta básicamente de un horno eléctrico por el cual se hace pasar aire forzado, el cual debe garantizar a la salida del horno un fluido (aire) a una temperatura promedio de 545 °C, con velocidades variables de flujo. Para mantener dicha temperatura, se le incorporó un controlador electrónico conectado a un termopar.

Entre las reformas realizadas, se diseñó un sistema de resistencias eléctricas en la cámara de calentamiento, el cual permite un contacto directo con el fluido, reduciendo la potencia de consumo de 6000 a 3600 W. Se reemplazó el aislamiento de manta cerámica por ladrillo aislante (UA-23) recomendado por la empresa Erecos, debido a la facilidad de manipulación y alto poder aislante. Se rediseñó el recuperador con dos ductos de acero inoxidable al cromo níquel (18-8) %, con una resistencia mecánica de 60 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 175-200 Hb, resistentes a altas temperaturas; el primer ducto es fijo al horno y tiene un diámetro interno de (0.108 m) y una altura de 0.23 m; el segundo ducto es el recuperador como tal, es móvil para permitir intercambio rápido en las pruebas de laboratorio, tiene un diámetro de (0.096 m) y una altura de 0.25 m; en el sistema de recuperadores se colocó un sistema de ladrillos aislantes. Para el estudio de la variable de

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

interés (temperatura), al recuperador se le adaptaron 3 termopares tipo K y uno J, mediante dos digitadores digitales.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## RECONOCIMIENTOS

---

Infinitas gracias a Dios y a mis padres por haberme concedido el milagro de nacer y guiarme en este proceso de superación y evolución personal, a mí querida esposa por su apoyo y paciencia en toda mi carrera.

Muchas gracias a Efrén Giraldo, Elkin Gómez y a todas aquellas personas que directa o indirectamente colaboraron con información técnica para el desarrollo de este proyecto.

Reconocimiento especial para:

Oscar Alberto Castaño por abrirnos las puertas y permitirnos servir de colaboradores en su proyecto de maestría, además de la constante disposición para atendernos y asesorarnos en todo el desarrollo de este trabajo.

Carlos Alberto Acevedo por sus asesorías, paciencia, excelente disposición para atendernos y por brindarnos todo el conocimiento a lo largo de este proceso formativo.

Gracias a la institución y a todos los docentes que sembraron en nosotros la semilla del conocimiento, preparándonos para cargar en nuestras manos la responsabilidad que se adquiere al formarse como profesional, aportando soluciones y desarrollo a la sociedad.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

# ACRÓNIMOS

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\frac{dT}{dx}$	Diferencial de Temperatura	Grados	
$A$	Área	$m^2$	
$Re$	Numero de Reynolds	Adimensional	
$Bi$	Numero de Biot	Adimensional	
$cm$	Centímetros	Longitud	
$mm$	Milímetros	Longitud	
$Pr$	Numero de Prandtl	Adimensional	
$Nu$	Numero de Nusselt	Adimensional	
$Q$	Conducción de Calor	joule	
$Q''$	Flujo de Calor	$\frac{Joule}{seg}$	
$m$	Metro	Longitud	
$h$	Coeficiente de transferencia de calor por convección	$\frac{cal}{S.cm^2.^{\circ}c}$	
$T$	Temperatura	Grados	
$k$	Conductividad Térmica	$\frac{W}{m.K}$	
$c$	Calor Especifico	$\frac{Kj}{Kg.K}$	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

<i>t</i>	tiempo	seg
<i>d</i>	Diámetro	Cm, m, mm
<i>W</i>	Vatios	Potencia
<i>V</i>	Voltios	Voltaje
<i>L1</i>	Línea 1	Voltios
<i>L2</i>	Línea 2	Voltios
<i>NO</i>	Pulsador normalmente abierto	Adimensional
<i>NC</i>	Pulsador normalmente cerrado	Adimensional
<i>ON/OFF</i>	Prendido y apagado	Adimensional
<i>AL</i>	Aluminio	Adimensional
<i>Fe</i>	Hierro	Adimensional
<i>Ni</i>	Níquel	Adimensional
<i>Cr</i>	Cromo	Adimensional
<i>CaO</i>	Oxido de calcio	Adimensional
<i>CO</i>	Monóxido de carbono	Adimensional
<i>MgO</i>	Oxido de Magnesio	Adimensional

### Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\alpha$	Difusividad Térmica	$\frac{m^2}{Seg}$	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\varepsilon$	Fraction Espacios Vacios		
$\Omega$	Ohmios		
$\rho$	Densidad	$\frac{Kg}{m^3}$	
$\phi$	Esfericidad de una partícula		
$\sigma$	Porosidad	Porcentual	

#### Subíndices

Subíndice	Término
$T\alpha$	Temperatura Ambiente
$Ti$	Temperatura Inicial
$Ts$	Temperatura Superficial
$As$	Área Superficial

Abreviatura	Término
$LTE$	Modelo de equilibrio térmico local

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	
		Versión	
		Fecha	

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Objetivos	13
1.2 General	13
1.3 Específicos	14
1.4 Organización del trabajo	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1 Capa Límite	18
2.2 Números Adimensionales	22
2.2.1 Número de Reynolds	22
2.2.2 Número de Biot	23
2.2.3 Número de Prandtl	25
2.2.4 Número de Nusselt	26
2.2.5 Ecuaciones de Proceso	27
2.2.5.1 Ley de Newton de Enfriamiento	29
2.2.5.2 Calor Específico	30
2.2.5.3 Capacidad Calórica Volumétrica	30
2.2.5.4 Conductividad Térmica	31
2.2.5.5 Difusividad Térmica	31
2.2.6 Lecho Empacado, Caracterización Teórica	33
2.2.6.1 Esfericidad	34
2.2.6.2 Volumen de Caliza y Coque	34
2.2.6.3 Volumen Promedio de Partícula	35

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

2.2.6.4 Tamaño Promedio de Partícula	35
2.2.6.5 Área Promedio de Partícula	35
2.2.6.6 Volumen del Recuperador	36
2.2.6.7 Relación de Tubo-Partícula	36
2.2.6.8 Fracción de Espacios Vacíos	37
2.2.6.9 Diámetro Hidráulico	38
2.2.6.10 Caída de Presión	39
2.3 Estado del Arte	43
2.3.1 Modelos para los Lechos Empacados	43
2.3.1.1 Medio Poroso	43
2.3.1.2 Medio Geométrico	46
3 METODOLOGÍA	54
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1 Rediseño del Recuperador de Calor en todo su conjunto	56
4.1.1 Cámara de Calentamiento	58
4.1.2 Ladrillos Refractarios Aislantes	63
4.1.2.1 Usos	64
4.1.3 Mortero	67
4.1.4 Resistencia Eléctrica	69
4.1.5 Cálculo de la Resistencia	71
4.1.6 Soporte para las Resistencias	74
4.1.7 Resistencias Acopladas en el Soporte	75
4.1.8 Soporte Separador de las Resistencias	76
4.1.9 Soporte Separador entre la Tapa inferior de la Cámara y las Resistencias	77

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

4.1.10	Ensamble Bloque de Resistencias	79
4.1.11	Diseño del Recuperador de Calor	80
4.1.11.1	Cálculos para el Recuperador de Calor	80
4.2	Sistema de Control y Regulación	86
4.2.1	Control de Temperatura	86
4.2.2	Elemento Sensor	87
4.2.3	Elementos para Controlar el Encendido y Apagado del Equipo	
	Diseñado	88
4.2.3.1	Pulsadores NO - NC	88
4.2.3.2	Suiche ON - OFF	88
4.2.4	Relé	88
4.2.5	Elementos de Protección y Potencia	89
4.2.6	Contactador	90
5.	AGENDA DE INVESTIGACIÓN Y TRABAJOS FUTUROS	96
5.1	Principales mejoras en el Diseño	96
5.2	Principales hallazgos de Estado del Arte	97
	REFERENCIAS	101
	APÉNDICE	109
	APÉNDICE A	109
	APÉNDICE B	110
	APÉNDICE C	110
	APÉNDICE D	111
	APÉNDICE E	111
	APÉNDICE F	114

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Colombia presenta grandes reservas de caliza, son tan abundantes que es difícil hacer una cuantificación. Sus yacimientos están distribuidos en la región Andina, ubicados principalmente en las cordilleras oriental, central y occidental, como resultados de la acumulación de sedimentos calcáreos marinos presentes en las tres cordilleras Andinas, pero su presentación como mármol (calizas metamórficas cristalinas) es muy frecuente y existen distritos amplios. Los yacimientos de caliza según (Henao, 2012) en el departamento de Antioquia se encuentran en el piedemonte oriental de la cordillera central, yacimiento como el de Nare, con más de mil millones de toneladas, este yacimiento tiene mármol dolomítico del paleozoico. Otras localidades antioqueñas ricas en calcáreos son: Amalfi (Dolomita), Segovia, Abejorral, Santa Bárbara, Cocorná, Urrao, Turbo, Frontino, Sonsón, Maceo y San Carlos (Donde se localizó la primera planta de cal agrícola).

La abundancia de piedra caliza ha generado claramente un desarrollo económico y social del país. Sectores tales como la agrícola, la construcción, metalúrgico, azúcar, papel y muchos otros, requieren de este valioso material para sus respectivos procesos o están íntimamente relacionados con la conversión de la caliza a cal, como es el caso de la industria cementera.

Pero la industria de la cal presenta diversos problemas. El tipo de horno y el combustible utilizado influyen en la calidad de la cal obtenida, sin embargo los mayores problemas que

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

se generan son el daño ambiental, largos tiempo en el proceso, altos costos de producción y baja eficiencia energética. En el caso colombiano algunas empresas tienen tecnologías mejoradas (hornos rotatorios de alto costo), pero en muchas otras se requieren mejoras en el proceso con presupuestos accesibles.

Son varios los desafíos planteados por la industria de la cal en el país, especialmente en regiones del oriente antioqueño, donde las pérdidas energéticas, el daño ambiental causado por la calcinación, el material particulado, la contaminación térmica entre otros deben ser objetivos a solucionar en el corto plazo.

Estas empresas trabajan con hornos de foso y otras con hornos verticales tradicionales. En ambos tipos de hornos se producen altos flujos máxicos de gases residuales que salen de las chimeneas a temperaturas de 500 °C, o más; esto implica baja eficiencia térmica y mayor consumo de combustible (Sagastune y Vandecasteele, 2011); 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 et al, 2010).

Los hornos para la calcinación de la caliza básicamente son de dos tipos, de foso y verticales, los hornos de foso emplean hasta 70 horas en el proceso de calcinación, los hornos verticales emplean 50 horas, comparados con hornos de tecnologías mejoradas como el de la (Maerz , 2002), con 17.5 horas, lo que hace que la producción de cal sea costosa en los hornos de foso y verticales.

Una manera de hacer eficiente el proceso de la cal, es restringiendo las pérdidas energéticas y ambientales al recuperar los calores residuales de los gases de las chimeneas. Esto se realiza al adicionar a los hornos intercambiadores de calor específicos denominados en este trabajo como recuperadores de calor de lecho empacado cuyo objetivo principal es el precalentamiento de caliza y carbón y filtrar los gases de

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

combustión. Este sistema reduciría los costos, mejoraría la calidad de la cal producida y disminuiría el impacto ambiental negativo causado por los gases residuales.

Este trabajo busca mejorar falencias del proceso de producción de la cal y contribuir al desarrollo técnico del sector calero en nuestra región y en el país. Dichas metas se pueden obtener mediante el desarrollo, análisis y evaluación de un prototipo recuperador de calor de la cal y carbón, buscando la extracción de la mayor cantidad de calor a partir de los gases residuales calientes a 500 °C, por medio de recuperadores optimizados de calor, usando como lecho empacado la caliza y carbón de varios tamaños.

Se investiga y evalúa experimentalmente el efecto de la variación de los principales factores involucrados en el lecho empacado de caliza y carbón, sobre la variable de interés que es la temperatura.

En el caso específico de esta investigación los factores considerados son: la cantidad de caliza y carbón en el recuperador, la velocidad de entrada del aire caliente y el tamaño promedio de las partículas de caliza y carbón. Como variable respuesta se considera la temperatura promedio resultante a través del recuperador de calor. También se hace un rediseño del recuperador con el cual cuenta en laboratorio de fluidos del ITM.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.2 General**

Diseñar un recuperador de calor de lecho empacado basado en caliza-carbón, para procesos de calcinación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

### 1.3 Específicos

- Efectuar un proceso investigativo en las bases de datos del ITM, internet y bibliotecas, con el propósito de ampliar y mejorar el marco teórico y el estado del arte del proyecto.
- Diseñar el recuperador de calor de caliza - carbón para el proceso de calcinación.
- Entregar planos y cálculos del prototipo.

### 1.4 Organización del trabajo

Este proyecto de grado está dividido en 5 capítulos:

En el capítulo 1, se realiza una introducción a los procesos de la cal; el porqué de un recuperador de calor, se establecen los objetivos generales y específicos.

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico y la revisión del estado del arte para los procesos de producción de la cal, los recuperadores y regeneradores de calor.

En el capítulo 3 se describe la metodología que se aplicó a todo el proyecto

En el capítulo 4 se presentan los resultados y discusión donde se describe el rediseño del recuperador de calor y los factores teóricos involucrados en el.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

En el capítulo 5 se realiza una agenda de investigación y trabajos futuros, en las que se nombran las mejoras en el diseño y se resaltan los principales hallazgos del estado del arte

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## 2. MARCO TEÓRICO

---

Se ha realizado un revisión en bases de datos, textos, libros, revistas y en investigaciones globales sobre el tema de interés, pocos estudios se han realizados en hornos de poso para calcinación, debido posiblemente que estos hornos salieron de la cadena productiva hace más de un siglo en Europa. Existe alguna literatura científica sobre procesos de la cal y poca sobre lechos de caliza aplicados a hornos verticales para recuperar calor residual. Esto lo confirma la literatura revisada de autores como los cubanos que han investigado la problemática de la producción de cal en su país, Ochoa et al (2010) y chinos (Zheng et al, 2005). Sin embargo, existe buena documentación sobre modelación térmica de los lechos empacados en general y de los recuperadores y regeneradores de calor. El recuperador de calor de esta investigación es diseñado con base en un lecho empacado o lecho fijo de caliza y carbón.

En general los lechos empacados o fijos y los lechos fluidizados tienen diferentes aplicaciones energéticas que apuntan a la utilización de energías limpias o amigable al medio ambiente, entre ellas se encuentran procesos de gasificación y recuperación de calor, los lechos empleados para gasificación tienen por objeto producir un combustible llamado gas pobre que finalmente es utilizado en generadores o motores de combustión interna para producción de electricidad, de mucha utilidad en zonas no interconectadas.

Un recuperador de calor tiene como objetivo principal la recuperación de energía utilizada en un proceso térmico, es un mecanismo relativamente simple, es un intercambiador térmico, que consta de una carcasa metálica recubierta con refractarios y en el interior algún tipo de material como metales, arena, rocas o algún otro que hace de lecho empacado o fijo, la función principal es almacenar calor. El material del lecho puede ser

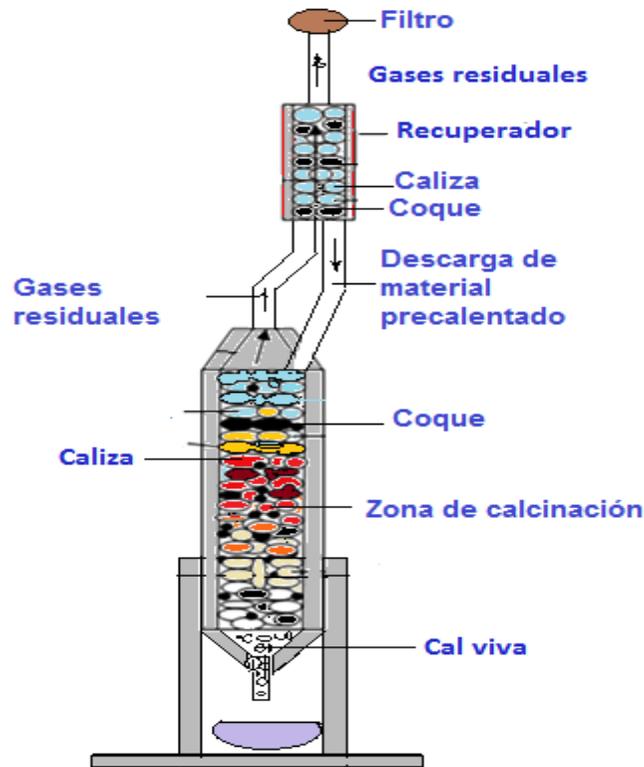
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

de partículas con formas geométricas definidas como esferas u otras formas. También se usan formas no convencionales, como la caliza y carbón coque, cuando el material es macizo como la caliza se le llama medio geométrico y de medio poroso como el coque. En los dos casos a través de los espacios vacíos, se hace pasar un fluido produciendo flujo turbulento (Petrov, 2006), lo que favorece la transferencia de calor (Bahrami et al, 2004).

Los gases residuales calientes provenientes de la chimenea del horno de calcinación, entran al lecho, pasan a través de los espacios vacíos, transfiriendo parte de su energía a la caliza y el carbón y salen a menor temperatura y presión.

La energía ahorrada por el recuperador se puede utilizar también para cogenerar electricidad, precalentar el aire que va al horno, en la producción de vapor o para calentar agua u otro uso conveniente en la planta (Motato et al, 2007).

En la (Figura 1) se observa un esquema simplificado de un horno vertical con un recuperador de calor en la parte superior.



**Figura 1.** Horno vertical con recuperador de calor. Fuente: propia.

Un lecho empacado actúa como un recuperador de calor gas-sólido que mejora el desempeño térmico y productivo de los hornos y de la planta, al recuperar calor de los gases de desecho y hacerlo útil para el proceso. También son comunes los regeneradores de calor.

La importancia de los recuperadores cobra vigencia debido a los elevados y crecientes costos de los combustibles fósiles y la preocupación mundial por su ahorro, así como por la reducción de los gases de efecto invernadero (Protocolo de Kioto). Un recuperador de calor absorbe una parte importante de la energía calorífica de los gases generados por un combustible sólido, líquido o gaseoso, en el proceso de fusión, calentamiento, tueste,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

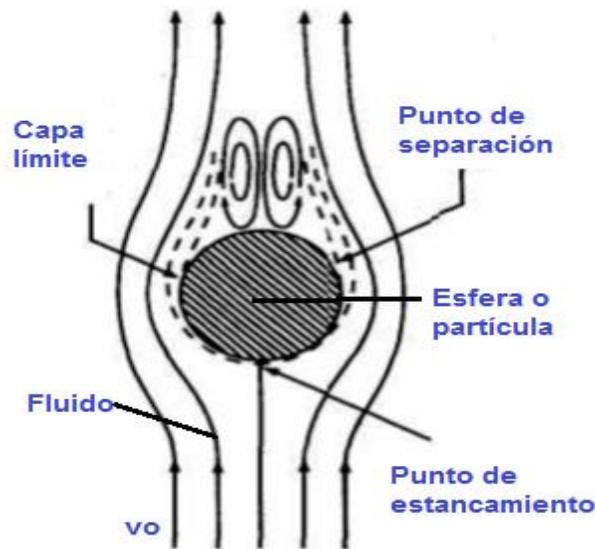
secado y en nuestro caso de calcinación de caliza. La energía calorífica absorbida es transmitida a otro fluido, la mayoría de las veces el aire de combustión para el propio proceso y el ahorro de combustible es tan considerable que el recuperador se puede amortizar en pocos meses, consiguiendo además una reducción drástica de emisiones de gases de invernadero.

En cuanto a la transferencia de calor, es poco probable encontrar en los lechos empacados material particulado (polvos), el cual es el responsable de incrementar la radiación del aire caliente. El aire caliente emite muy poca radiación, porque está compuesto principalmente de nitrógeno y oxígeno, que no absorben ni emiten radiación a nivel práctico (Bes, 2006). Por tanto, la radiación del aire caliente se puede considerar no significativa. Según (Shagapov et al, 2008), la transferencia de calor por radiación es pequeña en los lechos con temperaturas menores a 1250°C. Por lo que en esta investigación no se considera la transferencia de calor por radiación.

## 2.1 Capa Límite

Hay un interés especial por la transferencia de momento lineal y las pérdidas por fricción para el flujo de fluidos en el interior de conductos o tuberías (lechos empacados), El flujo de fluidos en torno a cuerpos inmersos, aparece en muchas aplicaciones de ingeniería y en otras aplicaciones. Estas aplicaciones se presentan, por ejemplo, en el flujo a través de esferas empacadas en secado y filtración, en el flujo alrededor de tubos en los intercambiadores de calor, entre otros. En estas diversas aplicaciones es conveniente poder predecir las pérdidas por fricción y la fuerza ejercida sobre los objetos sumergidos. El fluido (aire caliente para el caso de esta investigación) no fluye en forma paralela a la superficie, sino que debe cambiar de dirección para pasar alrededor de un cuerpo sólido

como una esfera, ocurrirán significativas pérdidas adicionales por fricción, a este procedimiento se llama arrastre de forma. En muchos casos el cuerpo inmerso es un sólido de forma irregular que presenta varios ángulos a la dirección de flujo del fluido. La figura 2 muestra la velocidad de la corriente libre uniforme alrededor del cuerpo esférico suspendido en un conducto muy largo. Las líneas llamadas líneas de flujo representan la trayectoria de los elementos del fluido (Geankopolis, 1998).



**Figura 2.** Flujo alrededor de objeto esférico inmerso en un fluido, Fuente: Geankopolis, (1998).

La fina capa límite adyacente a la superficie sólida se muestra como una línea punteada, y en el borde de esta capa, la velocidad es esencialmente igual a la velocidad del flujo general adyacente a él.

En el centro de la cara frontal del cuerpo, llamado punto de estancamiento, la velocidad del fluido será cero; en este punto empieza el crecimiento de la capa límite y continúa

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	
		Versión	
		Fecha	

sobre la superficie hasta que la capa se separa. El esfuerzo tangencial sobre el cuerpo debido al gradiente de velocidad en la capa límite es la fricción superficial. Por fuera de la capa límite, el fluido cambia de dirección para pasar alrededor del sólido; se acelera cerca del frente y luego se desacelera. A causa de estos efectos, el fluido ejerce una fuerza adicional sobre el cuerpo. Este fenómeno, llamado arrastre de forma, se agrega al arrastre superficial en la capa límite, en la figura 2 ocurre la separación de la capa límite, como se muestra, y cuando se forman grandes remolinos que contribuyen a crear el arrastre se produce una estela, que cubre toda la parte posterior del objeto. El punto de separación depende de la forma de la partícula, del número de Reynolds entre otros factores (Geankopolis,1998).

