

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

# **Rediseño e implementación de un sistema de control automático para un intercambiador de calor de lecho empacado**

**Juan Fernando Pérez Pérez**

**Cristian David Salazar Osorio**

**Ingeniería Electromecánica**

**PhD Carlos Alberto Acevedo Álvarez**

**Esp. Diego Antonio Muñoz**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**MEDELLÍN-COLOMBIA**

**2016**

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

## RESUMEN

---

Se evaluará el diseño existente de calentamiento generado por un par de resistencias en un prototipo de recuperador de calor de lecho empacado de caliza – carbón existente en el laboratorio de mecánica de fluidos del Instituto Tecnológico Metropolitano, el cual simula la temperatura de los gases producto de la combustión en el proceso de calcinación de la piedra caliza, empleando como fluido aire a temperatura ambiente generado por un ventilador ubicado en la parte inferior del prototipo, este aire es calentado por medio de las resistencias hasta la temperatura deseada. La temperatura exterior del cilindro es controlada por una termocupla y adicional cuenta con 4 termocuplas más en el interior del cilindro que sensan diferentes cambios de temperatura a varias alturas

Se evaluará la geometría actual del prototipo y se comparará con otras geometrías seleccionadas, las cuales serán evaluadas mediante simulaciones o termogramas para seleccionar la que entregue la mayor eficiencia. Adicionalmente, se fabricará un prototipo de la resistencia.

Adicionalmente se diseñará un sistema de control que registre los datos sensados por las termocuplas y transfiera estos a un ordenador para luego almacenarlos en un software capaz de obtener graficas de temperatura a diferentes alturas conforme pasa el tiempo.

**Palabras claves:** Lecho empacado, eficiencia energética, Efecto Seebeck, termocupla

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

## RECONOCIMIENTOS

---

Queremos agradecer a los directores de la tesis de grado, los docentes Carlos Alberto Acevedo Alvarez y Diego Antonio Muñoz por haber puesto en nosotros la confianza para llevar a cabo este proyecto, asimismo queremos agradecer el compromiso y apoyo que nos brindaron a lo largo del proyecto, por sus aportes y paciencia.

Agradecemos también al encargado del laboratorio de mecánica de fluidos, Vladimir Imbol, por las asesorías y recomendaciones que nos brindó, ya que este proyecto es la continuación de su trabajo de grado.

Agradecer a nuestras familias por todo el apoyo que recibimos a lo largo del proyecto y de nuestra carrera, ya que sin ellos hubiese sido muy difícil obtener los resultados que hoy obtuvimos.

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

# ACRÓNIMOS

Abreviatura	Término
F.T.E.M	Fuerza termo electromotriz
ADC	Convertidor Análogo Digital
DAC	Convertidor Digital Análogo
IDE	Ambiente de desarrollo integrado
GND	Ground (Tierra)
VCC	Positive Supply
SCK	Serial Clock input (reloj serie)
CS	Chip Select
SO	Serial Data Output
IP	Dirección de identificación de una red
HTML	Hyper Text Markup Lenguaje (lenguaje de marca de hipertexto)
SPI	Serial Peripheral Interface

Símbolo	Término	Unidad en SI
FeCrAl	Aleación de hierro, cromo y aluminio.	Adimensional
cm	Centímetros	cm
mm	Milímetros	mm

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

W	Vatios	W
V	Voltios	V
A	Amperio	A
Fe	Hierro	Adimensional
Al	Aluminio	Adimensional
Cr	Cromo	Adimensional

**Símbolos con letras griegas**

$\Omega$	Ohmios
$\epsilon$	Coeficiente de emisividad

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

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	12
1.1.	Generalidades .....	12
1.2.	Objetivos .....	13
1.2.1.	Objetivo General .....	13
1.2.2.	Objetivos Específicos .....	13
1.3.	Organización de la tesis .....	13
2.	MARCO TEÓRICO .....	15
2.1.	Las termocuplas .....	15
2.1.1.	Termocuplas tipo J .....	16
2.1.2.	Termocupla tipo K .....	17
2.1.3.	Efecto Seebeck .....	17
2.2.	Convertor análogo digital .....	17
	Figura 1 .....	18
2.2.1.	Modulo para termocupla MAX6675 .....	18
2.2.1.1.	Características de la tarjeta de control .....	19
2.2.2.	Arduino .....	20
2.3.	Tipos de contactores .....	20
2.3.1.	Contactador de mercurio .....	21
2.3.2.	Contactador de estado sólido .....	21
2.4.	Kanthal .....	22
2.5.	Estado del arte .....	22
2.5.1.	Sistema intercambiador de calor .....	22
2.5.1.1.	Diseño y construcción de un intercambiador de calor directo para horno cubilote. 22	
2.5.1.1.1.	Pre calentamiento de aire en el cubilote .....	23
2.5.1.1.2.	Selección de recuperador de calor. ....	24
2.5.2.	Sistema de resistencias eléctricas .....	25
2.5.2.1.	Tipos de resistencias eléctricas para hornos industriales .....	27