La teoría de la capa límite es atribuida a (Prandtl, 1904). y es seguida y corroborada experimentalmente por las investigaciones modernas (Dondé, 2005). La capa límite es una delgada capa de fluido que se forma sobre el sólido. La transferencia de calor es básicamente un fenómeno térmico de convección hacia la capa límite, de conducción y convección a través de la capa límite y posteriormente de conducción al interior de la partícula de caliza y de carbón (Incropera et al, 2011). Cuando se logra vencer la resistencia a la transferencia de calor, el calor penetra y se propaga, ya sea hacia el fluido desde el sólido o hacia el sólido desde el fluido, dependiendo de la temperatura de uno u otro, (Prandtl, 1904).

El fluido está por tanto dividido en dos regiones: una capa límite en contacto con la parte sólida y una zona denominada de flujo externo. En la capa límite los gradientes de velocidad y temperatura varían rápidamente y son altamente significativos. En la región de flujo externo, las fuerzas viscosas y de inercia son del mismo orden, los gradientes de velocidad y temperatura varían muy poco y no son significativos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Lo anterior implica que en la capa límite los efectos viscosos no se pueden despreciar. Sobre la superficie de la partícula el fluido es altamente viscoso, de tal manera que se crea una capa delgada estática, en la que van decreciendo los efectos viscosos e incrementando los gradientes de velocidad y temperatura, hasta llegar a la velocidad y temperatura del fluido. El fluido se desliza sin roce sobre la capa límite.

Una capa límite más gruesa que otra significa que el calor se difunde más rápido en la primera que en la segunda. Es importante anotar, que la capa límite térmica solo existe si la diferencia de temperatura entre el fluido y el sólido es apreciable,(Prandtl,1904).

La importancia de la resistencia a la transferencia de calor en el fluido y en la partícula, depende de las propiedades particulares del material de cada lecho (caliza y carbón). Esto se analiza mediante un parámetro adimensional denominado número de Biot (Bejan, 2004).

A medida que la conducción de calor al interior de la partícula de caliza y carbón progresa, esta se puede visualizar con una parte externa caliente y una parte menos caliente al interior. Cuando el tamaño de partícula es relativamente grande y la resistencia térmica alta, se crea un diferencial térmico a través de la caliza, por tanto, a través de longitud del recuperador. Esto genera un perfil interno longitudinal de temperatura característico, comenzando de alta a baja temperatura, hasta lograr el equilibrio térmico después de un tiempo. Para todo el frente de partículas tomado a una misma distancia con respecto a la entrada del aire al recuperador, se supone que todas las partículas tienen un valor medio uniforme de temperatura (Bluhm et al, 2010).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## 2.2 Números Adimensionales

La capa límite tiene condiciones relacionadas con interpretaciones físicas, para ello existen una serie de parámetros adimensionales que permiten identificar el comportamiento de un fluido, como lo es el número Reynolds el cual es la razón de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas en la capa límite hidrodinámica. Otros parámetros adimensionales de interés son el número Biot, Fourier, Prandtl y Nusselt, que serán analizados a continuación.

### 2.2.1 Número de Reynolds (Re)

Dentro de un fluido es importante determinar su comportamiento y básicamente existen dos tipos, laminar y turbulento, el número Reynolds determina este proceder, en un fluido existen perturbaciones que se pueden ampliar para producir turbulencia, para Re pequeños, las fuerzas viscosas son suficientemente grandes con relación a fuerzas de inercia para evitar esta amplificación manteniendo un flujo laminar, pero al aumentar Re los efectos viscosos se hacen menos importantes de manera progresiva en relación con los de inercia y las pequeñas perturbaciones se amplifican tendientes a producir un flujo turbulento. Se considera flujo laminar si el número Reynolds es menor a 2300 y flujo turbulento para Reynolds mayores a 4000. La ecuación 1 que define el número Reynolds está dado por:

$$Re = \frac{\rho u_m d_p}{\mu} \quad (1)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $u_m$  es la velocidad media en la sección transversal del tubo (medida en lecho vacío),  $d_p$  es el diámetro promedio de las partículas y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido. Se encuentra que se da mayor prelación a la conducción y convección en función del número Reynolds que a las características físicas, térmicas y de transporte del material del lecho donde tiene mucha importancia el número adimensional Biot. No se tiene en cuenta el número de Biot para el análisis térmico con base en la conductividad térmica y el diámetro de partícula.

### 2.2.2 Número de Biot (Bi)

El número Biot proporciona una medida de la caída de temperatura en un sólido con relación a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido, se presenta cuando hay transferencia de calor a través del fluido y el sólido en estado transitorio. Relaciona la transferencia de calor por conducción dentro de un cuerpo y la transferencia de calor por convección en la superficie de dicho cuerpo. El Biot mide si prima la resistencia a la conducción al interior de la partícula  $\left(\frac{L_c}{k}\right)$  o la resistencia térmica  $\left(\frac{1}{h_s}\right)$  en el fluido,  $(h_s)$  es el coeficiente convectivo local. El Biot en general está definido por la ecuación 2 y más específicamente para el caso de la caliza por la ecuación 3 y para el carbón-coque la ecuación 4, donde se involucra  $h_v = 8,57 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3\text{K}}$ , el coeficiente convectivo volumétrico de la caliza en vez de  $h_s$ ,  $L_c$  la longitud característica  $\left(\frac{d_p}{2}\right)$ ,  $\alpha$  es la relación entre el volumen y el área de partícula de caliza y carbón,  $k_{caliza}$ ,  $k_{coque}$  es la conductividad térmica de la caliza y carbón-coque (Adeyanju et al, 2009)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	
		Versión	
		Fecha	

$$Bi = \frac{\text{Resistencia a la conducción}}{\text{Resistencia a la convección}} = \frac{\frac{L_c}{k}}{\frac{1}{h_s}} = \frac{h_s L_c}{k} \quad (2)$$

$$Bi = \frac{h_v a d_p}{2k_{caliza}} \quad (3)$$

$$Bi = \frac{h_v a d_p}{2k_{coque}} \quad (4)$$

Para Biot menores a 0.1 la resistencia a la transferencia de calor ocurre en la capa límite, por lo que la resistencia a la conducción de calor es mínima, esto se conoce como resistencia interna despreciable, Incropera et al,(2011), por tanto si el Biot es  $> 0.1$ , el mecanismo de transferencia de calor que predomina es la conducción al interior de la partícula, siendo la resistencia alta a la transferencia de calor en el fluido.

Según las ecuaciones 3 y 4 la conductividad térmica es baja ( $0.26 \frac{W}{mK}$  para el carbón-coque y  $2.16 \frac{W}{mK}$  para la caliza), el coeficiente convectivo volumétrico para el coque (pendiente para calcular en la parte experimental), el de la caliza es de  $8.57 \frac{W}{m^3K}$ , por lo que se requiere un tamaño de partícula pequeño para obtener un Biot bajo.

Cuando la resistencia interna es despreciable, la variación de la temperatura o los gradientes térmicos al interior de la partícula son muy pequeños para cada instante dado, por lo que la temperatura se puede considerar uniforme a través de un frente de temperatura, si el Biot es alto lo que prima es la resistencia a la conducción al interior de la partícula y el mecanismo que predomina es la transferencia de calor en la capa límite, Bluhm et al,(2010).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

El método de la resistencia interna despreciable, es llamado “Método Global”, “Método Concentrado” o “*Lumped Capacity*” en inglés. Esta abstracción es asumida en numerosos trabajos de investigación reportados (Zarrinehkasfsh y Sadrameli, 2004).

Un requisito indispensable para la resistencia térmica en la caliza es que el tamaño de partícula sea pequeño (aproximadamente 1 cm) y para el carbón mucho menor (aproximadamente 0.5 cm). Para partículas grandes de caliza esta suposición no es válida y menos para el carbón, porque se presentará resistencia térmica a la transferencia de calor debido al diámetro de partícula grande y a la baja conductividad térmica.

### 2.2.3 Número de Prandtl (Pr)

El número de Prandtl es la relación entre la difusión molecular del momentum y la difusión molecular del calor, o también la relación entre el espesor de la capa límite de velocidad y la capa límite térmica. Para los gases está entre 0.5 y 1, lo que significa que, tanto la cantidad de momento como la cantidad de calor se difunden a través del fluido a una velocidad similar (Bejan y Kraus, 2003). El número de Prandtl está dado por la ecuación 5:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (5)$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido,  $c_p$  es el calor específico y  $k$  la conductividad térmica.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

#### 2.2.4 Numero de Nusselt (Nu)

El número Nusselt es la relación entre el calor que se transfiere por convección y el que existiera si solo hubiese transferencia de calor por conducción a través del fluido. A mayor Nusselt mayor transferencia de calor por conducción en el fluido. Un Nusselt igual a 1 significa que ocurre conducción pura a través del fluido. Este número aparece tanto en convección natural como forzada, Bejan (2004), En general tiene la forma de la Ecuación 6:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (6)$$

Donde :

El coeficiente convectivo es  $h$ ,  $k$  la conductividad térmica y  $L_c$  la longitud característica. Aunque la Ecuación 6 define el número de Nusselt, este número también es función de la longitud, de  $Re$  y del  $Pr$ , como se muestra en la Ecuación 7:

$$Nu = f(x, Re, Pr) \quad (7)$$

Por tanto, conociendo  $Re$  y  $Pr$ , se conoce el  $Nu$  y conocido este, se puede conocer ( $h$ ), que es realmente el problema para hallar el flujo convectivo de calor. Este flujo es descrito por la Ecuación 8, Bejan (2004).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

$$q_{convectivo} = h(T_{sólido} - T_{fluido}) \quad (8)$$

### 2.2.5 Ecuaciones del proceso

Dentro de los fenómenos térmicos que se estudian en un recuperador de calor residual están la temperatura y transferencia de calor, se estudia la transferencia de calor por conducción y por convección, la transferencia de calor por radiación se desprecia debido a que el nitrógeno y el oxígeno contenidos en el aire emiten poca radiación (Cengel, 2007), son moléculas biatómicas simétricas que son bastante transparentes a la radiación, excepto a temperaturas extremadamente elevadas en las cuales ocurre la ionización, por tanto el aire atmosférico se puede considerar como un medio no participante en los cálculos relativos a la radiación.

Las ecuaciones que permiten determinar el comportamiento térmico son la ecuación de Fourier, la ecuación de la ley de enfriamiento de Newton y la ecuación de difusión de calor, se realizará una revisión de estas ecuaciones según la literatura.

$$Q = -kA \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (9)$$

Dónde:

Q = conducción de calor o rapidez de transferencia de calor  $\left( \frac{W}{m} \right)$

K = conductividad térmica del material,  $\left( \frac{W}{mK} \right)$

A = área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor,  $( m^2 )$

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	
		Versión	
		Fecha	

$\frac{dT}{dx}$  = Diferencial de temperatura con respecto a la dirección x

El signo negativo de la ecuación (9), garantiza que la transferencia de calor en la dirección positiva de las x sea una cantidad positiva.

Incropera et al (2011), determinó el flujo de calor como la derivada de la ecuación (9) En condiciones de régimen estacionario y con una distribución lineal de temperaturas:

$$Q'' = -k \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (10)$$

Dónde:

$Q''$  = flujo de calor

La ecuación (10) implica que el flujo de calor es una cantidad direccional.

Si aceptamos según Incropera que el flujo de calor es una cantidad vectorial, es posible escribir un planteamiento más general de la ecuación de la ley de Fourier:

$$Q'' = -k \left( i \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + j \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + k \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) \quad (11)$$

### 2.2.5.1 Ley de Newton de enfriamiento

Expresa la transferencia de calor por convección, Cengel (2007), la define como la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad del área superficial por unidad de diferencia de temperatura.

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (12)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Dónde:

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección,  $(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ\text{C})$

$A_s$  = área superficial de transferencia de calor,  $(m^2)$

$T_s$  = temperatura de la superficie,  $(^\circ\text{C})$

$T_\infty$  = temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie,  $(^\circ\text{C})$

Es de anotar que según Cengel, no debemos de dejarnos llevar por la simple apariencia de la ecuación (12) en virtud de que el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  depende de varias de las variables mencionadas y por consiguiente, difícil de determinar.

Otra ecuación de mucha importancia para esta propuesta es la **difusión de calor o térmica** (13), Incropera et al (2011), la define como un importante propiedad que mide la capacidad de un material para conducir energía térmica en relación con su capacidad para almacenar energía térmica.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (13)$$

Dónde:

$\alpha$  = difusividad térmica,  $(m^2/s)$

$k$  = conductividad térmica,  $(\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ\text{C})$

$\rho$  = densidad del material,  $(kg/m^3)$

$c_p$  = calor específico,  $(\frac{J}{kg} \text{ } K)$

Con el supuesto que la conductividad térmica es constante, esta afecta la razón de cambio de la temperatura con respecto al tiempo, dicha razón es más rápida si el material tiene una gran difusividad térmica, a diferencia de la conductividad térmica  $k$  de un material,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

que permite o no el paso del calor por conducción, la difusividad térmica consta de tres propiedades físicas, una de transporte y dos termodinámicas: la conductividad térmica  $k$ , la densidad del material  $\rho$  y el calor específico  $c$ .

### 2.2.5.2 Calor específico ( $c_p$ )

Es la energía requerida para elevar la temperatura un grado centígrado o Kelvin a una masa de un kilogramo  $\frac{kJ}{kg K}$ , Bejan y Kraus (2003).

### 2.2.5.3 Capacidad calórica volumétrica ( $\rho c_p$ )

Está dada por el producto de la densidad  $\rho \frac{kg}{m^3}$  por el calor específico  $c_p \frac{kJ}{kg K}$ .  $\rho c_p$ , es un indicativo de la habilidad del material para almacenar calor volumétricamente (cuánta energía almacena el material por unidad de volumen). Materiales con una buena capacidad calórica como los cerámicos presentan un valor de alrededor de  $\frac{10^3 kJ}{m^3 K}$ .

La capacidad calórica volumétrica de la caliza y el carbón, está dada por las ecuaciones 14 y 15, Incropera et al (2011), evidencia un valor relativamente grande, lo cual indica que tiene una buena capacidad de almacenar calor

$$\rho c_p = \left(2320 \frac{kg}{m^3}\right) \left(810 \frac{kJ}{kg K}\right) = 1,87 \frac{10^6 kJ}{m^3 K} \quad (\text{Caliza}) \quad (14)$$

$$\rho c_p = \left(600 \frac{kg}{m^3}\right) \left(3400 \frac{kJ}{kg K}\right) = 2,04 \frac{10^6 kJ}{m^3 K} \quad (\text{Coque}) \quad (15)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

#### 2.2.5.4 Conductividad térmica (k)

Es la capacidad de un material para conducir calor a través de él. Un material con alto  $k$   $\frac{kW}{m K}$  es un buen conductor térmico, mientras que uno con bajo  $k$  es mal conductor de calor. Así, un material como la espuma de poliuretano tiene un  $k$  de 0.02, la madera de 0.14, el ladrillo de 0.74, mientras que el acero ordinario al carbono 60.5, el cobre de 401 y la plata de 429 (Cengel y Ghajar, 2011).

#### 2.2.5.5 Difusividad Térmica ( $\alpha$ )

Es útil analizar el comportamiento conductor de un material en relación con su capacidad de almacenar calor. En transferencia de calor se acostumbra condensar estas dos propiedades en una sola llamada difusividad térmica  $\alpha$  ( $\frac{m^2}{s}$ ). La difusividad térmica es la conductividad térmica de un material sobre su capacidad calórica volumétrica. Esta propiedad aparece frecuentemente en las ecuaciones de transferencia de calor, por ejemplo en la de distribución de temperatura en función del tiempo a través de un cuerpo, llamada con razón “Ecuación de difusión de calor” y también en algunos parámetros adimensionales. La difusividad describe qué tan rápido cambia la temperatura de un material al sufrir cambios en su entorno o cuán rápido se adapta el material a los cambios térmicos externos, Bejan (2004).

Un material con alta difusividad implica que el calor pasa rápidamente a través de él, a su vez, un material con baja difusividad implica que el calor se almacena fácilmente. La difusividad para materiales comunes como la madera va desde  $0.13 \times 10^{-6}$  (y un poco

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

más alto para materiales aislantes) hasta valores relativamente altos para los metales: aceros ordinarios al carbono  $17.7 \times 10^{-6}$ , hierro  $28.2 \times 10^{-6}$ ,  $113 \times 10^{-6}$  cobre,  $127 \times 10^{-6}$  oro, y plata  $149 \times 10^{-6}$ , Incropera et al (2011).

La Tabla 1 presenta un resumen de las propiedades termofísicas de la caliza y el coque, se evidencia que la conductividad  $k$   $2.15 \frac{W}{mK}$  para la caliza y de  $0.24 \frac{W}{mK}$  para el carbón, son bajos comparados con el cobre  $400 \frac{W}{mK}$ , pero su capacidad de almacenar calor volumétricamente ( $\rho c_p$ ) es relativamente grande, por tanto su difusividad será baja:

$$\alpha_{caliza} = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{\frac{2.15 kW}{10^3 mK}}{1,87 \frac{10^3 kJ}{m^3 K}} = 1,15 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad (16)$$

$$\alpha_{coque} = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{\frac{kW}{mK}}{\frac{kJ}{m^3 K}} = \frac{m^2}{s} \quad (\text{este cálculo pendiente en la fase experimental}) \quad (17)$$

El anterior valor de la difusividad, implica que el calor es almacenado en la caliza. Esto es una consideración general, de todas maneras el factor predominante es el tamaño de partícula como se analizó previamente. En la tabla 1,  $T_i$  y  $T_f$  son las temperaturas inicial y final de la caliza.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

**Tabla 1.** Propiedades térmicas de la caliza y carbón. Fuente: (Incropera et al,2011), (Barin et al, 1993)

Temperatura K	Densidad $\rho$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	Conductividad Térmica K ( $\frac{W}{m K}$ )	Calor Específico $c_p$ ( $\frac{kJ}{kg K}$ )	Capacidad Calórica ( $\frac{10^3 kJ}{m^3 K}$ )	Difusividad Térmica $\alpha$ ( $\frac{m^2}{s}$ )
$T_i$ : 300	2320 (Caliza)	2.16	0.81	1.87	$1.15 * 10^{-6}$
$T_f$ : 631	2320 (Caliza)	2.16	1.04	-----	-----
$T_i$ : 300	700 (carbón- coque)	1.6	3.4	2.38	$0.67 * 10^{-6}$

### 2.2.6 Lecho empacado, caracterización teórica

Son varias las variables por las que se deben plantear para el diseño de un recuperador de lecho empacado o recuperador, se debe tener en cuenta el volumen, el diámetro, el tamaño, la superficie, la esfericidad y el volumen promedio de las partículas que estarán en el lecho, igualmente la fracción del espacio vacío, la velocidad de entrada del fluido (gases residuales) y por supuesto la números adimensionales.

#### 2.2.6.1 Esfericidad ( $\psi$ )

Debido a lo irregular de las partículas de caliza y coque, se debe realizar aproximaciones a formas regulares cercanas a esferas, esta forma influencia factores tales como superficie activa por unidad de volumen, permite el espacio vacío apropiado, caída de presión y los fenómenos de transporte en el lecho, facilita el diseño y construcción y reduce los costos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

A nivel práctico el factor  $\psi$  (adimensional) para diferentes formas y clases de partículas, se puede hallar en tablas de caracterización de minerales o en gráficos (Levenspiel, 1999); Bes (2006), presentan un factor de esfericidad para sólidos triturados entre 0.5 y 0.7, por tanto, para la caliza y el coque en este trabajo se toma el promedio de 0.6.

### 2.2.6.2 Volumen de caliza y coque ( $V_{caliza}$ , $V_{coque}$ )

$$V_{caliza} = \frac{m_{caliza}(kg)}{2320 \frac{kg}{m^3}} (m^3) \quad (18)$$

$$V_{coque} = \frac{m_{coque}(kg)}{600 \frac{kg}{m^3}} (m^3) \text{ (Se calcula en la fase experimental)} \quad (19)$$

### 2.2.6.3 Volumen promedio de partícula ( $V_{prom \ part}$ )

Como las  $n_p$  partículas de caliza y coque están alrededor de 1 cm de diámetro, se puede estimar su número, siendo por consiguiente la masa promedio de partícula ( $m_{prom \ part} = \frac{m}{n_p}$ ) y el  $V_{prom \ part}$  por la Ecuación 20:

$$V_{prom \ part} = \frac{m_{prom \ part}}{\rho} m^3 \quad (20)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

#### 2.2.6.4 Tamaño promedio de partícula ( $d_p$ )

Como las partículas no son uniformes, se asume para efectos de cálculo que son de igual diámetro, aunque esto puede afectar cálculos como el área real de transferencia, espacios vacíos, caída de presión, flujo de calor y otros. El tamaño de partícula ( $d_p$ ) es significativo, aparece en las ecuaciones de los lechos empacados y en varios números adimensionales como el Reynolds. Una manera para determinar el tamaño de partícula se realiza mediante clasificación por tamices.

#### 2.2.6.5 Área promedio de partícula ( $a_p$ )

El área promedio de partícula dado por la Ecuación 21:

$$a_p = \pi(d_p^2) \quad (21)$$

#### 2.2.6.6 Volumen del recuperador ( $V_{recup}$ )

El volumen del recuperador ( $V_{recup}$ ) se calcula por la Ecuación 22, conocido el diámetro interno del recuperador ( $d_t$ ) y su longitud ( $L_{recup}$ ):

$$V_r = \frac{\pi(d_t)^2 L_{recup}}{4} \quad (22)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

### 2.2.6.7 Relación de tubo-partícula

Otro factor importante a considerarse en el diseño, es la relación de la Ecuación 23 entre el diámetro interno del recuperador ( $d_t$  diámetro del lecho empacado) y el tamaño de partícula de la caliza ( $d_p$ ):

$$\text{Relación de tubo-partícula} = \frac{d_t}{d_p} \quad (23)$$

Una relación  $\left(\frac{d_t}{d_p}\right)$  muy baja o muy alta afecta factores como la porosidad y la caída de presión y a su vez la parte económica por los costos de los equipos de bombeo adicionales. Por tanto, es muy útil encontrar una relación de tubo apropiada y relacionada con otros parámetros, de manera que se produzca una caída de presión adecuada y un desempeño eficiente del recuperador. Una relación de tubo dada por la Inecuación 24 (Benyahia et al, 2005) está entre:

$$10 < \frac{d_t}{d_p} < 50 \quad (24)$$

### 2.2.6.8 Fracción de espacios vacíos ( $\epsilon$ )

Son los espacios libres o vacíos al interior del lecho. Este factor representa la porosidad del lecho empacado y es el espacio que ocupará el fluido o gas residual. Se asume que los

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

espacios vacíos son iguales y uniformemente distribuidos (Logtenberg y Dixon, 1998). Aun cuando una alta fracción de espacios vacíos es deseable, porque proporciona una mayor área superficial de transferencia de calor, este factor también influencia la caída de presión y la relación de tubo. La fracción de espacios vacíos ( $\varepsilon$ ) para partículas de forma irregular se puede calcular por la Ecuación 25, Bes (2006):

$$\varepsilon = \frac{\text{Volunen vacío}}{\text{Volumen recuperador}} = 1 - \frac{(V_{caliza})}{V_{recup}} \quad (25)$$

Para esferas y partículas cilíndricas la fracción de espacio vacío es mayor cerca a la pared del recuperador que al centro, y se extiende una longitud mayor a dos diámetros de partícula. Estas variaciones influyen en la distribución de velocidad de los gases residuales. Para la caliza se tiene una porosidad interna 1 a 4 % (Uzi. M, 2009) .

La fracción de espacios vacíos en un lecho de caliza está entre 0.3 y 0.5 y depende del tipo de empaque (regular, al azar, denso), forma, tamaño y distribución de partícula.

Benyahia et al, (2005), dedujeron la ecuación 26 para relacionar la fracción de espacios vacíos promedio, el factor de esfericidad y la relación de tubo.

$$\varepsilon = \left(0.504 + \frac{0.2024}{\psi}\right) + \frac{1.0814}{\left(\frac{d_t}{d_p} + 0.1226\right)^2} \quad (26)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Esta expresión matemática tiene un coeficiente de correlación de 0.95 con un error promedio de 5.20 %. Es válida para  $1.5 < \frac{d_t}{d_p} < 50$  y  $0.42 < \psi < 1$ .

### 2.2.6.9 Diámetro hidráulico ( $d_h$ )

Como los canales de flujo del aire entre las partículas del lecho empacado son irregulares se define un diámetro de flujo. Es un diámetro equivalente al total de canales vacíos o intersticios a través de los cuales circula el fluido (Tobis J. , 2000); además los canales se asumen que son paralelos. Usando este término se puede estudiar el flujo como si todo estuviera concentrado en una sola tubería cilíndrica sin obstáculos. La ecuación 27 define el diámetro hidráulico (Ontiveros, 2010)

$$d_h = \frac{2 \varepsilon \cdot \psi \cdot d_p}{3(1-\varepsilon)} \quad m \quad (27)$$

### 2.2.6.10 Caída de presión

Se produce una caída de presión a través del lecho empacado debido a que el flujo de los gases residuales ocurre a través de los espacios vacíos creados entre las partículas y estas en conjunto presentan una gran área superficial, lo cual frena su avance. Se considera que el espacio vacío es isotrópico, o sea, que sus propiedades no cambian con la dirección.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Para valorar la caída de presión teóricamente, existen en general dos maneras de abordar el problema. El modelo de Ergun basado en el diámetro hidráulico (Ergun, 1949) y el modelo de (Molerus et al, 1997) muy empleado en la literatura científica alemana.

El segundo modelo, en su forma más simple, corresponde a las Ecuaciones 28 y 29. Supone que al pasar el fluido sobre las partículas ( $n_{part}$ ) se genera una fuerza  $F_1$  de resistencia.

$$F_1 = \frac{\Delta p}{\Delta L} \frac{d_p^3}{(1 - \epsilon)} \quad (28)$$

$$n_{part} \cdot F = \Delta p \cdot A_{prom} \quad (29)$$

Donde

$\frac{\Delta p}{\Delta L}$ : Caída de presión a través del lecho relleno

$d_p$ : Tamaño promedio de partícula

$\epsilon$ : Fracción de espacios vacíos

$n_{part}$ : Número de partículas

$F_1$ : Fuerza de resistencia sobre cada partícula de área promedio  $A_{prom}$

$u_m$ : Velocidad del fluido

$\rho$ : Densidad del fluido

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

El modelo de Ergun (1949), supone que el espacio vacío del lecho consta de una serie de canales aproximadamente paralelos por los cuales circula el fluido y asume el diámetro hidráulico del lecho como dimensión característica. Presenta la caída de presión o pérdida friccional a través de un lecho relleno. Este ha sido y sigue siendo el método predominante en la mayoría de la literatura de lechos rellenos y de regeneradores, con algunos cambios en sus términos. La expresión original de Ergun está dada por la Ecuación 30:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu u_m(1-\varepsilon)^2}{\rho d_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75u_m^2(1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad (30)$$

El primer término corresponde a las pérdidas viscosas y el segundo a las pérdidas turbulentas. Debido a su uso extenso, la expresión ha sido revisada y discutida en varias ocasiones haciendo énfasis sobre todo en los coeficientes numéricos de 150 y 1,75. En general concuerda bien con los datos experimentales. (Zhang et al, 2002) Investigan y proponen valores para estos coeficientes de 203 en vez de 150 y de 1.95 en lugar de 1.75. Se supone estado transitorio en una dimensión y se trabaja con gases residuales de bajo y medio poder calorífico, haciendo énfasis en la caída de presión, la longitud del lecho empacado y la simulación térmica. En esa misma investigación, se considera partículas esféricas uniformes de alúmina como lecho relleno con densidad y el calor específico cercanos a los de la caliza es  $\rho = 2215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $c_p = 920 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ , para el coque se calcula en la fase experimental.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

. Los diámetros de partícula usados fueron 1.2, 1.6 y 2 cm, con  $\varepsilon$  variando desde 0.364 hasta 0.379. Se diseña una relación de tubo de  $\frac{d_t}{d_p} : 30$ .

Igualmente (Natarajan y Pitchand, 2009), hacen algunas modificaciones a la Ecuación de Ergun, para la caída de presión local de un fluido, a través de un regenerador con lecho de esferas por medio de la Ecuación 31:

$$\Delta P = \frac{G^2}{2\rho_1} \left\{ (1 + \sigma^2) \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) + f \left( \frac{A}{A_c} \frac{\rho_1}{\rho_m} \right) \right\} \quad (31)$$

El primer término del corchete se debe a la aceleración del flujo en el lecho relleno y el segundo a las pérdidas friccionales. Dónde el factor de fricción  $f$  y el  $Re$  están dados por las Ecuaciones 32 y 33:

$$f = 0.8506 Re^{-0.1507} \quad (32)$$

$$Re = G \cdot \frac{d_h}{\mu} \quad (33)$$

Donde:

A: Área de transferencia de calor

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

$d_h$ : Diámetro hidráulico

$Re$ : Número Reynolds

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido

$G$ : Flujo másico

$\rho$ : Densidad

En una investigación reciente de (Wilhelmsen, 2010), sobre un reformador calentado a gas para producir hidrógeno, utilizando como lecho empacado pellets esféricos catalíticos, se encuentra que la distribución óptima de las partículas en las condiciones particulares de este tipo de lecho, se logra, incrementando progresivamente el tamaño de partícula, desde la entrada del reformador hasta el final, para un tamaño de partícula de 2.2 cm.

(Jamialahmadi et al, 2005) Encuentran la Ecuación 34 para la caída de presión, que comparada con resultados experimentales da un margen de error del 5,8%, lo cual es aceptable.

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[ 4,4 + 94 \left( \frac{Re_i^{1,11}}{Re_g^{1,8}} \right) \right] 6 \frac{(1-\delta)}{d_p \delta^3} \rho_g u_{sg}^2 \quad (34)$$

Donde

$L$ : Longitud del recuperador

$d_p$  Diámetro de partícula

$\rho_g$ : Densidad del gas

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

$\delta$ : Porosidad

$u_{sg}$  : Velocidad superficial del gas en metros/segundo.

## 2.3 Estado del Arte

### 2.3.1 Modelos para los lechos empacados: medio poroso y geométrico

Para la parte experimental en lechos empacados se utilizan básicamente dos tipos de medios: geométrico y poroso. El propósito de esta investigación es la de combinar los dos medios, el medio geométrico es la caliza y el medio poroso el coque. Ambos modelos presentan similitudes en sus propiedades como turbulencia, caída de presión, transferencia de calor y masa entre otros.

#### 2.3.1.1 Medio poroso

Un medio poroso es un sólido con suficiente espacio vacío dentro o alrededor de las partículas, permitiendo internamente el movimiento de un fluido, los fenómenos de oposición al fluido, la resistencia térmica y la colocación de los poros tienen un papel relevante en el análisis de este medio, el tipo de estructura de los poros y su distribución media en el lecho afectan los parámetros de flujo y los fenómenos de transporte al interior de los poros (Hilal, 2008).

Muchas investigaciones para ambos medios se basan en correlacionar números Reynolds, conductividad térmica efectiva, tamaños promedio de partículas (en el caso del medio geométrico), permeabilidad, caídas de presión, factor de fricción o el efecto de los

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

espacios vacíos. Falta investigación en el efecto del número Prandtl y el coeficiente de transferencia de calor.

Hilal, (2008), investiga las características térmicas de los lechos empacados con un flujo constante de calor en esferas cerámicas de 0.287 m, utiliza como fluido aire, CO<sub>2</sub> o helio con números Reynolds entre 100 y 2500. El autor encontró que el flujo de transferencia de calor se incrementa a medida que el número Prandtl decrece, mientras que el factor de fricción es inverso a la variación de este número y al Reynolds; el número Nusselt es directamente proporcional al Prandtl y al Reynolds.

(Patiño y Figueroa , 2004), confirman que los números Nusselt y el coeficiente intersticial de transferencia de calor varían directamente con los Reynolds e inversamente con el factor de porosidad. Se minimiza la conducción de calor en la parte sólida de las partículas predominando la transferencia a través de los espacios vacíos. La investigación se realiza con no equilibrio térmico local. No analizan el efecto del número Biot en su investigación, lo cual daría bases para conocer si aplica o no la resistencia interna despreciable. Hallan la Ecuación 36 para el factor de fricción  $F$ :

$$F = 39,191 \left\{ \frac{(1 - \varepsilon)^{0,901}}{Re^{0,901}} \right\} \quad (36)$$

Donde:

$Re$ : Número Reynold,

$Pr$ : Número Prandtl

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

$Nu_{av}$ : Número Nusselt promedio.

$\varepsilon$  : Porosidad o espacios vacíos con relación al volumen total del recuperador.

La relación entre el diámetro del recuperador y el de las partículas esféricas usadas como lecho deben estar entre 8:1 a 10:1, Jamialahmadi et al (2005).

Hilal (2008), solo considera un tamaño de partícula, no tiene en cuenta el efecto de la variación de este parámetro. Tampoco considera el efecto del número Biot y hace su análisis por el método de las diferencias finitas en 2 dimensiones y no en 3, lo cual restringe el campo de su investigación. Además no especifica el tipo de material cerámico empleado.

Motato et al,(2007), usaron el método de la resistencia térmica despreciable y estado transitorio para un medio poroso. Proponen la Ecuación 37 para la distribución de temperatura transitoria en un regenerador de lecho poroso empacado, usando esferas y cilindros de acero bajo carbono, bajo el modelo de equilibrio térmico local (LTE). Estos autores solo consideran flujo unidimensional y en la realidad los lechos empacados evidencian flujo radial. Investigan dos geometrías, dos flujos gaseosos y dos tamaños de partículas de lecho empacado, esto limita su investigación. La temperatura de entrada de los gases residuales de 227°C es relativamente baja, pues en procesos industriales comunes la temperatura puede ser de 400°C o mayor. No considera flujo en las paredes y este es un factor que afecta el flujo general del regenerador. La Ecuación 37 propuesta por Motato et al (2007):

$$T(x, t) = T_{\infty} + (T_o - T_{\infty})e^{mx} + [T_i - [T_{\infty} + (T_o - T_{\infty})e^{mx}]]e^{\frac{h t}{\rho c d}} \quad (37)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Donde

$T(x,t)$ : Es la temperatura en el lecho en  $x$  (altura) y en  $t$  (tiempo) dados.

$T_{\infty}$ : Temperatura ambiente que rodea al cuerpo

$T_i$ : Temperatura inicial del cuerpo en  $t = 0$

$\rho$ : Densidad del cuerpo

$h$ : Coeficiente de convección

$d$ : Diámetro de partícula

### 2.3.1.2 Medio Geométrico

La presente investigación se centra en el estudio de un recuperador de calor de lecho empacado de caliza y carbón en medio geométrico y poroso, se emplean partículas de caliza y carbón que se aproximan a esferas en un recuperador, cuya función principal es el precalentamiento de la carga (caliza y carbón), aprovechando el gas residual de un horno vertical de calcinación de caliza, gas que sale del horno a temperaturas superiores a 500 °C. Es poco lo que ha investigado sobre el precalentamiento de la calcinación de la caliza Zheng et al,(2005).

La forma de transferencia de calor en un lecho empacado debe tener en cuenta la transferencia de calor por convección entre la pared y el fluido, entre el fluido y las partículas, la transferencia de calor por conducción entre la pared y las partículas, la transferencia de calor por radiación y la transferencia de calor mediante la mezcla del fluido. Un modelo teórico-experimental de transferencia de calor entre un lecho empacado y las paredes del lecho fue estudiado por (Ruiqing et a, 2013), determinaron

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

que la conducción de calor a través de la capa de penetración térmica, el tiempo de residencia, el tamaño, la porosidad de las partículas y la conductividad térmica del gas utilizado, afecta la transferencia de calor. Estos autores no consideran la velocidad de entrada del gas residual al lecho, lo cual restringe un tanto su investigación. El modelo mostró una buena predicción para determinar el coeficiente de transferencia de calor y ser aplicado en un diseño industrial.

El flujo de una mezcla de dos fases gas-sólido a través de un lecho empacado es importante para una serie de procesos industriales tales como la recuperación de calor y la filtración de los gases de combustión particulado, fabricación de hierro en los altos hornos, purificación de gas entre otros. A pesar de la importancia industrial, poco se ha reportado en la literatura. La cantidad limitada de trabajo de investigación se ha dirigido principalmente a la hidrodinámica macroscópica en términos de caída de presión y sólidos empacados a la temperatura ambiente (Yulong et al, 2008), estudiaron un método para determinar el coeficiente de convección de calor interno para el aire que fluye constantemente a través de un lecho empacado de partículas esféricas de vidrio de diferentes diámetros, encontraron que la distribución de la temperatura a lo largo del flujo de aire era casi lineal. Sólo consideraron partículas esféricas, lo que en la realidad no se cumple en los lechos empacados, pues están compuestos de partículas irregulares.

(Afandzadeh y Foumeny, 2001), estudiaron los factores y la forma de depositar unas esferas en un recuperador y el proceso de vibración, pero no tuvo en cuenta los mecanismos de transferencia de calor. Bahrami et al,(2004), estudiaron la modelación de lecho empacado de acuerdo con un arreglo básico cercano a una estructura cristalina de los átomos, llamada celda unitaria, asumiendo que las partículas tienen una forma cercana a una esfera, encuentra que la mayor transferencia de calor sucede en los

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

espacios vacíos, usando para ello esferas de acero inoxidable y encontró que el mejor desempeño se logra con una estructura cristalina cubica simple por su alta relación de espacio vacío-volumen, en este estudio se consideró la estrías de las partículas del lecho y los canales de flujo no uniformes. En la realidad los lechos empacados no se comportan como modelos regulares sino como una distribución de partículas al azar por tanto sus conclusiones son limitadas.

Logtenberg y Dixon,(1998), estudiaron 8 esferas en contacto y simulan un lecho empacado, observan la variación de los fenómenos de transporte de masa y energía, detectan la formación de remolinos y contraflujos entre las paredes y las esferas, determinaron que este fenómeno permite mayor transferencia de calor, pero debido al reducido número de esferas utilizadas sus investigaciones están limitadas, ya que los lechos empacados contienen un número mayor de partículas, igualmente determinó que la geometría empleada tiene gran influencia en los parámetros de operación de acuerdo con, Tobis (2000).

(Nijemeisland, 2001), empleó 44 esferas de una pulgada de diámetro, evitó el contacto de las esferas con la pared del recuperador y concluyo que las dimensiones de las esferas en un modelo computacional deben ser de menos del 1% que el modelo físico para facilitar la turbulencia y velocidad de flujo constante, confirmado por (Dixon and Nijemeisland, 2001). Igual que a los anteriores se le puede argumentar que un modelo de lecho empacado de 44 esferas es muy limitado y que en la realidad las partículas no son esféricas.

Petrov (2006) y (Nieto y Cardona, 2008), estudian el equilibrio térmico local (LTE) del lecho empacado, el cual conduce a una sola ecuación de energía en función de la temperatura

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

de los gases y de las partículas del lecho, este supuesto permite predecir que el gas transfiere rápidamente el calor a la caliza, alcanzando la temperatura del gas casi instantáneamente. Es de anotar que esta suposición no es completamente válida, porque en la realidad la transferencia de calor requiere un tiempo determinado para que se dé igual temperatura entre una partícula (Cheng and Specht, 2006), utilizaron el modelo de equilibrio térmico local (LTE) con resultados confiables, trabajaron con tamaños entre 2 y 5 cm, determinan que la conductividad térmica de la caliza esta entre  $0.55$  y  $0.85 \frac{W}{mk}$  y no varía con la temperatura, estos difieren con los de, Incropera et al (2011). Desafortunadamente no consideran partículas de caliza menores. En cuanto a la transferencia de calor, Adeyanju et al (2009), realizaron estudios teórico-experimentales, deducen que en los dos mejores modos de transferencia de calor en un lecho empacado es la conducción entre las partículas y la convección entre el fluido y el número adimensional Biot debe mantenerse la más bajo posible para que la resistencia térmica no se dominante.

Nieto y Cardona (2008), enunciaron que el uso de recuperadores de calor permite obtener un ahorro de energía mayores del 50% y Zhang et al (2002), informan que la eficiencia térmica aumenta entre 30 y 40% en el proceso. Por otra parte, todo sistema térmico con flujos másicos de gases residuales y temperaturas cercanas a los  $500^{\circ}C$ , debe implementar sistemas que permitan reutilizar este tipo de energía, ahorrando costos (Depto de Energía de Estados Unidos, 2010), en países como Sudáfrica, empresas con hornos rotatorios para producir cal y cemento, implementaron medidas tendientes a precalentar la caliza (DME, 2003).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Motato et al (2007), hallaron una función para la distribución de la temperatura unidireccional en estado transitorio en un regenerador térmico de lecho poroso empacado, consideraron que los elementos del lecho se comportan como cuerpos con resistencia térmica interna despreciable, resaltó la necesidad de tener estimaciones precisas de los parámetros de transferencia de calor tales como la conductividad térmica efectiva y los coeficientes de transferencia de calor por convección entre los gases que atraviesan el lecho, los elementos empacados y las paredes del lecho, para trabajos futuros recomendó considerar otros aspectos de fenomenología física de los lechos empacados que no tuvieron en cuenta, como la distribución radial de temperatura y las variaciones de las condiciones de flujo en las paredes. Se puede argumentar a Motato et al (2007), que el supuesto de la resistencia interna despreciable es válido solo para conductividades térmicas altas o tamaños de partículas pequeños, por tanto no siempre es válido para todo el lecho empacado en el caso de materiales con conductividades térmicas bajas.

Yulong et al, (2008), realizaron una revisión sobre la evolución de la hidrodinámica y la transferencia de calor en una mezcla de la fase gas-sólido que fluye en un lecho empacado, encontrando poca literatura sobre el tema, igualmente realizaron su propio experimento, análisis teórico y modelamiento numérico de la hidrodinámica del flujo, tanto a temperatura ambiente como a alta temperatura, analizaron el movimiento de los sólidos y desarrollaron una relación más genérica para la caída de presión y la transferencia de calor por convección, no obstante su investigación no responde a la pregunta sobre cuál debe ser el mecanismo que mejora la transferencia de calor en el lecho empacado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

(Shuiqing et al, 2006), realizaron una modelación de una mezcla de dos fases de gas-sólido fluyendo en un lecho empacado, los resultados se compararon con otras publicaciones sobre la hidrodinámica y el movimiento de los sólidos, el modelo poroso dio una mejor concordancia con los datos experimentales y una mejor predicción de la caída de presión que otros modelos.

(Harmmeet et al, 2010), realizan una revisión de los lechos empacados empleados para el aprovechamiento del calor almacenado, proveniente de energía solar, la revisión incluyó el diseño de los lechos, los materiales utilizados para el almacenamiento, las mejoras en la transferencia de calor, el fenómeno de flujo y la caída de presión, el estudio concluye que la mayoría de los trabajos encontrados se centran en rocas y piedras como material de embalaje, muy pocos estudios se han realizado con materiales de gran tamaño. La forma y tamaño de los materiales de embalaje y la fracción de vacío se consideran parámetros importantes que afectan al rendimiento del sistema. El objetivo de investigar materiales de gran tamaño es reducir la potencia del ventilador, el cual es utilizado para extraer el calor del lecho empacado proveniente de la energía solar.