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

2.6.	Sistema de adquisición de datos. ....	29
2.6.1.	Desarrollo de sistema de control de temperatura. ....	29
3.	METODOLOGÍA.....	32
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1.	Rediseño del sistema de calentamiento del aire .....	34
4.1.1.	Selección de las resistencias .....	36
4.1.1.1.	Resistencia 1 .....	36
4.1.1.2.	Resistencia 2 .....	38
4.1.1.3.	Resistencia 3 .....	40
4.1.1.4.	Resistencia 4 .....	43
4.1.2.	Análisis de los termogramas .....	45
4.1.3.	Fabricación de la resistencia .....	46
4.1.4.	Cálculo de las resistencias.....	48
4.1.5.	Ensamble sistema de control original.....	50
4.1.5.1.	Caja y tablero de control.....	50
4.1.6.	Temperatura .....	51
4.1.6.1.	Sistema de adquisición de datos implementado.....	51
4.1.6.2.	Programación en Arduino .....	52
4.1.6.3.	Montaje físico del sistema de adquisición de datos.....	61
4.1.7.	Presión .....	61
4.1.8.	Instalación eléctrica y de control.....	62
4.1.8.1.	Circuito de control .....	62
4.1.8.2.	Circuito de potencia.....	63
4.2.	Cambio de contactor mecánico .....	65
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	67
5.1.	Conclusiones .....	67
5.2.	Recomendaciones y trabajo futuro .....	68
	REFERENCIAS .....	69
	APÉNDICE.....	71
	APENDICE A.....	71
	APENDICE B.....	78
	APÉNDICE C.....	83

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

# INDICES DE FIGURAS Y TABLAS

---

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secuencia de una conversión análoga digital a través de un diagrama de bloques.....	17
Figura 2. Tarjeta de control MAX6675.....	18
Figura 3. Placa de Arduino Mega.....	19
Figura 4. Contactor de estado sólido.....	21
Figura 5. Modelo de horno Cubilote.....	22
Figura 6. Esquema del calentador de aire tipo recuperativo.....	23
Figura 7. Detalle de una parrilla de resistencias.....	25
Figura 8. Resistencia simulada.....	24
Figura 9. Ensayo de la resistencia.....	26
Figura 10. Resistencia de aletas helicoidales.....	26
Figura 11. Resistencias tubulares lisas.....	27
Figura 12. Resistencia tipo espiral 1.....	27
Figura 13. Resistencia tipo espiral 2.....	28
Figura 14. Esquema del sistema de control en tiempo real.....	29
Figura 15. Sistema de control digital.....	29
Figura 16. Diagrama de bloques intercomunicación (termocuplas, microcontrolador, GLCD, memoria SD, RTC DS3224).....	30
Figura 17. Prototipo del recuperador de calor completo.....	33
Figura 18. Cámara termográfica FLUKE Ti25.....	35
Figura 19. Diseño resistencia 1.....	36
Figura 20. Foto termográfica parte inferior de cilindro de acero.....	37

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

Figura 21. Foto termográfica parte posterior de cilindro de acero.....	37
Figura 22. Foto termográfica parte superior de la resistencia.....	37
Figura 23. Foto termográfica parte posterior del material refractario.....	38
Figura 24. Diseño resistencia 2.....	38
Figura 25. Foto termográfica parte inferior de cilindro de acero.....	39
Figura 26. Foto termográfica parte posterior de cilindro de acero.....	39
Figura 27. Foto termográfica parte superior de la resistencia.....	40
Figura 28. Foto termográfica parte posterior del material refractario.....	40
Figura 29. Diseño resistencia 3.....	41
Figura 30. Foto termográfica parte inferior de cilindro de acero.....	41
Figura 31. Foto termográfica parte posterior de cilindro de acero.....	42
Figura 32. Foto termográfica parte superior de la resistencia.....	42
Figura 33. Foto termográfica parte posterior del material refractario.....	42
Figura 34. Diseño resistencia 4.....	43
Figura 35. Foto termográfica parte inferior de cilindro de acero.....	43
Figura 36. Foto termográfica parte posterior de cilindro de acero.....	44
Figura 37. Foto termográfica parte superior de la resistencia.....	44
Figura 38. Foto termográfica parte posterior del material refractario.....	44
Figura 39. Bases de las resistencias en material refractario.....	47
Figura 40. Distribución de los orificios.....	47
Figura 41. Tablero de control.....	50
Figura 42. Esquema de distribución de termopares en cilindro móvil.....	51
Figura 43. Router D-LINK empleado.....	53
Figura 44. Módulo Ethernet W5100.....	53
Figura 45. Ensamble de Arduino Mega y módulo Ethernet W5100.....	54
Figura 46. Conexión de los módulos MAX6675, Shield Ethernet W5100 y Arduino Mega...	55
Figura 47. Muestra de los datos almacenados.....	56
Figura 48. Paso a paso para adquirir los datos desde el Datalogger de Arduino 1.....	56