(Anderson et al, 2014), estudiaron un recuperador de calor de 10' (pies) de altura y 2.25 pulg de diámetro, utilizaron un lecho empacado de esferas de alúmina alfa (corindón) de 6 mm de diámetro, el fluido utilizado fue aire, empleando dos velocidades, suponen un distribución radial de temperatura y calcularon la eficiencia de la Exergía con los datos experimentales, el modelo incluyen un coeficiente de transferencia de calor fluido-sólido optimizado, incorporaron las pérdidas de calor por convección natural en la pared exterior del recuperador, encontraron que las propiedades, como densidad, capacidad calorífica, viscosidad, conductividad térmica como función de la temperatura, deben ser consideradas en el modelo para predecir con precisión los datos experimentales, El

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

número de Biot lo evalúan bajo nuevas condiciones, para garantizar  $Bi < 0.1$  y así asegurar que la conducción sea lo suficientemente rápida para evitar gradientes de temperatura dentro de las esferas de Alúmina. La limitante de este experimento fueron las bajas temperaturas analizadas con un máximo de  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

(K. Ando et al , 2010), estudiaron las características de la transferencia de calor en un lecho empacado en medio poroso consolidado, los materiales utilizados fueron metales sintetizados, material cerámico y espuma cerámica, realizaron correlaciones y mediciones de los coeficientes de transferencia de calor en los intersticios de los materiales en flujo turbulento, encontrando una dependencia lineal entre el número de Reynolds y el número Nusselt, determinaron que el coeficiente de transferencia de calor volumétrico aumenta al disminuir el diámetro de los poros del medio, la entalpia está asociada a los pasajes secundarios del medio poroso y proporcionan un riguroso modelo matemático basado en la teoría del promedio volumétrico, con el objetivo de explicar la razón por la cual el exponente del número de Reynolds y el Nusselt es mayor en medios porosos consolidados que en los no consolidados, (ver figura 3).



**Figura 3.** Medio poroso consolidado. Fuente: (Ando et al, 2010)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

### 3. METODOLOGÍA

---

Este proyecto se enmarca dentro de un proceso de desarrollo tecnológico en el campo ingenieril con posibilidad de desarrollo investigativo.

- La fase inicial consistió en ampliar y actualizar el marco teórico y el estado del arte de la tesis de Maestría en Gestión Energética Industrial desarrollada por Efrén Giraldo, para ello se buscó información actualizada en las bases de datos proporcionadas por el ITM, se indago al ingeniero Efrén Giraldo sobre las mejoras que se le debían realizar al prototipo desarrollado por él.
- Se consultó información técnica al ingeniero Elkin Gómez, de la empresa Domicol S.A.S.
- Se solicitó asesoría sobre el material aislante para la cámara de calentamiento el cual fue suministrado por el ingeniero Luis Felipe Saldarriaga de la empresa Erecos.
- Se estudió y planificó el diseño del prototipo de recuperador de calor con material de lecho de caliza y carbón, este prototipo necesita una cámara de calentamiento, por lo que lo primero que se estudio fue el circuito resistivo, el material a utilizar para las resistencias, el aislante para el montaje de las resistencias y el diseño del flujo de aire, para garantizar un contacto directo entre el gas (aire) y las resistencias. Se encontró que el mejor material para las resistencias es el Kantal A1, debido a sus excelentes propiedades, este material es fabricado por la empresa KANTHAL en Hallstahammar, Suecia; el punto de venta y representación de esta marca se encuentra en Bogotá, el representante es Dicolnox Ltda.
- El siguiente paso fue la elección de los ladrillos aislantes que soportarán las resistencias y aislaran la cámara de calentamiento, el material seleccionado fue el

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	
		Versión	
		Fecha	

ladrillo refractario aislante UA-23, recomendaciones realizadas por el ingeniero Luis Felipe Saldarriaga de la empresa Erecos.

- El montaje de las resistencias se realizó de la siguiente forma: Se realizaron los cálculos para determinar la longitud necesaria de kanthal A1, después se diseñó un soporte especial para ubicar las resistencias de tal manera que el fluido de aire tuviera el mayor contacto directo con la superficie caliente de dichos resistores. El material con el que se fabricaran estos soportes, será el mismo con el que se diseñó las paredes del horno de calentamiento, ladrillo refractario aislante UA-23, ya que posee características físicas y químicas que garantizan una resistencia mecánica y rigidez suficiente como para recomendarlo en el desarrollo de este proyecto.
- Para el diseño del sistema de control y análisis térmico de las resistencias, se utilizaron y aplicaron los conocimientos adquiridos durante el proceso de formación en la academia; entre ellos se pueden nombrar: transferencia de calor, control automático, instrumentación industrial, electricidad, electrónica; entre otros.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 4.1 Rediseño del recuperador de calor en todo su conjunto

En este capítulo se presenta el rediseño de un prototipo de recuperador de calor para la industria de la cal. El rediseño se realiza con base en el prototipo diseñado para la tesis de maestría llamado “desarrollo de un de recuperador de calor de lecho empacado de caliza para el proceso de calcinación” realizado por el Ingeniero Efrén Giraldo en 2010 y que se encuentra ubicado en el laboratorio de fluidos del Instituto Tecnológico Metropolitano. Este diseño presentó diferentes problemas como: perdidas de calor por conducción en las paredes del horno, perdidas de presión del aire por filtraciones en la cámara de calentamiento y en el recuperador, debido a esto la cámara de calentamiento presenta bajas presiones que no fue posible medirlas; el prototipo en sí no posee un sistema de control para estabilizar la temperatura al nivel necesitado, ni un soporte estructural donde se pueda ubicar, manipular y trasladar de lugar. Este proyecto hace parte de la tesis de maestría titulada “ Desarrollo de un prototipo de recuperador de calor residual de lecho empacado de caliza y carbón” del estudiante Ing. Oscar Castaño.

El rediseño se realiza para optar al título de Ingeniero electromecánico del Instituto Tecnológico Metropolitano. A continuación se definen las características de un recuperador de calor residual, se establecen los componentes principales, dimensiones,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

función, materiales, además los equipos de medición y control del proceso de calentamiento.

Un recuperador de calor residual, básicamente es un ducto que almacena algún tipo de material particulado, en este caso “caliza y carbón”, el cual permite la circulación del fluido caliente por los espacios vacíos, transfiriendo parte de su calor al material particulado, el objetivo es que este material particulado sea depositado como una nueva carga al horno vertical a una temperatura mayor que la temperatura ambiente, lo que genera un incremento en la eficiencia energética, disminuyendo costos de producción por disminución en el consumo de combustible y una reducción en los tiempos de la calcinación de la caliza; mitigando el efecto invernadero producido por los gases de combustión y disminución de la contaminación térmica, ya que el recuperador absorbe parte del calor de la chimenea del horno vertical, filtrando el material particulado producto de la combustión y arrojando posteriormente gases más limpios a menor temperatura al medio ambiente.

Para realizar las pruebas a nivel de laboratorio, los gases residuales producto de la combustión serán simulados por medio de una cámara de calentamiento; la cámara diseñada consistirá en un horno eléctrico por el cual se harán pasar diferentes caudales de aire forzado a través de las resistencias eléctricas hasta alcanzar una temperatura cercana a los 545°C, que es la temperatura aproximada de los gases de combustión en la chimenea de un horno vertical de caliza y carbón.

Para garantizar mínimas pérdidas de calor por las paredes del horno y del recuperador, además evitar las fugas de aire caliente (545 °C) que se vienen presentando en el prototipo actual, se ha seleccionado como material un bloque refractario aislante “con referencia UA-23” comercializado por la empresa Erecos; este ladrillo posee adecuadas

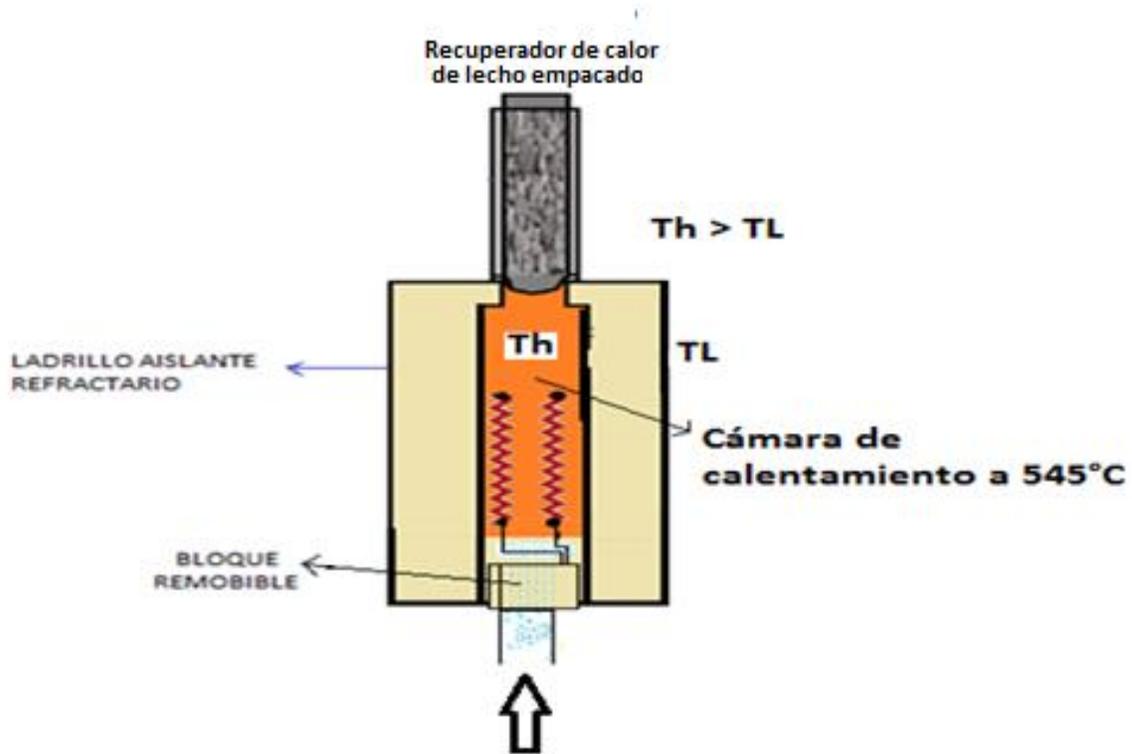
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

condiciones térmicas de aislamiento (Ver Tabla 2), además es liviano, su conductividad térmica es baja y muy resistente a la compresión lo cual lo hace ideal para la construcción de las paredes aislantes además sirve de columna vertebral en toda la estructura. Si bien el material aislante utilizado en el prototipo anterior fue manta cerámica con conductividad térmica  $K = 0.2 \frac{kW}{m K}$ , para este proyecto se escogió el ladrillo refractario porque corrige las pérdidas de presión que se venían produciendo en el prototipo anterior ya que este material es compacto, además para garantizar un buen sellado se recubrirán las paredes internas del horno con una capa de cemento aerofrax, producto suministrado por la empresa Erecos el cual fue recomendado para tal fin (Ver Tabla 3). La conductividad térmica del ladrillo es  $K = 0.2 \frac{kW}{m K}$ , lo cual indica un aislamiento similar a la manta cerámica, esto garantiza que los materiales silico-aluminosos también son una excelente opción como aislamiento térmico, con la ventaja de poder manipularse directamente sin guantes u otra vestimenta especial.

#### 4.1.1 Cámara de calentamiento

La cámara de calentamiento consiste en un recinto construido de material aislante, con un espesor de pared suficiente para evitar pérdidas de calor por conducción, así como también fugas de aire provenientes del ventilador, ver figura 4.

Donde  $T_h$  es la temperatura en el interior de la cámara de calentamiento y  $T_L$  es la temperatura ambiente

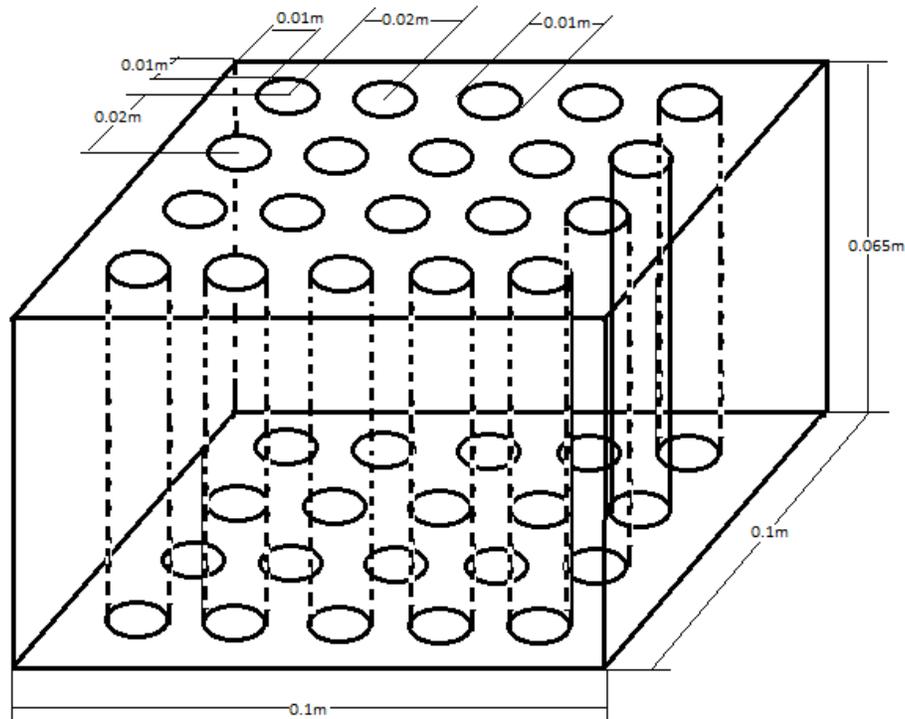


**Figura 4.** Cámara de calentamiento con ladrillo refractario y recuperador de calor.

Fuente: Elaboración propia

En la cámara de calentamiento se alojará el conjunto de resistencias eléctricas, diseñadas especialmente para calentar el aire que ingresará por la parte inferior y que es suministrado por el ventilador a temperatura ambiente, para luego ser calentado elevando su temperatura hasta 545°C aproximadamente. Para garantizar que el fluido se caliente uniformemente, se diseñó un soporte especial el cual permitirá que el aire ingrese por unos canales en los cuales estarán alojadas las resistencias (Ver Figura 5), de esta manera todo el caudal de aire entrará en contacto directo con las resistencia creando

una gran turbulencia, la cual garantizará una mezcla homogénea y se evitaran puntos calientes dentro de la cámara.

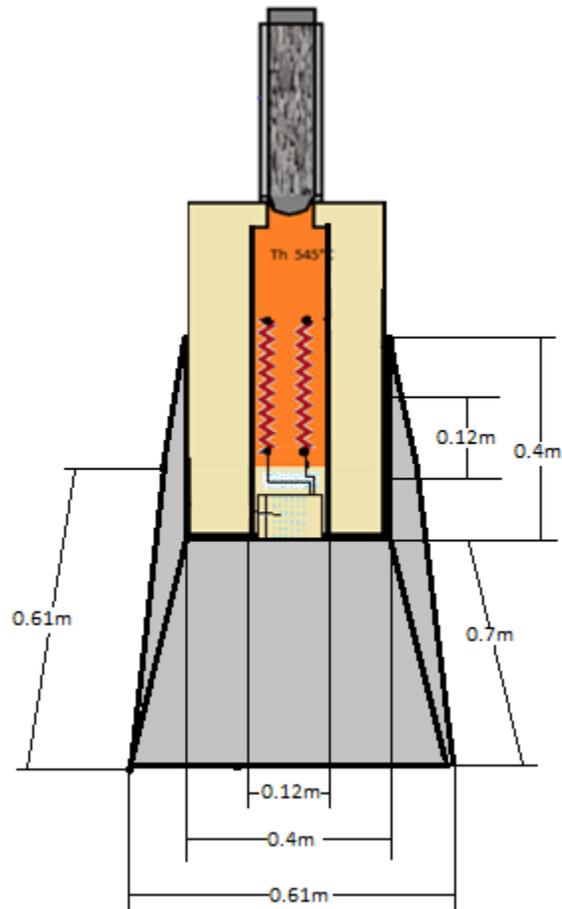


**Figura 5.** Soporte para la resistencia. Fuente: Elaboración propia

En la parte superior de la cámara se acoplará el recuperador de calor, que consiste en dos tubos, uno fijo de acero inoxidable que se mantendrá conectado firmemente a la cámara de calentamiento y otro móvil que irá introducido dentro del tubo fijo; en el tubo móvil estará alojado el lecho empacado con caliza y carbón, a través de este fluirá el aire caliente proveniente de la cámara de calentamiento y gran parte de la energía térmica de este fluido será absorbida por dichas partículas. La cámara de calentamiento estará empotrada en una estructura metálica, diseñada especialmente para soportar el peso completo del sistema (Ver Figura 6), en ella se alojarán todos los circuitos eléctricos y el

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

tablero de control, permitiendo el desplazamiento del recuperador de calor a cualquier destino.



**Figura 6.** Estructura de soporte metálica. Fuente: Elaboración propia

La cámara de calentamiento se construirá con ladrillo refractario aislante UA-23, la composición de este bloque hace que sea muy estable y resistente a las altas temperaturas, en el interior se alojarán las resistencias antes mencionadas para el calentamiento del aire que proviene del ventilador.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	
		Versión	
		Fecha	

Esta cámara será de sección transversal cuadrada sellada por todas sus caras con mortero aerofrax; en la parte superior estará ubicada la tapa de la cámara, esta se construirá en el mismo material de las paredes con las siguientes medidas (0.23 x 0.23) m, llevará un orificio de 0.1 m de diámetro en su centro, a través del cual se acoplará el recuperador de calor.

Las medidas externas de la cámara en cada lado son (0.23 x 0.41) m; Las medidas internas de la cámara en cada lado son (0.1 x 0.345) m. La parte inferior será el lugar por el cual se introducirán las resistencias e ingresará el aire del ventilador. Este espacio se diseñó con el fin de permitir de manera fácil, rápida y económica el cambio de las resistencias debido a cualquier eventualidad o al deterioro de las mismas. Por el orificio inferior además se introducirá un bloque de material UA-23 con el fin de sellar y aislar totalmente la cámara de calentamiento; las medidas de este bloque cuadrado son (0.1 x 0.1) m con una altura de 0.065m; a través de este bloque se acoplará el conducto de aire y será el lugar por donde ingresen las conexiones eléctricas hacia las resistencias.

La ecuación 38 permite calcular las pérdidas de calor a través de una pared plana. Es la **Ley de Fourier de la conducción del calor**:

$$\dot{Q}_{conducción} = K * A \left( \frac{T_1 - T_2}{\Delta X} \right), \text{ en Watts.} \quad (38)$$

Condiciones iniciales:

Temperatura interna del horno= 545°C Temperatura en las paredes internas

Temperatura externa de pared = 25°C Temperatura ambiente

Conductividad térmica del ladrillo UA-23, a 545°C  $K = 0.274 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot \text{K}}$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Las medidas de las paredes internas que estarán en contacto directo con las resistencias al interior de la cámara son (0.1 x 0.28) m, con espesor de pared de (0.065) m.

Los cálculos para determinar las pérdidas de calor por conducción del interior de la cámara hacia afuera, se pueden ver en el (apéndice A)

Ecuación 38 en forma diferencial  $\dot{Q} = KA \frac{dT}{dx}$  (38)

Pérdidas totales de las paredes de la cámara: **267.5 W**

Se sabe que la potencia total por las dos resistencias es de **3600W**

Potencia disponible para recuperar en el lecho empacado: **3600 – 267.5 = 3332.5W**

#### 4.1.2 Ladrillos refractarios aislantes

Este tipo de ladrillo aislante permite que el calor generado en la cámara de calentamiento sea retenido al interior (sistema adiabático), y a su vez su temperatura sea estable, con excelente resistencia al ataque de álcali. La micro estructura única produce un ladrillo aislante con buena resistencia de choque térmico en relación con el ladrillo refractario denso. Los ladrillos aislantes son ergonómicos, de poco peso, con un alto porcentaje de burbujas de aire aislantes dispersas uniformemente por todo el ladrillo. Como resultado, conducen menos calor dentro de un horno o estufa que los otros aislantes más pesados. (RATH, 2014). Sus propiedades químicas y físicas permiten cumplir con los requisitos más variados de forma óptima, (Schemin, 2014).

- baja conductividad térmica

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

- alta resistencia a la compresión en frío
- Contenido de CaO extremadamente bajo para atmósferas ricas en sulfuros y cloruros de hidrógeno
- resistencia al CO
- buena resistencia al choque térmico
- resistencia a la deformación por altas temperaturas

#### 4.1.2.1 Usos

- Se emplea como aislante térmico para el forro o revestimiento de hornos de uso cerámico eléctricos o a gas.
- Aislamiento de respaldo en células electrolíticas de aluminio.
- Forro de hornos de afición.
- El aislamiento de respaldo para el alto horno.
- Forros para hornos de carburizado.
- Forro de hornos de forja.
- Revestimiento externo de hornos que cuecen carbón.
- Para forrar cualquier horno con el fin de evitar pérdida de calor.
- Para unir ladrillos aislantes, se recomienda usar una mezcla especial tipo cemento, llamada “mortero”, Schemin (2014)

El radio crítico expresa el concepto, que el radio externo del aislante para una tubería cilíndrica debe ser mayor a cierto valor ( $r_{cr}$ ). Si se cumple lo anterior, la transferencia de

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

calor disminuye cuando aumenta la capa de aislante. Y si no, ocurre lo contrario, o sea que en vez de aislar, antes extrae calor de la tubería, Cengel y Ghajar (2011), El radio crítico está definido por la relación entre  $k$  y  $h$  según la Ecuación 39.

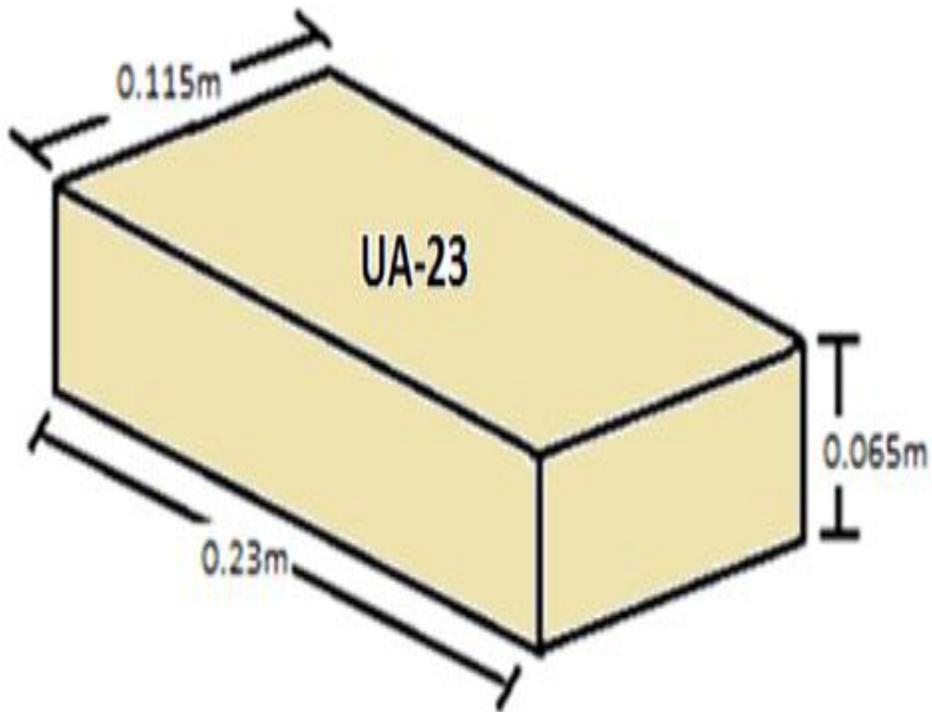
En el caso de la fibra de cerámica y el aire como aislantes, con un  $k$  promedio 0.2 para la manta cerámica y 5 para el aire en reposo, el radio crítico está definido por la (ecuación 39).

$$r_{cr} = \frac{k}{h} = \frac{0,2}{5} = 0,04 \text{ m} = 4 \text{ cm} \quad (39)$$

Para este diseño se utilizará ladrillo aislante refractario UA-23, ( ver tabla 2); comercializado por la empresa Erecos, se seleccionó principalmente por su facilidad para hallarlo en el mercado, además por poseer características físicas y químicas que garantizan un excelente aislamiento térmico, ya que su coeficiente conductivo es de  $0.274 \frac{^{\circ}\text{C.kcal}}{\text{m.hr.K}}$ , a una temperatura de  $545^{\circ}\text{C}$ , además de su buena resistencia a la compresión  $(130-30) \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ , lo que lo hace ideal para construir la estructura como aislante y soporte para el horno y el recuperador. En una visita realizada a la empresa Erecos en Julio de 2014, garantizaron que el bloque refractario con las características antes mencionadas, tenía el espesor de pared suficiente (6.5 cm) para aislar una temperatura cercana a los  $1000^{\circ}\text{C}$  al interior de la cámara de calentamiento, característica que supera

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

por mucho la temperatura a la que se incrementaría el aire en la cámara de calentamiento, (ver figura 7).



**Figura 7.** Ladrillo refractario aislante UA-23. Fuente: Elaboración propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

**Tabla 2.** Especificaciones técnicas del ladrillo UA-23. Fuente: (Erecos, 2014)

<b>Clasificación</b> <b>NTC -815, ASTM C-155</b>	<b>Aislante Grupo 23</b>
Análisis Químico %	
$Al_2O_3$	36.0
$SiO_2$	59.0
$Fe_2O_3$	1.0
$TiO_2$	1.0
$CaO$	0.3
$MgO$	0.4
Alcalisis	1.8
Cono pirométrico equivalente (PCE)	32
Temperatura equivalente °C	1717
Porosidad aparente %	70.0 – 74.0
Densidad volumétrica $\frac{g}{cm^3}$	0.63 – 0.73
Resistencia a la compresión en frío. Mpa ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	1.0 – 3.0 (10- 30)
Conductividad térmica a temp media $\frac{°C.kcal}{m.hr.K}$ a temperatura de 545 °C	0.274

#### 4.1.3 Mortero

Es un tipo especial de cemento compuesto principalmente por un alto porcentaje de óxido de aluminio y óxido de silicio y en menor porcentaje óxidos de (hierro, titanio, calcio, magnesio) y alcalisis. Para unir los ladrillos refractarios, la empresa Erecos sugirió a través del ingeniero Luis Felipe Saldarriaga la utilización de mortero tipo aerofrax, (ver tabla 3), el cual posee características similares al ladrillo UA-23 y está diseñado precisamente para

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	
		Versión	
		Fecha	

unir estos bloques, además de utilizarse como capa protectora y selladora al interior de la cámara de calentamiento, para evitar las fugas de aire que se presentan en el prototipo de Giraldo.

**Tabla 3.** Especificaciones aerofrax, morteros refractarios silico aluminosos. Fuente: (Erecos, 2014)

<b>Clasificación:</b>	altamente refractario
NTC – 765, NTC – 851	High Duty
<b>Análisis Químico %</b>	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.6
SiO <sub>2</sub>	61.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6
TiO <sub>2</sub>	1.6
CaO	0.4
MgO	0.2
Alcalisis	2.5
<b>Cono Pirométrico Equivalente</b>	
(PCE)	29
Temperatura equivalente °C	1659
NTC – 706, ASTM C – 24	1629
Refractariedad	1500

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

#### 4.1.4 Resistencia eléctrica.

La resistencia eléctrica es una propiedad que tienen los materiales de oponerse al paso de la corriente. Los conductores tienen baja resistencia eléctrica, mientras que en los aisladores este valor es alto. La resistencia eléctrica se mide en Ohm ( $\Omega$ ) (Física Práctica, 2014).

La resistencia de un material es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su sección. Se calcula multiplicando un valor llamado coeficiente de resistividad (diferente en cada tipo de material) por la longitud del mismo y dividiéndolo por su sección (área). (Ecuación 40).

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (40)$$

Dónde:

$\rho$  = Coeficiente de resistividad del material

$l$  = Longitud del conductor

$s$  = Sección del conductor

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Para este diseño se utilizarán resistencias de alambre en espiral tipo kanthal A1, es una aleación de hierro-cromo-aluminio ferrítico (FeCrAl aleación) para su uso a temperaturas de hasta 1400 ° C (2550 ° F). La aleación se caracteriza por una alta resistividad y muy buena resistencia a la oxidación. (Ver tabla 4).

**Tabla 4.** Propiedades físicas y mecánicas de kanthal a-1 con diámetro de 1mm. (Kanthal, 2014)

Temperatura Max de operación continua	1400°C
Composición nominal %: Cr	22
Al	5.8
Fe	Balance
Ni	----
Densidad $g/cm^3$	7.1
Resistividad a 20°C $\Omega mm^2/m$	1.45
Conductividad térmica a 50°C W/mK	11
Calor específico a 20°C $kJ/KgK$	0.46
Punto de fusión °C	1500
Resistencia a la tracción $N/mm^2$	680
Punto de fluencia $N/mm^2$	545
Elongación a la ruptura %	20
Diámetro en mm	1.0
Resistencia a 20°C $\Omega/m$	1.85
Área de la sección transversal	0.785

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Las aplicaciones típicas para Kanthal A-1 se dan principalmente en elementos calefactores eléctricos para hornos industriales (Kanthal, 2014).

El Kanthal A-1 es un metal especialmente diseñado para ser usado en resistencias eléctricas por sus propiedades físico-químicas: Alto valor de  $\Omega$  /m; resistente a las altas temperaturas (1400°C) y gran duración en ambientes agresivos, etc. Se fabrican en forma de hilo a partir de 1 mm de diámetro y también como platinas de grandes dimensiones. Esta clase de resistencia es de calentamiento instantáneo y permite que sea manipulada y moldeada según el diseño del soporte donde va a estar ubicada. Ver tablas 4 y 5 con propiedades físicas y químicas (HINRASAC, 2014).

#### 4.1.5 Cálculo de la resistencia

Para calcular la cantidad de hilo resistivo en este diseño, fue necesario conocer la potencia total requerida en W. Por lo tanto para este proyecto se calculó a través de pruebas experimentales, que la potencia necesaria para obtener una temperatura estable de 545°C era de 3600 W, aproximadamente.

Dentro de la cámara se ubicarán dos resistencias de 1800 W cada una; conectadas eléctricamente en paralelo; esta decisión se toma debido a que la longitud del alambre resistivo para una sola resistencia es demasiado largo y no será práctico acomodarlo en un solo soporte debido a las dimensiones internas de la cámara de calentamiento. Por tal razón se construirán dos soportes para las resistencias, (ver figura 5). Estos soportes con las resistencias ya incorporadas, irán ubicados uno encima del otro, utilizando como separador entre ellas una estructura construida con el mismo ladrillo refractario permitiendo un acople preciso entre los dos soportes , (ver figura 9).

La alimentación eléctrica de la red eléctrica será de 220 V.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Por ley de Ohm:

$$V = I * R \quad (41)$$

Dónde:

V: voltaje

I: corriente

R: resistencia

Además:

$$P = I * V \quad (42)$$

Dónde:

P: Potencia

De la (ecuación 42), se tiene:

$$I = \frac{P}{V} \quad (43)$$

Reemplazando valores

$$I = \frac{1800}{220}$$

Corriente necesaria para cada resistencia:  $I = 8.2 \text{ amperios}$ ,

Para conocer la resistencia se aplica la ley de Ohm. De la (ecuación 41), se tiene:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

$$R = \frac{V}{I} \quad (44)$$

Remplazando valores:

$$R = \frac{220}{8.2}; \quad R = 26.8 \, \Omega$$

Información obtenida a partir de los cálculos:

- Voltaje de alimentación: 220 *v*
- Corriente para cada resistencia: 8.2 *A*
- Resistencia en ohmios para cada hilo resistivo: 26.8  $\Omega$

Para el hilo resistivo tipo kanthal A-1, la cantidad de ohmios por metro lineal con un diámetro de hilo de 1mm es de:  $1.85 \frac{\Omega}{m}$ . (Ver Tabla 5)

**Tabla 5.** Propiedades físicas Kanthal A-1. Fuente: Kanthal (2012)

Diámetro $\varnothing$ mm	Resistencia a 20°C $\Omega$ /m	Área superficial $\text{cm}^2/\text{m}$	Longitud m/Kg	Peso g/m	Resistividad $\text{cm}^2/\Omega$
1	1.84	31.42	179.3	5.58	17.0.2

Los metros lineales necesarios para 26.8  $\Omega$  son: 14.5 *m* de hilo resistivo, ver los cálculos en el (Apéndice B).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Es importante saber que la carga superficial o el consumo máximo en  $W$  para este tipo de hilo resistivo, no es un elemento crítico. El fabricante (Kanthal, 2012), entrega un rango de tolerancia a la carga muy amplio que oscila entre  $2 - 25 \frac{W}{cm^2}$ .

La tabla 5 muestra que para kanthal A-1, con diámetro de 1mm el área superficial es:

$$31.42 \frac{cm^2}{m}$$

Para determinar el área superficial en  $cm^2$  de cada hilo resistivo de 1800W, se multiplica la longitud del alambre por el área superficial de cada metro:

$$14.5m * 31.42 \frac{cm^2}{m} = 456cm^2 \text{ Para cada resistencia.}$$

Con la potencia y el área de cada resistencia se puede calcular la carga superficial o potencia utilizada. (Ecuación 45).

$$\frac{1800W}{456cm^2} = 3.94 \frac{W}{cm^2} \quad (45)$$

Este valor indica que la carga superficial se encuentra dentro del rango de tolerancia indicado por la empresa kanthal.

#### 4.1.6 Soporte para las resistencias.

Es el lugar donde irán ubicadas las resistencias eléctricas; la estructura para este diseño será tipo bóveda, las características mínimas que deben tener son: alta resistencia a la temperatura, material no conductor de electricidad y manipulable.

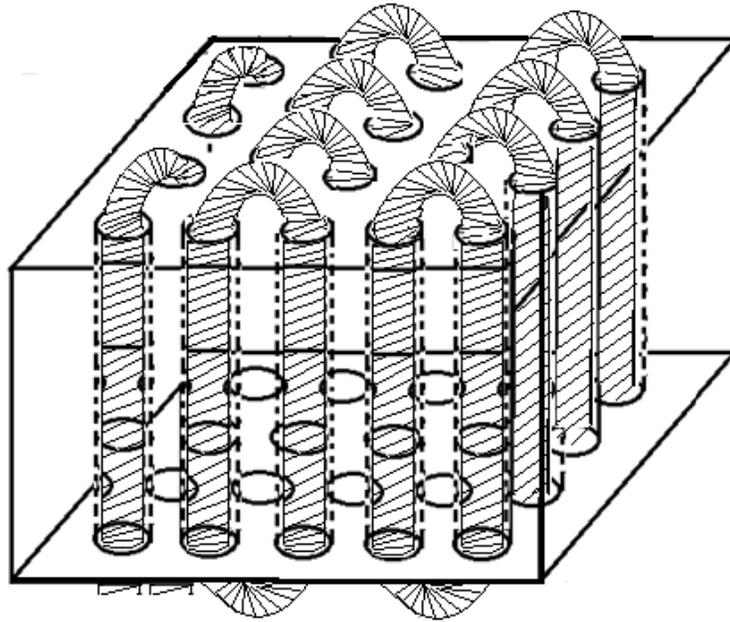
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

- El soporte en el que se instalaran las resistencias será en ladrillo refractario aislante UA-23, (ver tabla 2), con especificaciones tencas UA-23.
- El ladrillo UA-23 por fábrica tiene las siguientes medidas:  
  
0.23 m de largo, 0.115 m de ancho y 0.065 m de espesor.

El soporte debe encajar en la bóveda de la cámara de calentamiento; para lo cual deberá ser cuadrado (0.1 m) de lado y una altura de 0.065m. Para construir dicho soporte se escogió el ladrillo UA-23 por su facilidad para ser cortado y perforado, sin que se afecte su resistencia o propiedad aislante. . En el ladrillo se deben realizar 20 orificios de 0.01 m de diámetro por donde se insertará la resistencia, además serán los lugares por donde circulará el aire que viene del ventilador centrífugo con el fin de calentarlo hasta alcanzar los 545°C necesarios. (Ver figura 5).

#### **4.1.7 Resistencias acopladas en el soporte**

(La figura 8) muestra una imagen de las resistencias introducidas en los orificios del soporte diseñados precisamente para estas.

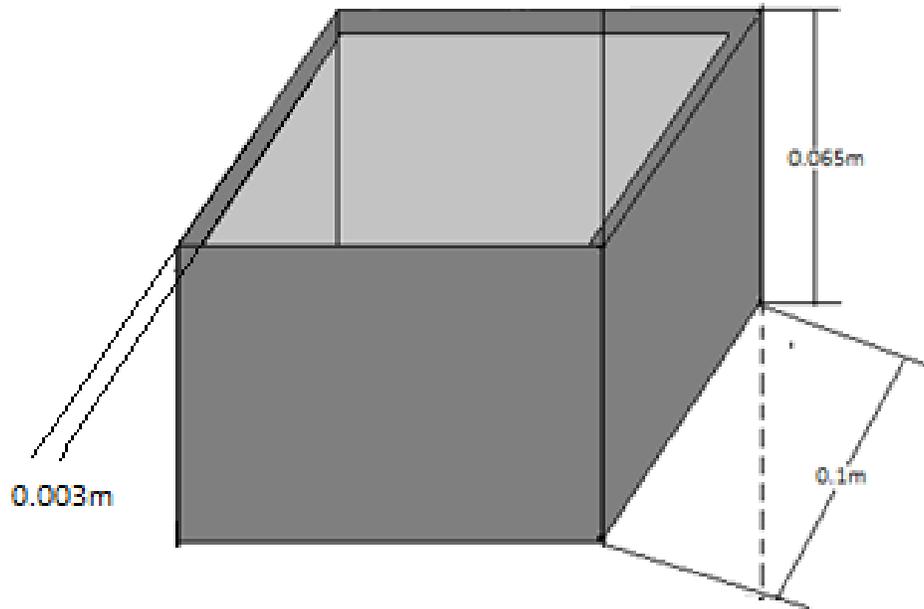


**Figura 8.** Montaje de la resistencia eléctrica. Fuente: diseño propio

#### 4.1.8 Soporte separador de las resistencias

Para separar las resistencias y evitar que entren en contacto unas con otras y hagan un corto circuito, se diseña un separador en material UA-23. Las medidas se pueden ver en la (Figura 9). Además en el centro de este separador se empalmaran las resistencias con el cable que trae la corriente de la red.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	



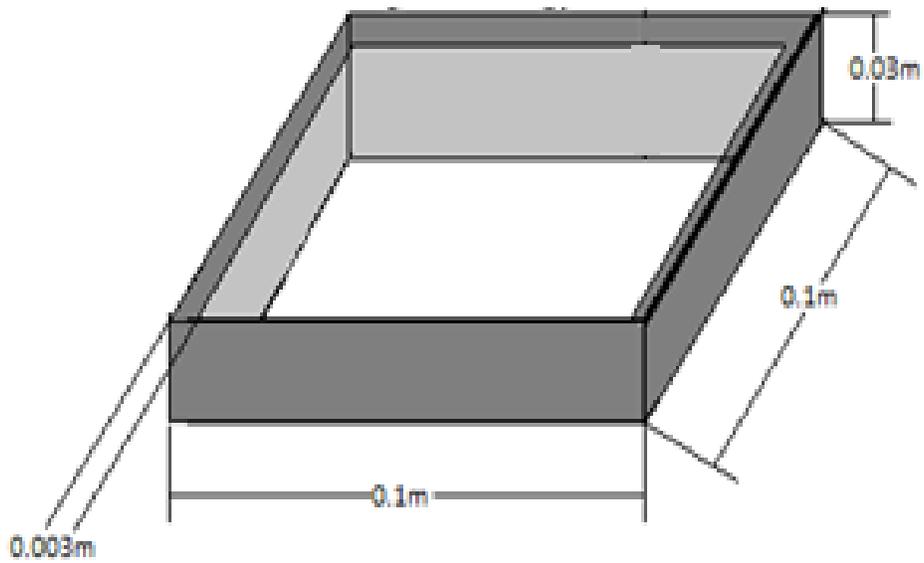
**Figura 9.** Soporte separador de resistencias. Fuente: Elaboración propia

#### **4.1.9 Soporte separador entre la tapa inferior de la cámara de calentamiento y las resistencias.**

Este soporte se incorpora en el diseño con el fin de separar la tapa inferior por la cual ingresará el aire del ventilador y las conexiones eléctricas de la red con el conjunto de resistencias antes mencionado, además servirá de precámara para que el aire se distribuya por todos los orificios donde se encuentra ubicado el primer soporte con las resistencias y fluya libremente hacia el separador de las resistencias, a una temperatura elevada, para luego volver a introducirse en el segundo soporte con las resistencias y elevar aún más la temperatura hasta alcanzar los 545 °C necesarios para simular la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

temperatura de los gases de una chimenea en un horno vertical. (Ver figura 10), con las medidas.



**Figura 10.** Soporte separador entre la tapa de la cámara de calentamiento y el primer soporte con las resistencias. Fuente: Elaboración propia

4.1.10 Ensamble bloque de resistencias en la cámara de calentamiento (Ver Figura 11)

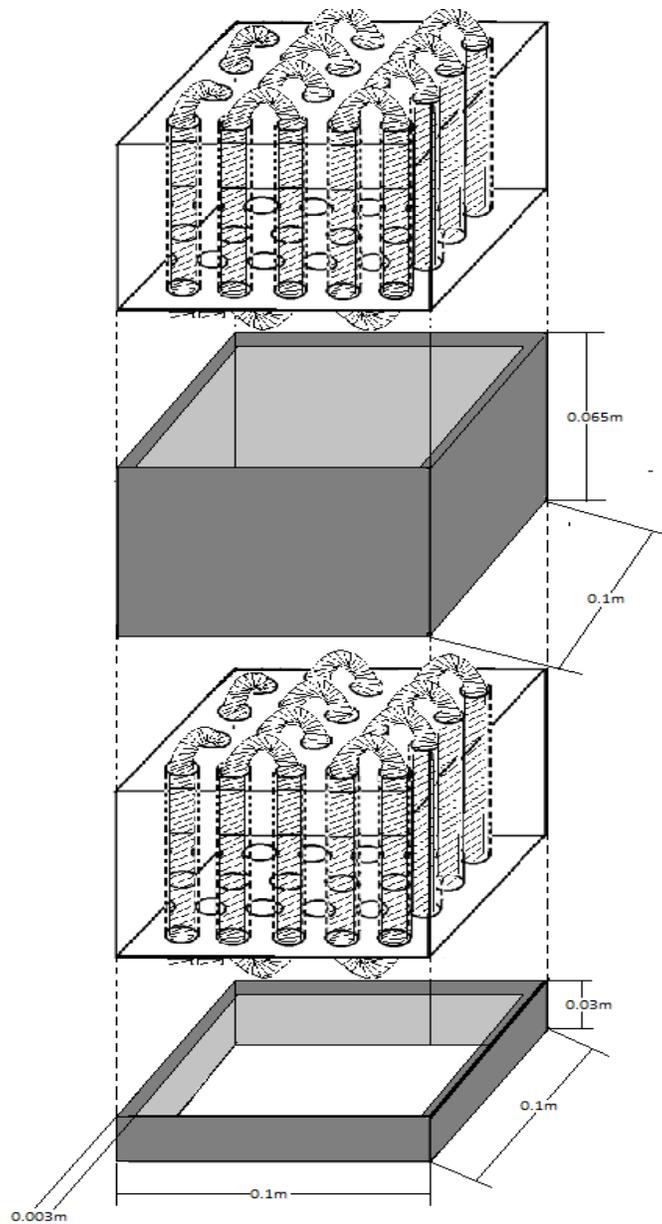


Figura 11. Ensamble de las resistencias y los separadores. Fuente: Elaboración propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

#### **4.1.11 Diseño del recuperador de calor de lecho empacado**

Está constituido por dos tubos en acero inoxidable, Un tubo fijo y otro que se desplaza a través del primero por su interior, con el objetivo de realizar fácilmente un cambio de carga (caliza - carbón). (Figura 12)

El material con el cual están construidos los tubos es en acero inoxidable al cromo níquel 18-8: tiene un 0,18 % de C, un 18 % de Cr y un 8 % de Ni, tiene una resistencia mecánica de 60 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 175-200 Hb, Es un acero inoxidable muy utilizado porque tiene alta resistencia al flujo de calor.

##### **4.1.11.1 Cálculos para el recuperador de calor de lecho empacado**

El recuperador de calor rediseñado es un dispositivo relativamente simple, consta de un tramo de un ducto cilíndrico en acero inoxidable cromo níquel 18-8 para alta temperatura, este permite una mayor comodidad en su construcción y es una forma comúnmente utilizada en la industria debido a la facilidad de descarga de su contenido. Al ducto será cargado con un sólido triturado como caliza y coque, este material será sostenido por una rejilla metálica en la parte inferior, de tal forma que el sólido permita el ingreso de un fluido caliente (gas residual) forzado, desarrollándose un intercambio de calor desde el fluido hasta el sólido por los intersticios o espacios vacíos del triturado y el fluido entra en un régimen turbulento, favoreciendo la transferencia de calor por convección eficientemente, debido al aumento del coeficiente convectivo (Varahasamy et al, 1996), fenómeno que permite diseñar sistemas de recuperación de calor de menor tamaño.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Para el rediseño del recuperador de calor se deben tener en cuenta factores como el diámetro interior del ducto, el diámetro de las partículas del sólido y la esfericidad, Bes (2006), presentan un factor de esfericidad para sólidos triturados entre 0.5 a 0.7, por practicidad se tomara como 0.6. Todos estos factores afectan la caída de presión y la porosidad.