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

Figura 49. Paso a paso para adquirir los datos desde el <i>Datalogger</i> de Arduino 2.....	57
Figura 50. Paso a paso para adquirir los datos desde el <i>Datalogger</i> de Arduino 3.....	58
Figura 51. Paso a paso para adquirir los datos desde el <i>Datalogger</i> de Arduino 4.....	58
Figura 52. Paso a paso para adquirir los datos desde el <i>Datalogger</i> de Arduino 5.....	59
Figura 53. Paso a paso para adquirir los datos desde el <i>Datalogger</i> de Arduino 6.....	59
Figura 54. Paso a paso para adquirir los datos desde el <i>Datalogger</i> de Arduino 7.....	60
Figura 55. Gráfica de datos adquiridos.....	60
Figura 56. Montaje físico del sistema de adquisición de datos.....	61
Figura 57. Esquema del circuito de control realizado en CADe-SIMU.....	62
Figura 58. Instalación eléctrica del recuperador de calor.....	64
Figura 59. Clavija NEMA L21.....	64
Figura 60. Contacto mecánico.....	65
Figura 61. Contactor de estado sólido.....	66
Figura 62. Contactor de estado sólido instalado.....	66

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

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficiente de emisividad.....	35
Tabla 2. Propiedades del alambre Kanthal A1. ....	46
Tabla 3. Cantidad de ohmios por metros según diámetros.....	49

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

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Generalidades

El siguiente trabajo de grado es propuesto para darle continuidad a las recomendaciones planteadas en el trabajo de grado *“Construcción y evaluación de un prototipo de recuperador de calor residual de lecho empacado de caliza y carbón”* realizado por el alumno Vladimir Imbol (Imbol Rúa, 2015) para obtener el título de Ingeniero Electromecánico. Se pretende evaluar la eficiencia de las resistencias actuales de un prototipo recuperador de calor de lecho empacado de caliza – carbón y seleccionar una nueva geometría para mejorar la eficiencia del sistema, ayudando al aumento de la presión y mejorando la vida útil de dichas resistencias. Asimismo, obtener un registro sistematizado del comportamiento térmico de los gases generados por el prototipo recuperador de calor, para con esto obtener graficas de temperatura a diferentes alturas conforme pasa el tiempo evitando de esta manera, datos erróneos calculados por la apreciación del ojo humano debido a la toma de valores manuales.

El actual sistema presente en el laboratorio simula la captura de los gases de combustión que desprende un horno para el proceso de calcinación de la piedra caliza, el principio de funcionamiento de este prototipo se basa en el flujo de calor generado por el paso aire impulsado por un blower ubicado en la parte inferior, dicho aire pasa por una resistencia que se calienta a una temperatura máxima de 560°C, este calor es transferido por convección hacia la superficie exterior de un cilindro, el cual contiene el material a calentar, adicionalmente cuenta con una serie de termocuplas que censan los cambios de temperatura a diferentes alturas, para adquirir el valor del poder calorífico de los materiales. En este se llevará a cabo la modificación, diseñando una resistencia más eficiente y aumentando la presión de aire caliente que circula a través del dispositivo.

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

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Rediseñar el sistema de calentamiento de aire e implementar un sistema de control y adquisición de datos del prototipo intercambiador de calor de lecho empacado.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar la resistencia del prototipo de recuperador residual de calor, seleccionando la geometría adecuada que cumpla con las condiciones necesarias de operación.
- Simular varias geometrías de resistencias para seleccionar la más eficiente.
- Realizar un prototipo de la resistencia.
- Diseñar un dispositivo electrónico capaz de recibir y almacenar las señales de temperatura obtenidas por las termocuplas
- Implementar una interfaz que comunique y transfiera los datos de temperatura almacenados en el dispositivo electrónico hacia un computador.
- Programar un software desde el PC, que realice gráficas y guarde registros de las mediciones de temperaturas conforme pasa el tiempo
- Mejorar el sistema de control-potencia que acciona el calentamiento del prototipo por un sistema más rápido y que genere menos fatiga al elemento.

## **1.3. Organización de la tesis**

En el marco teórico se hace una descripción completa acerca de los sistemas de recuperación de calor, se toman como referencias tesis de grados y artículos de

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

investigación al respecto, dichas referencias se centran específicamente en las recomendaciones hechas en el trabajo de grado (Imbol Rúa, 2015).