El punto de partida para este diseño es el tamaño de partícula, se utilizaran dos tamaños de 0.01 y 0.015 m y un diámetro interior de tubo de 0.096 m, y se adoptará la relación de  $4 < \frac{d_T}{d_p} < 20$  propuesta por autores como (Mejía, 2004) y Motato et al (2007). Lo que permite determinar que la relación  $\frac{d_T}{d_p}$  se encuentra entre 6.4 y 9.6, que es lo recomendado por los autores mencionados (ver cálculos ecuaciones 46 y 47, Apéndice C)

Para la altura del recuperador autores como Mejía (2004), recomiendan relaciones cercanas de  $d_T$  vs *Altura de recupareador* de 1 a 2, Motato et al (2007), una relación de 1 a 4, relaciones mayores a 4 presentan una alta caída de presión debido la gran distancia que debe recorrer el fluido en el ducto, lo que no es recomendable, ya que la transferencia de calor retardaría el proceso lo que no recomendable.

Para este proyecto se adopta una relación intermedia de diámetro de tubería vs Altura del recuperador la cual será de 2.6 (ver cálculos en Apéndice D), lo que daría una altura de 0.25 m, con esta altura intentamos mejorar el descenso en la caída de presión del prototipo actual.

Este dato permite determinar el volumen del recuperador. (Ver ecuación 49 y cálculos en Apéndice E).

$$V_r = 0.001809 \text{ m}^3$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

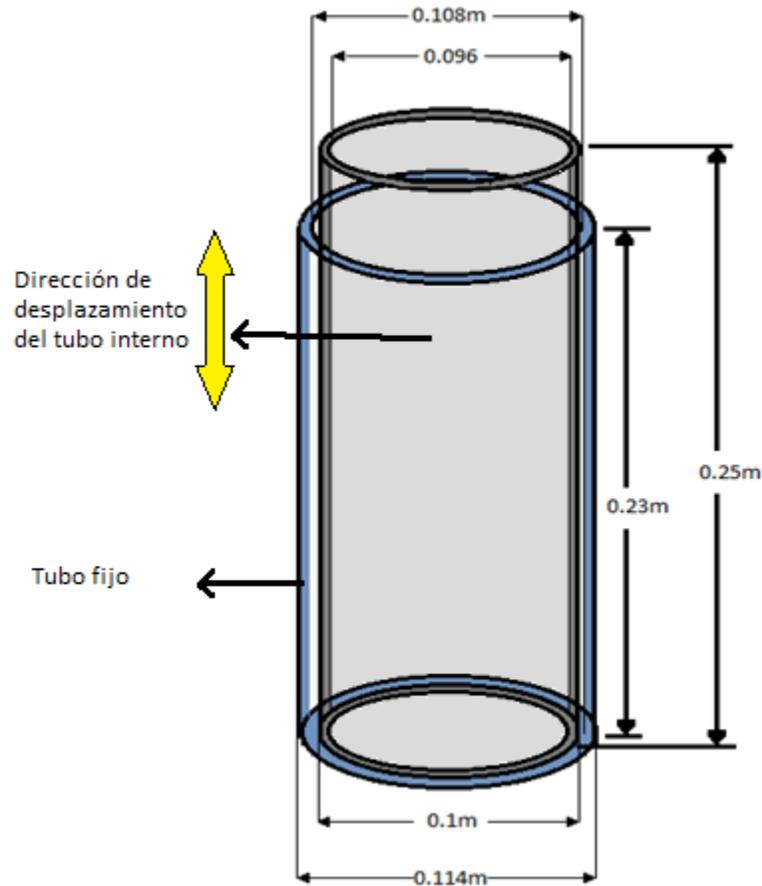
Capacidad másica de caliza y coque en el recuperador, se calcula de la siguiente forma: (Ecuación 50).

$$m = \text{densidad} * \text{volumen} \quad (50)$$

$$m = 2320 \frac{kg}{m^3} * 0.001809 m^3$$

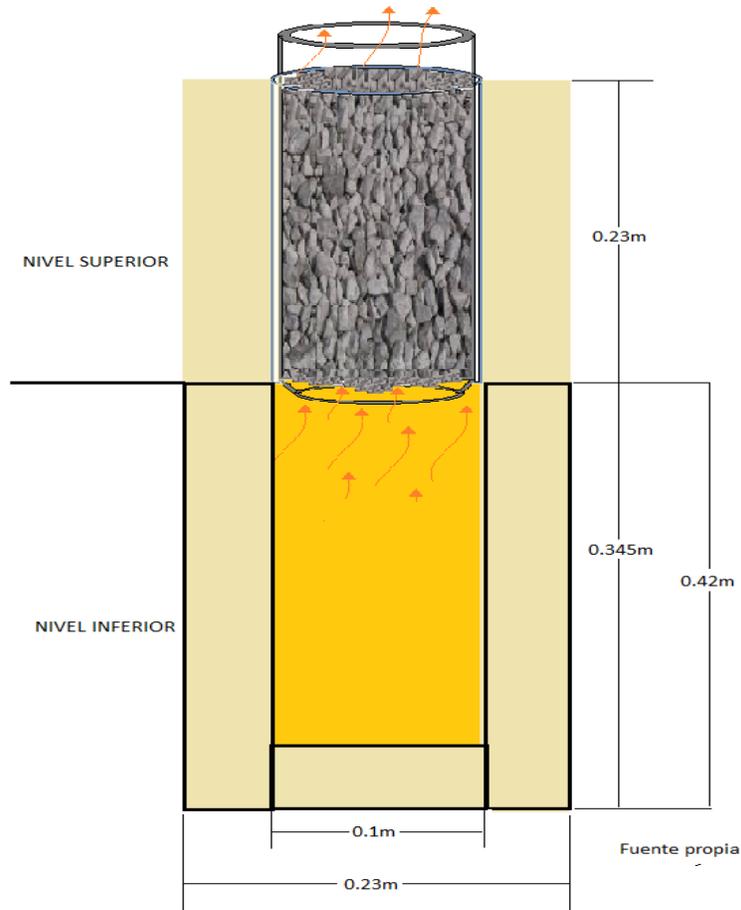
$$m = 4.19 kg$$

Característica	Unidades	Valor
$V_{recup}$	$m^3$	0.001809
$\psi$	-	0,60
$V_{caliza \text{ y coque}}$	$m^3$	Etapa experimental
$m_{caliza \text{ y coque}}$	kg	Etapa experimental
$n_p$	-	Etapa experimental
$m_{prom \text{ part}}$	kg	Etapa experimental
$V_{prom \text{ part}}$	$m^3$	Etapa experimental
$a_p$	$m^2$	Etapa experimental
$L_{recup}$	$m$	0,25
$\varepsilon$	-	Etapa experimental
$d_t$	$m$	0,096
$d_t/d_p$	-	6.4 a 9.6
$h_v$	$\frac{kW}{m^3 K}$	8,57
$Bi$	-	<0.1
$Re$	-	>4000



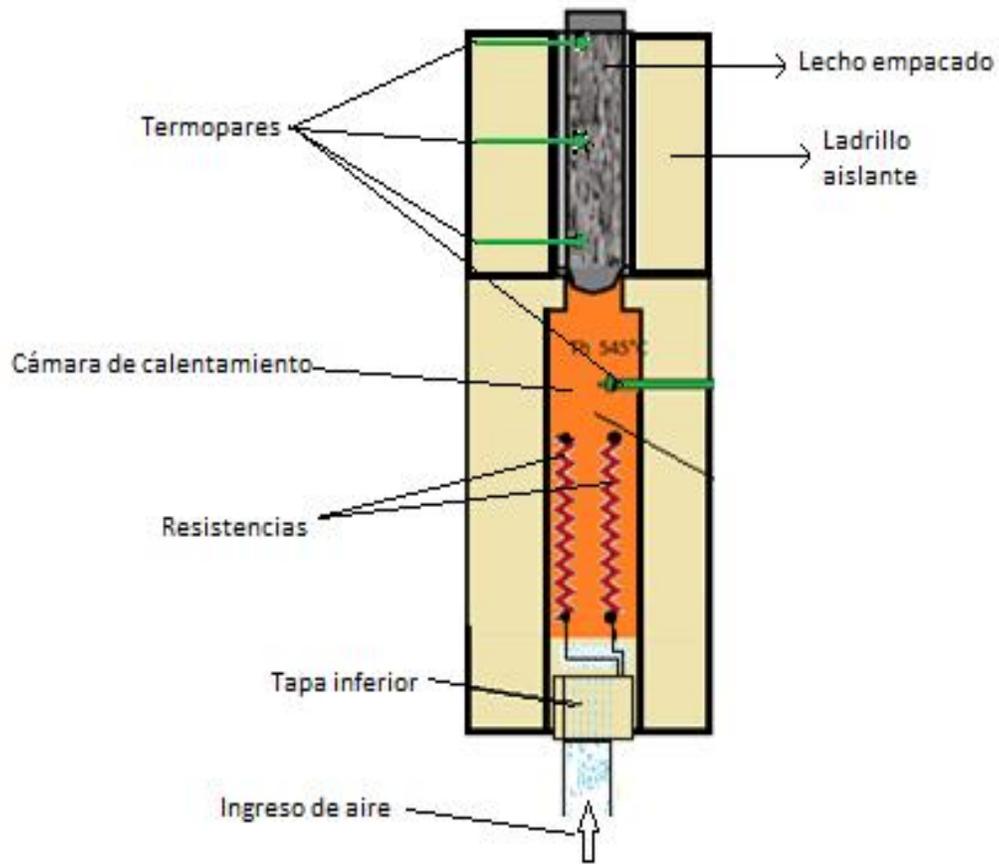
**Figura 12.** Tubos de acero inoxidable. Fuente: Elaboración propia

La capa y material de aislamiento utilizado para aislar el recuperador de calor, será el mismo que el utilizado en el horno (ladrillo UA-23). Por lo que se extenderá la construcción de las paredes que cubre el horno en forma vertical hasta la altura del recuperador de calor. (Ver figura 13)



**Figura 13.** Boquilla de acople y ladrillo aislante. Fuente: Elaboración propia

En el recuperador estarán ubicados los sensores (Termopares tipo K), la ubicación se determinará en el proceso experimental con el fin de hallar las alturas necesarias para leer la información de la forma más conveniente, segura y certera posible. (Ver figura 14)



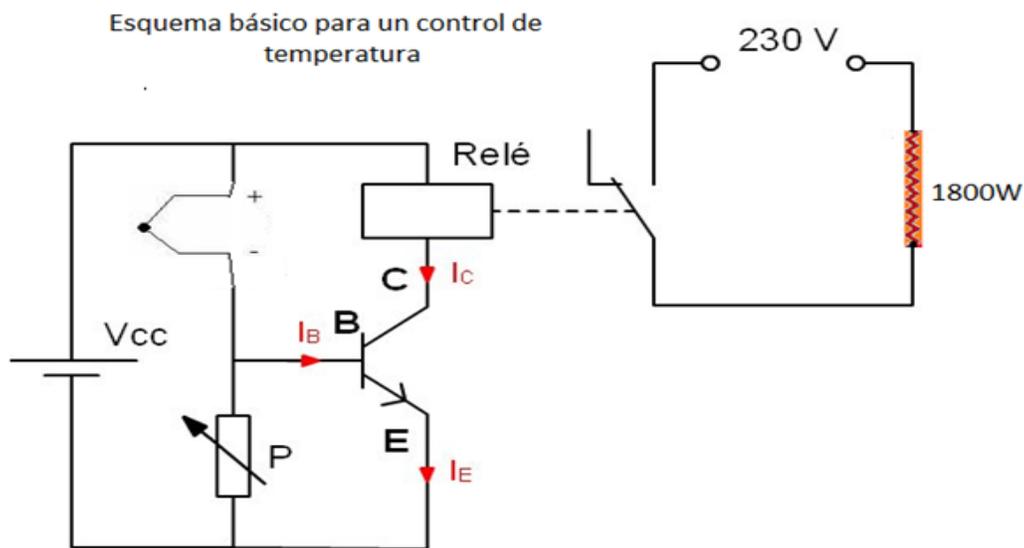
**Figura 14.** Esquema del horno de calentamiento y el recuperador de calor. Fuente: Elaboración propia

Por practicidad para realizar los experimentos, se recomienda tener preparado varios tubos con el material que servirá como lecho empacado, para realizar recambios de la carga en las diferentes etapas de las pruebas.

#### 4.2 SISTEMA DE CONTROL Y REGULACION:

Para controlar y regular la temperatura se utilizara un sistema de control.

##### 4.2.1 Control de temperatura (Ver Figura 15).



**Figura 15.** Esquema de un control de temperatura estándar. Fuente: (Antonio B, 2014)

Estos dispositivos posee diferentes tipos de entrada: Termocuplas J, K, S, E, pt-100, CU50. Poseen varios modos de control: ON-OFF, FUZZY, PID. Poseen una o varias salidas por relé. Los rangos de temperatura capaces de controlar dependen del tipo de sensor utilizado. Para mantener una temperatura estable de 545 °C, se deberá acondicionar un controlador

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

digital de temperatura, el cual garantice una temperatura mínima y máxima (540 a 550 °C).

#### 4.2.2 Elemento sensor

Es una Termocupla tipo j diseñada para trabajar en procesos industriales con temperaturas inferiores a 750°C, viene con una funda protectora de acero inoxidable y el elemento sensor se encuentra encapsulado en un cilindro de acero inoxidable. Para este trabajo se va a utilizar un termopar tipo j (resiste hasta 1000°C) para controlar la temperatura en el interior del horno y tres termopares tipo K (resiste hasta 1400°C) para medir el incremento de la temperatura en el lecho empacado a través del tiempo; se opta por utilizar termopar tipo K debido a que en los laboratorios del Instituto Tecnológico Metropolitano, se cuenta con termómetros digitales con conexión a termopar tipo K, los cuales registran la temperatura y guardan la información del proceso para luego descargarla a un PC y posteriormente analizar los resultados(Ver Figura 16).



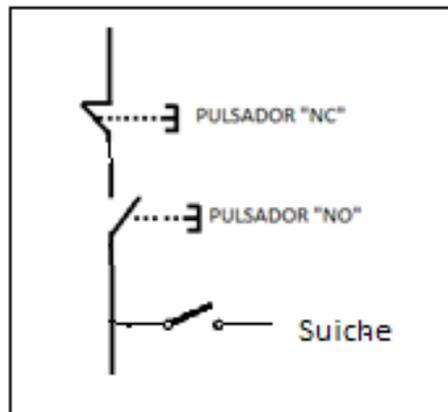
**Figura 16.** Esquema básico de un termopar. Fuente: (Arpisa, 2014)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

#### 4.2.3 Elementos para controlar el encendido y apagado del equipo diseñado

**4.2.3.1 Pulsadores “NO y NC”:** el pulsador “NO”, es un pulsador de encendido normalmente abierto; el pulsador “NC”, es un pulsador de apagado normalmente cerrado, (Ver Figura 17). Estos dos tipos de pulsadores se utilizan cuando se desea hacer una autorretención en un circuito eléctrico. Para este diseño se utilizarán los dos y un relé.

**4.2.3.2 Suiche ON-OFF:** Suiche de encendido o apagado a través de una perilla. En este diseño se utilizará para encender el ventilador centrífugo. Figura 17.

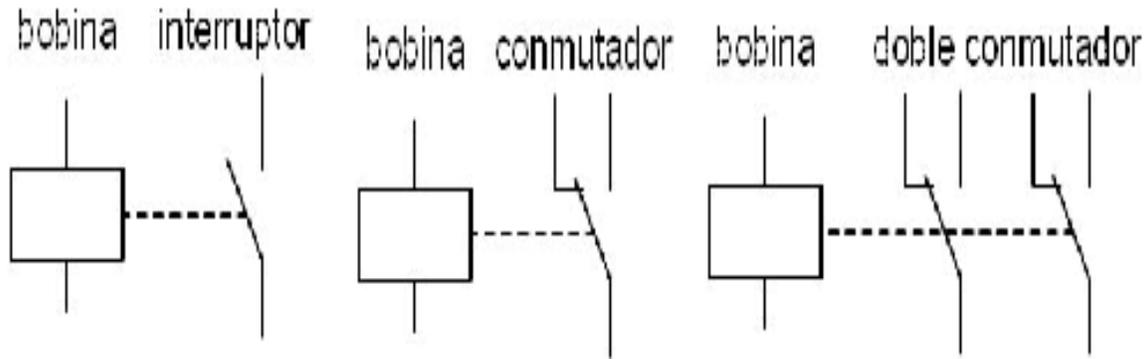


**Figura 17.** Esquema eléctrico de un pulsador normalmente cerrado, normalmente abierto y un Suiche de perilla. Fuente: Elaboración propia.

**4.2.4 Relé:** es un dispositivo electromecánico, el cual a través de una bobina acciona varios contactos que permiten abrir o cerrar varios circuitos eléctricos. Para este diseño se

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

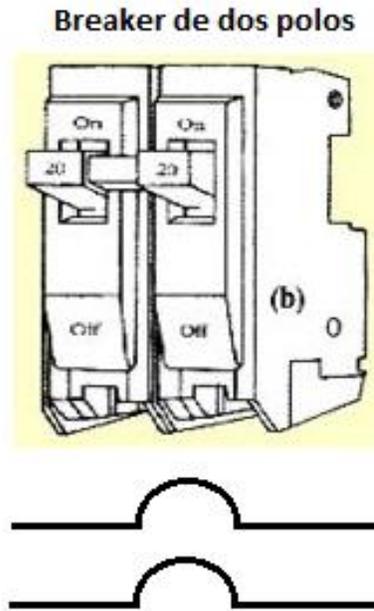
utilizará el modelo MK3P1, viene para un voltaje de bobina de 220 voltios y posee tres contactos para accionar tres circuitos. (Ver Figura 18).



**Figura 18.** Esquema eléctrico de un relé con interrupción y doble conmutación, Fuente: (Antonio B, 2014)

#### 4.2.5 Elementos de protección y potencia

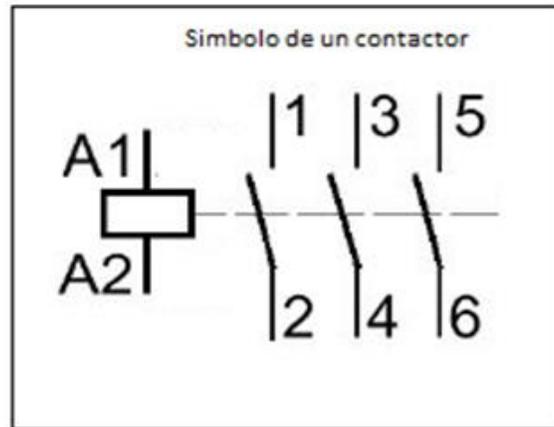
Se utilizarán dos protecciones tipo breakers de 30 amperios cada uno, con el fin de abrir el circuito y desconectarlo de la red eléctrica principal en caso de un eventual corto circuito, protegiendo los componentes eléctricos y electrónicos del diseño. (Ver Figura 19).



**Figura 19.** Esquema de breakers. Fuente: Elaboración propia.

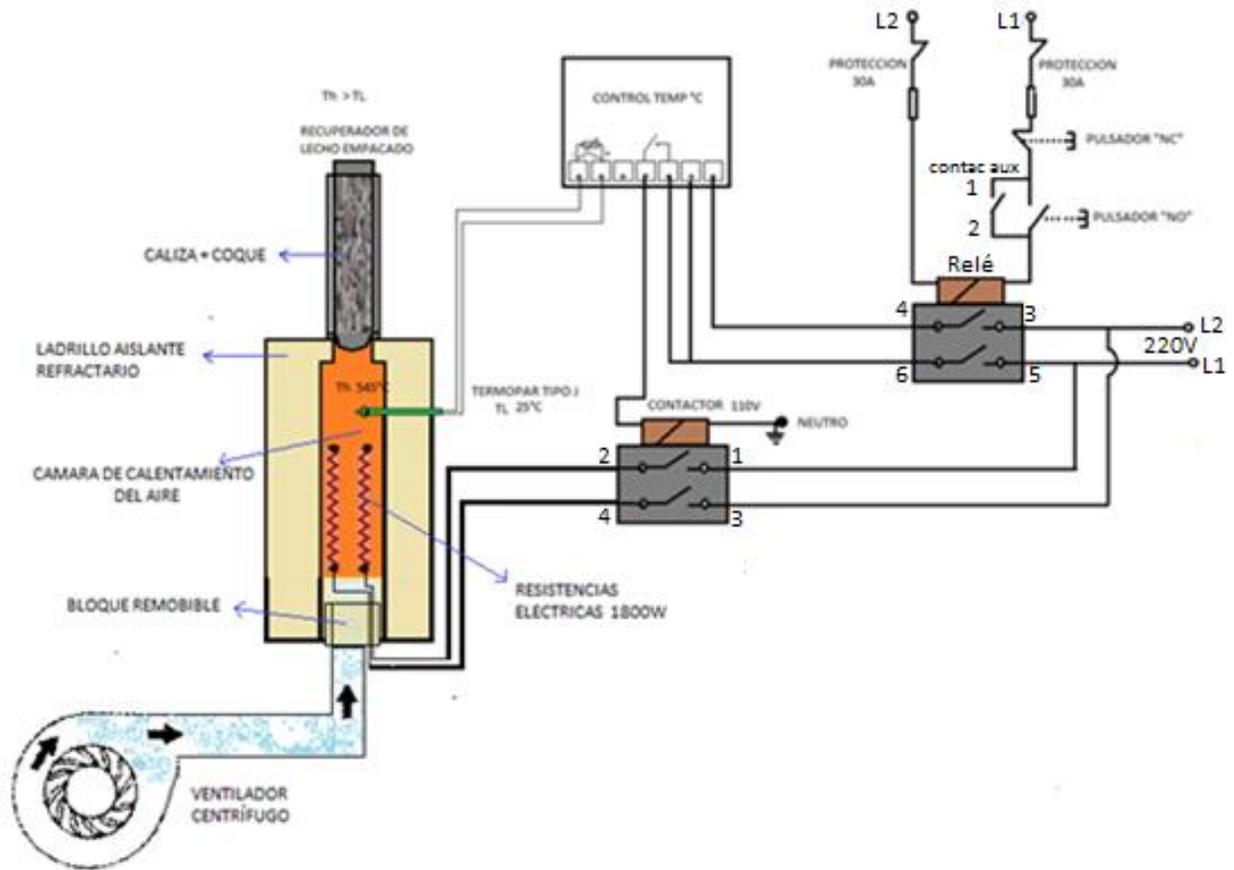
**4.2.6 Contactor:** es un dispositivo electromecánico, cuya función es interrumpir o establecer el paso de corriente hacia una carga; se caracteriza por tener la capacidad de accionar componentes o cargas con consumo de alto amperaje. (Ver Figura 20). Para este diseño el amperaje máximo que se manejará es de 20 amperios.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	



**Figura 20.** Símbolo de un contactor trifásico. Fuente: Elaboración propia

En la figura 21 se puede apreciar el esquema de conexión donde se pueden identificar claramente todos los componentes eléctricos y electrónicos necesarios para hacer un control de temperatura de la cámara de calentamiento confiable y seguro.



**Figura 21.** Esquema completo del recuperador de calor y su sistema de control de temperatura. Fuente: Elaboración propia

A continuación se explica paso a paso el proceso de conexión y funcionamiento del circuito de control:

- Se deben identificar las líneas de entrada de corriente de la red eléctrica, que son L1, L2 y un neutro. Los voltajes medidos con un multímetro deberán indicar que la tensión entre L1 y L2 debe ser de 220V y los voltajes medidos entre L1 y neutro deber ser 110V, lo mismo deberá marcar el voltaje medido entre L2 y neutro el

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

cual deberá de ser 110V. Ya teniendo identificadas claramente las líneas de corriente, se puede ver en la figura 16 que L1 y L2 ingresan a los bornes 1 y 3 del contactor, pero además también ingresan a los bornes 3 y 5 del relé; estos bornes se conectan a contactos normalmente abiertos, los cuales permanecerán abiertos o en estado de reposo hasta que una acción de control los haga cambiar de estado, esta acción se puede dar porque se accione el pulsador normalmente abierto o porque el control de temperatura envíe una señal al contactor para que este cierre sus contactos, dando como resultado la conexión eléctrica de las resistencias. Teniendo claro estos aspectos se procede a explicar el funcionamiento del sistema eléctrico.

- En la Figura 21 se puede apreciar el sistema en estado de reposo; al momento de oprimir el pulsador normalmente abierto, se cierra el circuito y la señal entra a la bobina del relé en el cual suceden dos acciones simultáneamente, la primera es que se cierra instantáneamente el contacto abierto (1-2) circulando constantemente la corriente de L1 directamente a la bobina del relé, esto genera una autorretención la cual permite que se pueda soltar el pulsador normalmente abierto y el circuito continúe activo o energizado, la segunda acción que también se da, es que se cierran instantáneamente los contactos abiertos del relé (3-4 y 5-6), encendiendo el control de temperatura; a partir de este momento todo el sistema está en su fase activa y funciona automáticamente, controlado al 100% por el control de temperatura.

Para este proyecto se consultaron diferentes opciones para controlar la temperatura del horno entre ellas un PLC, un control de temperatura análogo y control de temperatura digital. El PLC es un equipo que cumple con todas las necesidades, está diseñado para trabajo industrial, es confiable, se puede programar y modificar sus funciones las veces

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

que sea necesario, además puede controlar muchas variables al mismo tiempo. Sin embargo para este proyecto como solo se deben controlar dos variables que son la temperatura y la velocidad del ventilador, se decide no utilizar este dispositivo primero porque es costoso y requiere una programación interna que para este proyecto no se tenía planeada y segundo por mucho se estaría desperdiciando más del 80% del potencial de control de este equipo, lo cual se manifestaría en un desperdicio de dinero y tiempo; el control de temperatura análogo se descartó por limitación en la precisión de la temperatura, ya que posee un margen de error muy grande en el modo de activar el contacto para encender las resistencias; al final se seleccionó el control de temperatura digital, porque cumplía con las necesidades básicas del sistema, es pequeño, económico, preciso, confiable y puede programarse para controlar diferentes niveles de temperatura de una manera rápida, además de poseer entradas para diferentes tipos de termopares (J, K, S, E, pt-100, CU50).

Continuando con la explicación del funcionamiento del proceso, se explicó que todo el sistema quedaba controlado totalmente por el control de temperatura, este equipo se programa para activar un contacto abierto que posee internamente el cual se cierra y envía una señal eléctrica a otro dispositivo; la activación de este contacto depende de la temperatura a la que se programe o (set point) del dispositivo. Sin embargo se necesita que un elemento sensor, (en este caso el termopar tipo J) cense la temperatura en el interior del horno y envíe una señal entre la temperatura mínima y máxima de la variable controlada (temperatura), el controlador procesará esa lectura y de acuerdo a lo configurado en él, entregará a su salida una señal también (para este caso 1 - 0) para que la variable controlada sea igual al set point (temperatura deseada).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

La salida que entrega el controlador de temperatura, la recibe el contactor y activando una bobina interna acciona los contactos normalmente abierto, permitiendo el paso de la corriente directamente de la red (L1 y L2). Para detener todo el proceso se dispone de un pulsador normalmente cerrado, el cual al presionarlo interrumpe el paso de corriente al relé y la autorretención desaparece apagando todo el sistema eléctrico. En caso de un fallo en el sistema por corto circuito en uno de sus componentes, se cuenta con dos fusibles tipo breakers de 30 amperios, los cuales aislarán todo el circuito eléctrico de la red externa.

El control del ventilador depende de un Suiche el cual se podrá encender o apagar según la necesidad en las pruebas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## 5. AGENDA DE INVESTIGACIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

---

### 5.1 Principales mejoras en el diseño

El diseño propuesto en este proyecto, mejorará notablemente los problemas que se presentaron en el trabajo de Tesis de Maestría en Gestión Energética Industrial realizado por Efrén Giraldo en 2010. A continuación se nombrarán las principales mejoras en el diseño del recuperador de calor de lecho empacado caliza y coque.

- Reducción de las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes. Se elige bloque aislante refractario compacto, liviano, manipulable, que garantiza un excelente aislamiento térmico, con coeficiente de conductividad térmico muy bajo (es  $K = 0.274 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot \text{K}}$  )
- Se reducirán las pérdidas de presión al interior de la cámara de calentamiento, ya que los ladrillos estarán recubiertos por una capa de mortero la cual brindará un sellado en toda la zona de calor, evitando fugas por las paredes, garantizando que el aire caliente solo pueda dirigirse hacia la zona del recuperador.
- El diseño mejorará su eficiencia eléctrica, ya que se logró reducir la potencia de las resistencias en la cámara de 6000 a 3600 W.
- La cámara de calentamiento está diseñada para que se pueda ampliar su zona interior, agregando más bloques aislantes en la parte inferior, al igual que nuevos bloques de resistencias, facilitando la ejecución de nuevos proyectos.
- Se diseñó una estructura con tubo metálico que soportará todo el peso del recuperador de calor, facilitando su desplazamiento y manipulación a cualquier lugar.
- Se diseñó un sistema para controlar y estabilizar la temperatura a cualquier nivel deseado desde una temperatura ambiente hasta los 1200°C. con el fin de no

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

limitar el uso y las aplicaciones futuras del recuperador y la cámara de calentamiento.

## 5.2 Principales hallazgos del estado del arte

El PhD. (Stephen W, 1996), (Stephen W, 1967), (Stephen W, 1969) presentó bajo condiciones de flujo laminar incompresible una ecuación que se caracteriza por la ausencia de adsorción o reacción. Esta ecuación permite modelar en medios porosos donde se produce cambios de escala del cuerpo bajo análisis (anisotropía). Su trabajo basado en elementos empíricos permitió mejorar elementos como el número de Nusselt en transferencia de calor entre un fluido y un sólido.

(Kimura, 1989), estudio la convección transitoria en cilindros embebidos en un medio poroso. Considera las fases sólida y líquida del medio poroso en equilibrio térmico. Utilizó modelos de convección forzada para flujo transversal a un cilindro horizontal y flujo longitudinal alrededor de un cilindro vertical y convección libre para un cilindro vertical.

(Al-Nimr et al, 1994), estudiaron el proceso de convección forzada transitoria laminar en la región de entrada de un lecho poroso de geometría anular, bajo condiciones de LTE (Equilibrio térmico local). Los investigadores utilizaron un modelo bidimensional conformado por una ecuación de momentum de estado estacionario y una ecuación de calor transitoria.

(Papageorgiou y Froment, 1995), compararon los resultados obtenidos al utilizar modelos homogéneos (equivalentes a LTE) y heterogéneos (equivalentes a LTNE) en reactores cilíndricos de lecho fijo, teniendo en cuenta las variaciones radiales en la porosidad y para procesos estacionarios.

(Chejne et al, 1996), plantean un modelo de tres ecuaciones de transporte de calor para un lecho empacado de *pellets* de geometría cilíndrica a través del cual fluyen gases de combustión.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

(Dex y Dixon, 1996), utilizaron CFD (Dinámica de fluidos computacional) para calcular el coeficiente convectivo de transferencia de calor en la pared de un ducto con tres esferas en disposición alternante.

(Dixon, 1997), estudió la transferencia de calor estacionaria en lechos empacados con relaciones  $dT/dp < 4$ . El autor utilizó datos experimentales de trabajos previos de otros investigadores y algunos que él mismo midió, con el fin de probar la validez de las correlaciones existentes para el coeficiente convectivo de pared y las conductividades efectivas de las fases sólida y fluida.

Logtenberg y Dixon (1998) utilizaron CFD para estudiar la transferencia de calor en un lecho empacado de ocho esferas. Los investigadores utilizaron *ANSYS – FLOTRAN* como herramienta computacional para determinar valores de  $Nuw$  y  $kr/kf$  para diferentes valores de  $Re$  y  $dT/dp$  y compararon sus resultados con datos experimentales, correlaciones empíricas y una solución analítica.

(Bey y Eigenberger, 1997), analizaron la influencia de la variación radial de porosidad en el campo de flujo para lechos de esferas, cilindros y anillos Rasching. Los autores tomaron mediciones experimentales de los perfiles radiales de velocidad, observando un máximo en cercanías de la pared.

(Cheng et al, 1999), presentaron un estudio sobre la determinación de la conductividad efectiva de un lecho empacado basándose en la geometría de empaquetamiento.

(Nandakumar et al, 1999), utilizaron simulación computacional para determinar propiedades geométricas de lechos empacados al azar.

Afandizadeh y Foumeny (2001) estudio los factores y la forma de depositar unas esferas en un recuperador y el proceso de vibración, pero no tuvo en cuenta los mecanismos de transferencia de calor.

Bahrami et al (2004), estudiaron la modelación de lecho empacado de acuerdo con un arreglo básico cercano a una estructura cristalina de los átomos, llamada celda unitaria, asumiendo que las partículas tienen una forma cercana a una esfera.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Nijemeisland (2001), empleo 44 esferas de una pulgada de diámetro, evitó el contacto de las esferas con la pared del recuperador y concluyo que las dimensiones de las esferas en un modelo computacional debe ser de menos del 1% que el modelo físico para facilitar la turbulencia y velocidad de flujo constante, confirmado por Dixon and Nijemeisland (2001).

(Nijemeisland y Dixon, 2002), utilizaron un modelo periódico de lecho empacado de esferas con  $d T / d p=4$ , con el fin de estudiar la influencia de la complejidad del campo de flujo, en la transferencia de calor en la región cercana a la pared.

Petrov (2006), Nieto y Cardona (2008) estudian el equilibrio térmico local (LTE) del lecho empacado, el cual conduce a una sola ecuación de energía en función de la temperatura de los gases y de las partículas del lecho, este supuesto permite predecir que el gas transfiere rápidamente el calor a la caliza, alcanzando la temperatura del gas casi instantáneamente.

Motato et al (2007), utiliza el método de la resistencia térmica despreciable y estado transitorio para un medio poroso. Proponen una Ecuación para la distribución de temperatura transitoria en un regenerador de lecho poroso empacado, usando esferas y cilindros de acero bajo carbono, adoptando el modelo de equilibrio térmico local (LTE).

Nieto y Cardona (2008) enunciaron que el uso de recuperadores de calor permite obtener un ahorro de energía mayores del 50% y Zhang et al (2002) informan que la eficiencia térmica aumenta de un 30 a un 40% en el proceso.

Yulong et al 2008, realizaron una revisión sobre la evolución de la hidrodinámica y la transferencia de calor en una mezcla de la fase gas-sólido que fluye en un lecho empacado.

Hilal (2008), indaga las características térmicas de los lechos empacados con un flujo constante de calor en esferas cerámicas de 0,287 m, utiliza como fluido aire,  $CO_2$  o helio con números Reynolds entre 100 y 2500.

Harmeet et al (2010) realizan una revisión de los lechos empacados empleados para el aprovechamiento del calor almacenado, proveniente de energía solar.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

K. Ando et al (2010), estudiaron las características de la transferencia de calor en un lecho empacado en medio poroso consolidado, los materiales utilizados fueron metales sintetizados, material cerámico y espuma cerámica.

(Yang et al, 2012), continuaron un estudio numérico realizado por los autores en el 2010, obtienen las características de la transferencia de calor hidrodinámico y macroscópico en lechos empacados con partículas esféricas y elipsoidales no uniformes.

Anderson et al (2014) estudiaron un recuperador de calor de 10' (pies) de altura y 2,25''(pulgadas) de diámetro, utilizaron un lecho empacado de esferas de alúmina alfa (corindón) de 6 mm de diámetro, el fluido utilizado fue aire, empleando dos velocidades, suponen un distribución radial de temperatura y calcularon la eficiencia de la exergía con los datos experimentales.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## REFERENCIAS

---

Adeyanju et al. (2009). Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds. *Journa of Applied Sciences.*, 4, 166-177. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Afandizadeh y Foumeny. (2001). Design of packed bed reactors: guides to catalyst shape, size, and loading selection. *ELSEVIER*, 669-682. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431100000727>

Al-Nimr et al. (1994). Transient Forced Convection in the Entrance Region of Porous Concentric Anuuli. *Canada J Chem. Engne* 72. Recuperado el 15 de 07 de 2014

Anderson et al. (2014). Experimental results and modeling of energy storage and recovery in a packed bed of alumina particles. *Applied Energy*, 521-529. *ELSEVIER*, 521-529. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191400049X>

Antonio B. (2014). *portaleso.com*. Obtenido de portaleso.com: [http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web\\_magnetismo\\_3/magnetismo\\_indice.html](http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_magnetismo_3/magnetismo_indice.html)

Antonio B. (2014). *Portaleso.com*. Obtenido de Portaleso.com: [http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web\\_electronica\\_3/electronica\\_indice.html](http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_electronica_3/electronica_indice.html)

Arpisa. (2014). *arpisa.com*. Obtenido de arpisa.com: <http://www.arpisa.com.mx/a.html>

Bahrami et al. (2004). Compact analytical models for effective thermal conductivity of rough spheroid packed. *ASME*, 13-19. Recuperado el 28 de 04 de 2014

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Barin et al. (1993). *Thermochemical properties of inorganic substances*. Berlin, New York: Springer-Verlag. Recuperado el 08 de 07 de 2014

Bejan y Kraus. (2003). *Heat transfer handbook*. USA: John Willey and Sons, Inc. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Bejan, A. (2004). *Convection heat transfer*. (Vol. 03). USA: John Wiley & Sons. Recuperado el 01 de 07 de 2014, de <http://www.amazon.es/Convection-Heat-Transfer-Adrian-Bejan/dp/0471271500>

Benyahia et al. (2005). *Enhanced voidage correlation for packed beds of various particle shapes and sizes*. Taylor and Francis inc. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Bes, A. (2006). *Dinamic Process Simulation of Limestone Calcination in Normal Shaft Kilms*. Ph. D. Thesis. Maddeburg Germany. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Bey y Eigenberger. (1997). Fluid Flow Through Catalyst Filled Tubes. *Chem. Engng. Sci* 54:, 1365-1376. Recuperado el 20 de 07 de 2014

Bluhm et al. (2010). A coupled fluid dynamic-discrete element simulation of heat and mass transfer in a lime shaft kiln. *ELSEVIER*, 5, 2821-2834. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Cengel y Ghajar. (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. En Cengel y Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill.

Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de Calor y masa* (03 ed.). México: McGraw-Hill. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Chejne et al. (1996). Forced Convection Heat Transfer Correlations for Flow in Pipes, Past Flat Plates, Single Cylinders, Single Spheres, and for. . *Ironmaking & Steelmaking*. 23:5, 406-410. Recuperado el 15 de 07 de 2014

Cheng and Specht. (2006). Reaction rate coefficients in decomposition of lumpy limestone of different origin. *ELSEVIER*, 8-15. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603106003236>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Cheng et al. (1999). Evaluation of Effective Thermal Conductivity from the Structure of a Packed Bed. *Chem. Engng. Sci*, 54:, 4199-4209. Recuperado el 21 de 07 de 2014

Depto de Energía de Estados Unidos. (2010). *RELIABLE PLANT*. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de RELIABLE PLANT: <http://www.reliableplant.com/Read/6003/plant-energy-efficient>

Derx y Dixon. (1996). Determination of the Fixed Bed Wall Heat Transfer Coefficient Using Computacional Fluid Dynamics. *Number Heat Transfer A.29:*, 777-794. Recuperado el 20 de 07 de 2014

Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos*. Medellín: Universidad de Antioquia. Recuperado el 08 de 07 de 2014

Dixon. (1997). Heat Transfer in Fixed Beds at Very Low (<4) Tube-to-Particle Diameter Ratio. *Ind. Engng Chem. Res.* 36:, 3053-3064. Recuperado el 05 de 08 de 2014

Dixon and Nijemeisland. (2001). CFD as a Design Tool for Fixed-Bed Reactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 5246-5256. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie001035a>

DME. (2003). A review of the dolomite and limestone industry in South Africa.

Dondé, C. (2005). *Transporte de momentum y calor*. Mérida, México: Ediciones Universidad Autónoma de Yucatán. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Empresa Refractarios de Colombia. (2014). *Empresa Refractarios de Colombia*. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de Empresa Refractarios de Colombia: [http://www.erecos.com/ua\\_23.pdf](http://www.erecos.com/ua_23.pdf)

Erecos. (2014). *Erecos*. Obtenido de Erecos: [http://www.erecos.com/ua\\_23.pdf](http://www.erecos.com/ua_23.pdf)

Ergiocontroles. (2014). *Ergiocontroles*. Obtenido de Ergiocontroles: <http://ergiocontroles.com/web/resistenciask.htm>

Ergun. (1949). Fluid Flow Through Randomly Packed Columns and Fluidized Bed. *Eng Chem*(41 6 1949), 1179-1184. Recuperado el 08 de 08 de 2014

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Fabila, G. (1998). *Diseño y análisis de experimentos industriales*. México: Universidad Iberoamericana. Recuperado el 08 de 07 de 2014, de [http://books.google.com.co/books?id=G622oQ8-RFQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.co/books?id=G622oQ8-RFQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Física Práctica. (2014). *Física práctica.com*. Obtenido de Física práctica.com: <http://www.fisicapractica.com/resistencia.php>

Geankopolis, C. J. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Mexico: Compañía Editorial Continental. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Harmeet et al. (2010). A review on packed bed solar energy storage systems. *ELSEVIER*, 1059-1069. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002536>

Henao, H. O. (2012). *MITOS Y REALIDADES DE LAS CALES Y ENMIENDAS EN COLOMBIA*. Obtenido de MITOS Y REALIDADES DE LAS CALES Y ENMIENDAS EN COLOMBIA: [http://www.bdigital.unal.edu.co/6834/1/Mitos\\_y\\_realidades\\_de\\_las\\_cales\\_y\\_enmiendas\\_en\\_colombia\\_%5BTesis\\_HOH2012%5D.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/6834/1/Mitos_y_realidades_de_las_cales_y_enmiendas_en_colombia_%5BTesis_HOH2012%5D.pdf)

Hilal, R. H. (2008). Thermal Characteristiccis of Ceramic Packed Bed. *Docstoc*, 1-9. Recuperado el 08 de 07 de 2014, de <http://www.docstoc.com/docs/87439671/Thermal-Characteristics-Of-Ceramic-Packed-Bed>

HINRASAC. (2014). *HINRASAC*. Obtenido de HINRASAC: <http://hinrasac.com/R4/productos.html>

Incropera et al. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer. 7th* (Vol. 7th). Wiley Desktop Edition. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Ivandit. (2014). *Brico*. Obtenido de Brico: [https://www.google.com.co/search?q=esquema+rele&es\\_sm=93&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=X5vvU7SKAYjLsATZx4DgAQ&ved=0CAgQ\\_AUoAQ&biw=1366&bih=624#facrc=\\_&imgdii=\\_&imgsrc=j2B17iaYdsqr3M%253A%3BhILeFIA9n4iUIM%3Bhttp%253A%252F%252Fi6.photobucket.com%252Falbums%25](https://www.google.com.co/search?q=esquema+rele&es_sm=93&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=X5vvU7SKAYjLsATZx4DgAQ&ved=0CAgQ_AUoAQ&biw=1366&bih=624#facrc=_&imgdii=_&imgsrc=j2B17iaYdsqr3M%253A%3BhILeFIA9n4iUIM%3Bhttp%253A%252F%252Fi6.photobucket.com%252Falbums%25)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Jamialahmadi et al. (2005). Pressure drop, gas hold up and heat transfer during single and two phase flow through porous media. *International Journal of. Heat and fluid flow*, 156-172. Recuperado el 08 de 07 de 2014

K. Ando et al . (2010). Heat Transfer Characteristics in Consolidated Porous Media. *AIP Conf. . Proc 1254 , 27 (2010)*, (págs. 27-32). Montecatini (Italia). Recuperado el 03 de 07 de 2014, de <http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.3453825>

Kanthal. (01 de 2012). *Resistance heating alloys for electric home appliances*. Recuperado el 05 de 07 de 2014, de Sandvik heating technology AB: <http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Materials%20in%20wire%20and%20strip%20form/Resistance%20heating%20wire%20and%20strip/S-KA026-B-ENG-2012-01.pdf>

Kanthal. (2014). *KANTHAL*. Obtenido de KANTHAL: <http://kanthal.com/en/products/material-datasheets/strip/kanthal-a-1/>

Kimura. (1989). Transient Forced Convection Heat Transfer from a Circular Cylinder in a Saturated Porous Medium. *Int . J. Heat Mass Transfer*. 32:3, 192-195. Recuperado el 15 de 07 de 2014

Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. John Wiley and Sons. Recuperado el 08 de 07 de 2014

Logtenberg y Dixon. (1998). Computational Fluid Dynamics Studies of Fixed Bed Heat. *Transfer. chem. Engng Processing*, 7-21.

Maerz . (2002). *The Maerz parallel flow regenerative lime kiln*. Recuperado el 18 de 04 de 2014, de The Maerz parallel flow regenerative lime kiln: <http://www.maerz.com>

Mejía. (2004). Medelamiento de la Convección Forzada Transitoria en Lechos Empacados. Tesis de Maestría. (U. d. Antioquia, Ed.) Medellin. Recuperado el 02 de 08 de 2014

Molerus et al. (1997). Heat Transfer in fluidized beds. *Chapman and Hall*. Recuperado el 08 de 08 de 2014, de <http://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=X8CUnUAME1EC&oi=fnd&pg=PR>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

9&dq=Molerus,+O.:+Principles+of+Flow+in+Disperse+Systems.+Chapman+%26+Hall,+London+1993.&ots=scBSVAU4ZI&sig=RWMd78hqJSYVYfyepYgj9cTHCBg#v=onepage&q=Molerus%2C%1/2O.%3A%1/2Principles%1/

- Motato et al. (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. Recuperado el 28 de 04 de 2014
- Nandakumar et al. (1999). Predicting Geometrical Properties of Random Packed Beds from Computer Simulation. *AIChE J.* 45:, 2286-2297. Recuperado el 21 de 07 de 2014
- Natarajan y Pitchand. (2009). Thermodynamic optimization of Periodic. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 509-517. Recuperado el 08 de 07 de 2014, de <http://waset.org/publications/2579/thermodynamic-optimization-of-periodic-regenerative-heat-exchanger>
- Nieto y Cardona. (2008). NUMERICAL SIMULATION OF PACKED BED HEAT REGENERATORS. *Instituto de Energía y Termodinámica, Universidad Pontificia Bolivariana*, , 1601-1618. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de <http://amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/1509/1474>
- Nijemeisland. (2001). Verification Studies of Computational Fluid Dynamics in Fixed Bed Heat Transfer. *Verification Studies of Computational Fluid Dynamics in Fixed Bed Heat Transfer*, M.Sc. Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester. Recuperado el 03 de 07 de 20104, de <https://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0426100-142021/unrestricted/nijemeisland.pdf>
- Nijemeisland y Dixon. (2002). Design of a Wall-Segment Model of an N=4 Fixed Bed of Spheres and Simulation of Gas Flow and Heat Transfer. *North American Fluent Student Contest*. Recuperado el 02 de 08 de 2014, de [http://university.fluent.com/2002contest/results/STD0010608\\_paper.pdf](http://university.fluent.com/2002contest/results/STD0010608_paper.pdf)
- Ochoa et al. (2010). Cleaner production in a small lime factory by means of process control. *Journal of Cleaner Production*. *ELSEVIER*, 1171-1176. Recuperado el 18 de 04 de 2014

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Ontiveros, J. (2010). Flujo en Medio Poroso. *Flujo en Medio Poroso*, Universida de los Andes. Recuperado el 08 de 07 de 2014, de <http://wwwl.es.scribd.com/doc/59600586/Flujo-Medio-Poroso>

Papageorgiou y Froment. (1995). Simulation Model Accounting for Radial Voidage Profiles in Fixed-Bed Reactors. *Chem. Engng . Sci.* 50:19, 3043-3056. Recuperado el 15 de 07 de 2014

Patiño y Figueroa . (2004). Convección de calor en el flujo de fluidos a través de un lecho de empaque de bauxita activada. *Revista facultad de ingeniería U:T:A. Chile*, 27-34. Recuperado el 08 de 07 de 2014

Petrov, A. (2006). *Momentum and Heat Transfer In a Packed Bed*. (Department of Mechanical and Aerospace Engineering University of California, San Diego.) Recuperado el 28 de 04 de 2014, de Momentum and Heat Transfer In a Packed Bed: [http://courses.ucsd.edu/rherz/mae221a/reports/Petrov\\_221A\\_F06.pdf](http://courses.ucsd.edu/rherz/mae221a/reports/Petrov_221A_F06.pdf)

Prandtl, L. (1904). Sobre el movimiento de fluidos con baja fricción. *Proc. III Intern. Math. Congress*, (pág. Proc. III Intern. Math. Congress). Heidelberg. Recuperado el 01 de 07 de 2014

RATH. (2014). *RATH*. Recuperado el 10 de 08 de 2014, de RATH: <http://www.rath-group.com/es/productos/ladrillos-refractarios-aislantes/>

Ruiqing et a. (2013). Theoretical and experimental analysis of bed -to-wall heat transfer in heat recovery processing. *ELSEVIER*, 186-195. Recuperado el 08 de 07 de 2014, de [file:///C:/Users/Home/Downloads/1-s2.0-S0032591013005287-main\[1\].pdf](file:///C:/Users/Home/Downloads/1-s2.0-S0032591013005287-main[1].pdf)

Sagastune y Vandecasteele. (2011). Exergy basaded in indicators to evaluate the possibilities to reduce fuel consumption in lime production. *ELSEVIER*, 2820–2827. Recuperado el 18 de 04 de 2014, de [http://200.13.235.202:2069/science?\\_ob=ArticleListURL&\\_method=list&\\_ArticleListID=-624488931&\\_sort=r&\\_st=13&view=c&md5=e6bba14d62a198c111dd8658a41a80db&searchtype=a](http://200.13.235.202:2069/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=-624488931&_sort=r&_st=13&view=c&md5=e6bba14d62a198c111dd8658a41a80db&searchtype=a)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

- Schemin. (2014). *Schemin Perú*. Recuperado el 10 de 08 de 2014, de Schemin Perú:  
<http://www.scheminperu.com/site/?cat=PRODUCTOS&art=aislantes#1>
- Shagapov et al. (2008). Theoretical modeling of simultaneous processes of coke burning and limestone decomposition in a furnace. *Springer Link*, 55-63. Recuperado el 01 de 07 de 2014
- Shuiqing et al. (2006). Modelling of the behaviour of gas–solid two-phase mixtures flowing through packed beds. *ELSEVIER*, 1922-1931. Recuperado el 03 de 07 de 20104, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250905008213>
- Stephen W. (1967). Diffusion and Dispersion in Porous Media. *AIChE J*, 420-427.  
Recuperado el 02 de 08 de 2014
- Stephen W. (1969). Advances in Theory of Fluid Motion in Porous Media. *Ind Engng Chemistry* 61:12, 14-28. Recuperado el 02 de 08 de 2014
- Stephen W. (1996). The Equations of Motion in Porous Media. *Chem Engng. Sci*, 291-300.  
Recuperado el 01 de 08 de 2014
- Tobis, j. (2000). Influence of bed geometry on its frictional resistance under turbulent flow conditions. *ELSEVIER*, 5359-5366. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000925090000155X>
- Uzi. M. (2009). Flow fluids. *Flow fluids. Granular and packed beds*, 106. Recuperado el 08 de 07 de 2017
- Varahasamy et al. (1996). Heat Transfer by Forced Convection in Pipes Packed With Porous Media Whose Matrices are Composed of Spheres. 3931-3947. Recuperado el 01 de 07 de 2014
- Wilhelmsen. (2010). The state of minimum entropy production in reactor design. *The state of minimum entropy production in reactor design*. A thesis submitted to the Department of Chemistry, Faculty of Natural Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology in Partial fulfillment of requirement for the Degree of Master of Technology. Trondheim. Recuperado el 08 de 07 de 2014

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

Yang et al. (2012). Experimental analysis of forced convective heat transfer in novel structured packed beds of particles. *Chemical Engineering Science*, 126-137. Recuperado el 05 de 07 de 2014

Yulong et al. (2008). Hydrodynamics and heat transfer of gas–solid two-phase mixtures flowing through packed beds – a review. *ELSEVIER*, 1185-1196. Recuperado el 03 de 07 de 2014, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007108002372>

Zarrinehkfash y Sadrameli. (2004). Simulation of fixed bed regenerative heat exchangers for flue gas heat recovery. *ELSEVIER*, 24, 373-382. Recuperado el 01 de 07 de 2014

Zhang et al. (2002). Study on performance of the ball packed-bed regenerator: experiments and simulation. En J. Yu, M. Zhang, W. Fan, Y. Zhou, & G. Zhao, *Study on performance of the ball packed-bed regenerator: experiments and simulation* (págs. 641-651). ELSEVIER. Recuperado el 08 de 07 de 2014

Zheng et al. (2005). Numerical simulation of thermal process and energy saving of lime furnace. *China. Article ID. 1005- 9784(1/205)03 - 0295 – 05*, Vol. 12 No. 3. Jun. 1/205. Recuperado el 28 de 04 de 2014

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## APÉNDICE

---

### Apéndice A

Cálculos para determinar las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes de la cámara de calentamiento:

Ecuación 38 en forma diferencial  $\dot{Q} = KA \frac{dT}{dx}$  (38)

Medidas de las paredes internas:  $(0.1 * 0.28)m$

Espesor de pared:  $0.065 m$

Reemplazando:

$$\dot{Q} = 0.274(0.1 * 0.28) \frac{545-25^{\circ}C}{0.065} = 61.4 \text{ Watts}, \text{ pérdidas para cada pared.}$$

$$\dot{Q} = 0.274(0.1 * 0.1) \frac{545-25^{\circ}C}{0.065} = 21.9 \text{ Watts}, \text{ pérdidas en la base inferior.}$$

Pérdidas totales para 4 paredes laterales y una cara inferior=  $(61.4 * 4) + 21.9 = 267.5 W$

Se sabe que la potencia total por las dos resistencias es de **3600W**

Potencia disponible para recuperar en el lecho empacado:  $3600 - 267.5 = 3332.5W$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## Apéndice B

Cálculos para determinar la cantidad de hilo resistivo para cada resistencia.

Para el hilo resistivo tipo kanthal A-1, la cantidad de ohmios por metro lineal con un diámetro de hilo de 1mm es de:  $1.85 \frac{\Omega}{m}$ . (Ver Tabla 5)

Diámetro $\emptyset$ mm	Resistencia a 20°C $\Omega /m$	Área superficial $cm^2/m$	Longitud m/Kg	Peso g/m	Resistividad $cm^2/\Omega$
1	1.84	31.42	179.3	5.58	17.0.2

$$cantidad \text{ en metros lineales} = \frac{26.8\Omega}{1.84 \frac{\Omega}{m}} = 14.5m$$

## Apéndice C

Relación  $\frac{d_T}{d_p}$

$$\frac{d_T}{d_p} = \frac{0.096}{0.01} = 9.6 \quad (46)$$

$$\frac{d_T}{d_p} = \frac{0.096}{0.015} = 6.4 \quad (47)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

## Apéndice D

Relación intermedia de diámetro de tubería vs Altura del recuperador

$$\frac{0.25}{0.096} = 2.6 \quad (48)$$

## Apéndice E

Ecuación para determinar el volumen del recuperador:

Altura del tubo recuperador: 0.25 m

Diámetro interno del tubo: 0.096 m

Relación intermedia de diámetro de tubería vs recuperador: 2.6

$$V_r = \frac{\pi(d_t)^2 L_{recup}}{4} \quad (49)$$

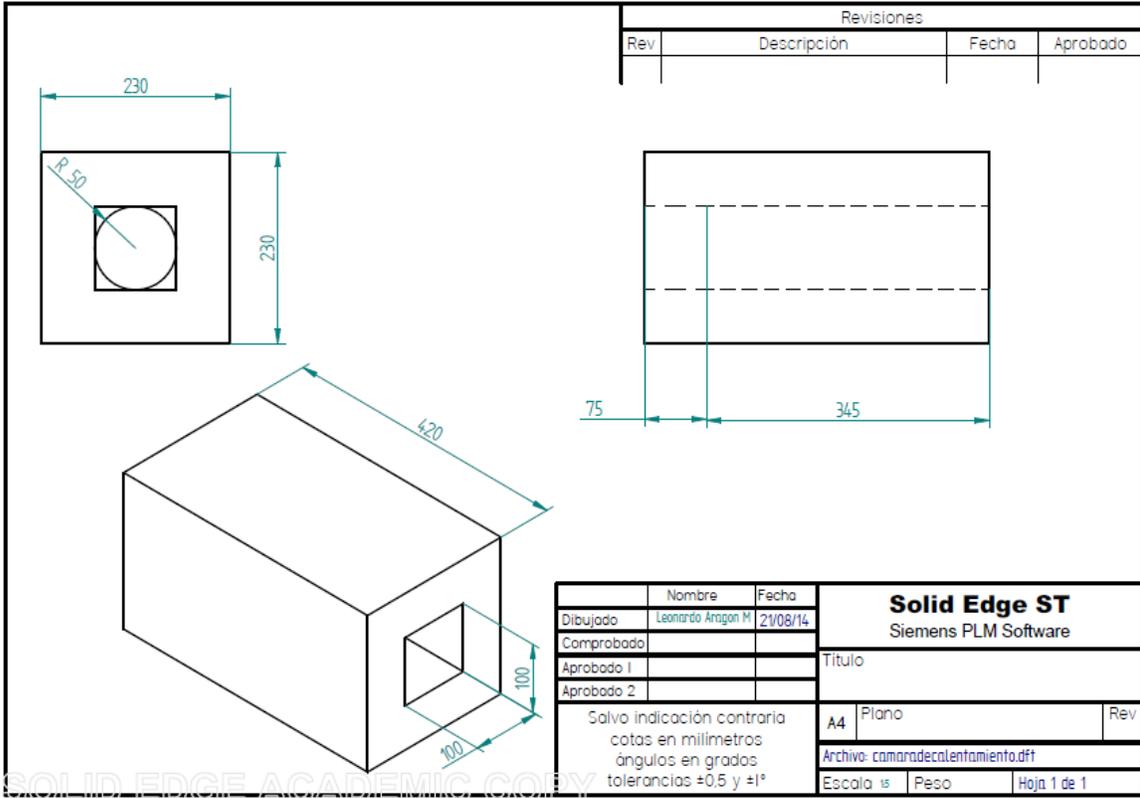
$$V_r = \frac{\pi(0.096)^2 0.25}{4}$$

$$V_r = 0.001809 \text{ m}^3$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	
		Versión	
		Fecha	

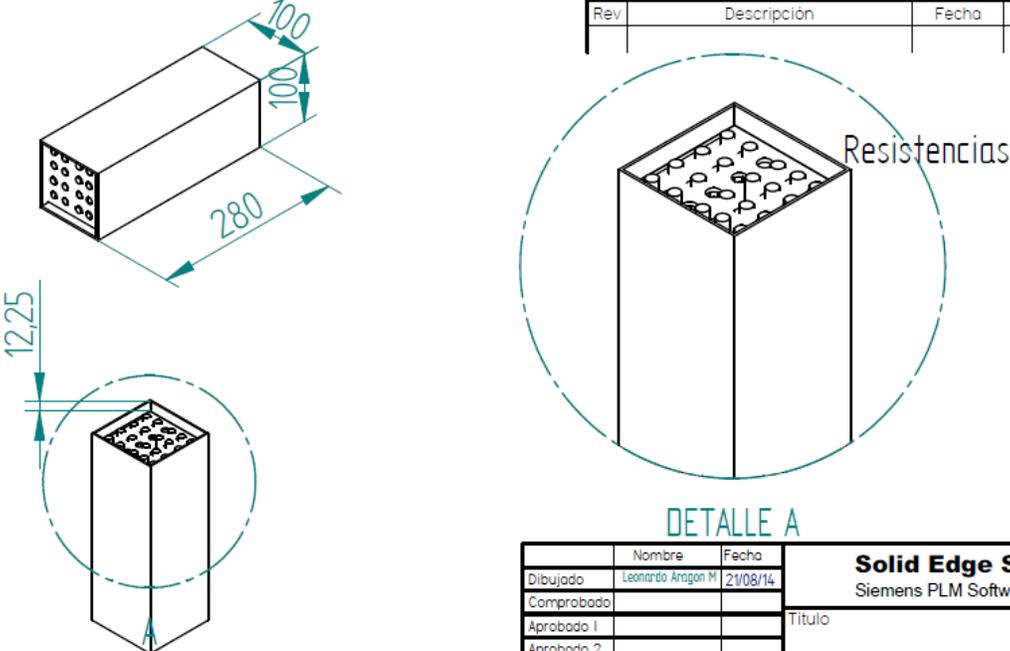
## Apéndice F

Planos del diseño del recuperador de calor, realizados en Solid Edge.



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado: Leonardo Aragón M	21/08/14		
Comprobado			
Aprobado 1			
Aprobado 2		Título	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		A4 Plano	Rev
		Archivo: camaradecalentamiento.dft	
		Escala 1:1	Peso

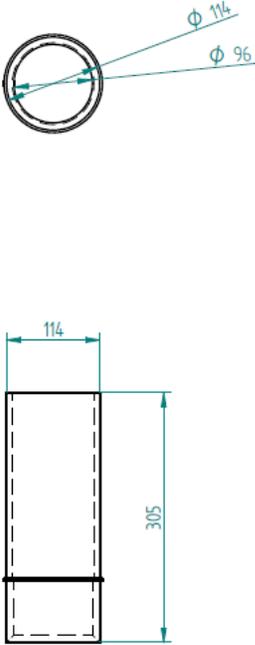
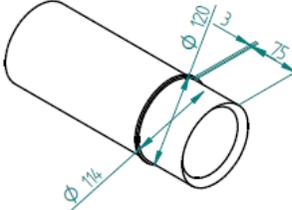
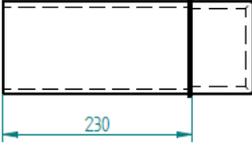


Technical drawing showing a rectangular chamber with dimensions 280 (length), 100 (width), and 100 (height). A detail view labeled "DETALLE A" shows the top surface with a grid of resistors. The height of the detail view is 12,25. The word "Resistencias" is written next to the detail view.

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

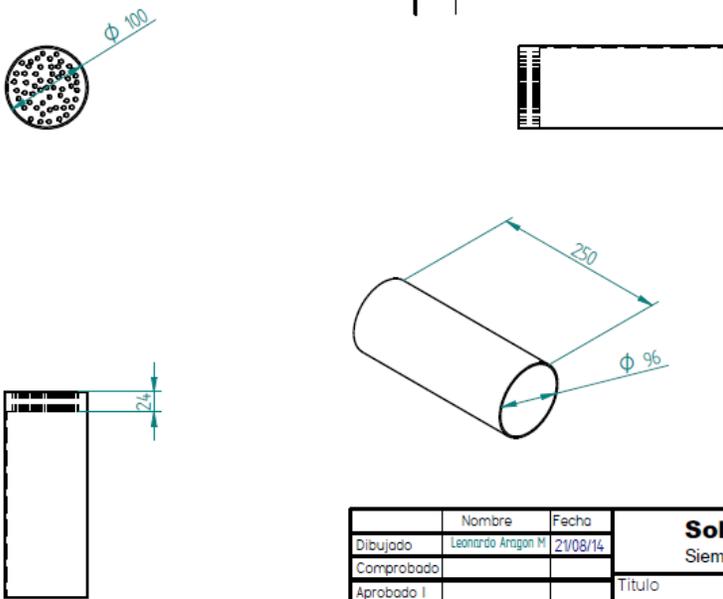
Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado: Leonardo Aragon M	21/08/14		
Comprobado		Titulo	
Aprobado 1		A4 Plano	
Aprobado 2		Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias +0,5 y +1°		Camara de resistencias	
		Escala	Peso
		Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

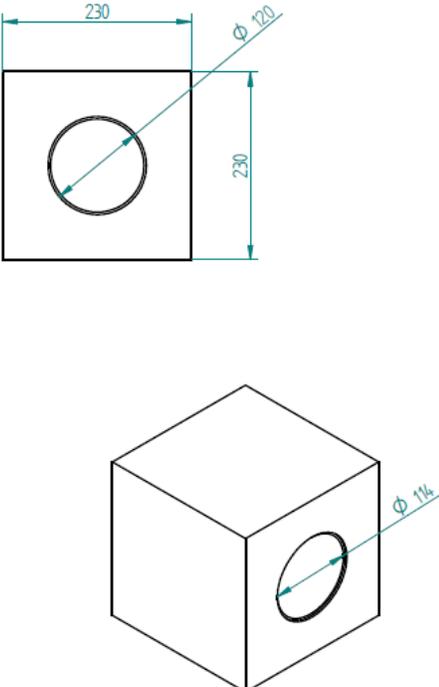
  



  

	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Leonardo Aragón M	21/08/14	Título	
Comprobado				
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A4	Plano
			Cilindro fija	
			Escala 1:1	Peso
			Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Leonardo Aragon M	21/08/14	Título	
Comprobado				
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°			Cilindro móvil.	
			Escala 1:1	Peso
			Hojn. 1 de 1	



Revisiones			
Rev.	Descripción	Fecha	Aprobado

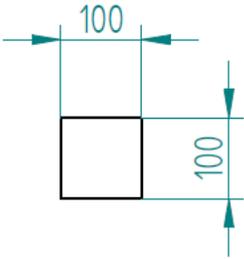
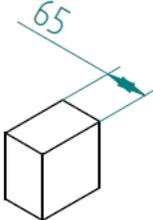
Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado: Leonardo Aragón M	21/08/14		
Comprobado			
Aprobado 1			
Aprobado 2		Título	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		A4 Plano	Rev
		Cubierta cilindro	
		Escala 1:1	Peso

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Código	
Versión	
Fecha	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Dibujado	Leonardo Aragón M	21/08/14	Siemens PLM Software	
Comprobado			Título	
Aprobado 1			A4 Plano	
Aprobado 2			Tapa entrada de aire	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Escala 1:1	Peso
			Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

### Recuperador de calor residual de lecho empacado de caliza y carbon