En la metodología, se hace una descripción detallada de las actividades requeridas a realizar para el cumplimiento de los objetivos planteados, estas actividades incluyen selección de la resistencia más eficiente, el diseño del sistema de control de adquisición de datos, simulaciones y análisis de resultados.

En los resultados y discusiones se describe paso a paso las actividades realizadas, las cuales se centran en las modificaciones del sistema de calefacción del dispositivo existente actualmente en el laboratorio, el cual es una mejora continua del prototipo realizado por (Imbol Rúa, 2015), así como el sistema de adquisición de datos de las pruebas que se realicen..

En las conclusiones se realizarán las descripciones de los hallazgos que se obtuvieron en la realización del proyecto, los resultados obtenidos y las oportunidades que a lo largo del desarrollo se fueron presentando; además de analizar si se alcanzaron los objetivos propuestos en el proyecto.

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

## 2. MARCO TEÓRICO

---

La resistencia de cualquier objeto depende únicamente de su geometría y de su resistividad, por geometría se entiende a la longitud y el área del objeto mientras que la resistividad es un parámetro que depende del material del objeto y de la temperatura a la cual está sometido.

De las resistencias eléctricas utilizadas para los procesos de calefacción se tiene una gran variedad dependiendo de su aplicación, tales como: resistencia eléctrica tipo banda, tipo cartucho, tipo plana, tipo espiral, tubulares, coiler o infrarrojas (Rindesa, 2015).

De ese grupo de resistencias eléctricas se pueden tomar como base o modelo para el diseño propuesto básicamente las de tipo espiral, estas son empleadas para temperaturas desde los 1000 o 1200 °C. Estas pueden estar soportadas con aisladores cerámicos (como parrillas, calefactores, resistencia para aire forzado, calefactores de aire entre otras aplicaciones). Este tipo de resistencias se emplean con una tensión nominal de 220 V (Rindesa, 2015).

Dicho diseño hay que evaluarlo teniendo en cuenta la no obstrucción del flujo del aire, esto para mejorar la eficiencia y el aprovechamiento del calor que genere la resistencia. Este aprovechamiento se da por convección forzada, ya que por medio de la resistencia va a empezar a fluir un aire generado por un ventilador ubicado en la parte inferior del prototipo.

### 2.1. Las termocuplas.

En la actualidad el ser humano para obtener una mayor eficacia y rapidez en la producción se ha dado a la tarea de controlar y monitorear la mayoría de los procesos utilizados en la industria valiéndose de una computadora. Para dicho control y monitoreo se realizan circuitos integrados, controles, automatizaciones.

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

En estos procesos industriales la temperatura tiene una importancia fundamental. Por ello, es imprescindible disponer de una medición muy exacta. Las temperaturas imprecisas pueden tener graves consecuencias, como la reducción de la vida útil del equipo si sufre un sobrecalentamiento, datos erróneos y por ende mal diagnóstico en proceso, etc., es ahí donde los sensores de temperaturas entran a jugar un papel muy importante en la industria.

Las termocuplas son los sensores de temperatura más comunes y utilizados industrialmente. Estas se hacen con dos cables de diferente material soldados en un extremo. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se induce un pequeño voltaje llamado efecto Seebeck del orden de los milivoltios, el cual aumenta con la temperatura. Generalmente las termocuplas se encuentran encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable, en un extremo está la unión y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido adentro de una caja redonda de aluminio.

Existen una gran cantidad de tipos de termocuplas, pero para el caso de este trabajo se utilizarán las de tipo J y del tipo K.

### **2.1.1. Termocuplas tipo J.**

Conocida como la termocupla hierro – constantán (Fe - CuNi), es la segunda más utilizada. El hierro es el conductor positivo, mientras que para el conductor negativo se recurre a una aleación de 55 % de cobre y 45 % de níquel (constantán). Las termocuplas Tipo J resultan satisfactorias para uso continuo en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes y en vacío hasta 760° C. Por encima de 540° C, el alambre de hierro se oxida rápidamente, requiriéndose entonces alambre de mayor diámetro para extender su vida en servicio. La ventaja fundamental de la termocupla Tipo J es su bajo costo.

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

### **2.1.2. Termocupla tipo K.**

Conocida como la termocupla *Chromel-Alumel*. El *Chromel* es una aleación de aproximadamente 90% de níquel y 10% de cromo, el *Alumel* es una aleación de 95% de níquel, más aluminio, silicio y manganeso, razón por la que la norma IEC la especifica NiCr - Ni. La Tipo K es la termocupla que más se utiliza en la industria, debido a su capacidad de resistir mayores temperaturas que la termocupla Tipo J.

Las termocuplas Tipo K pueden utilizarse en forma continua en atmósferas oxidantes e inertes hasta 1.260° C y constituyen el tipo más satisfactorio de termocupla para uso en atmósferas reductoras o sulfurosas o en vacío.

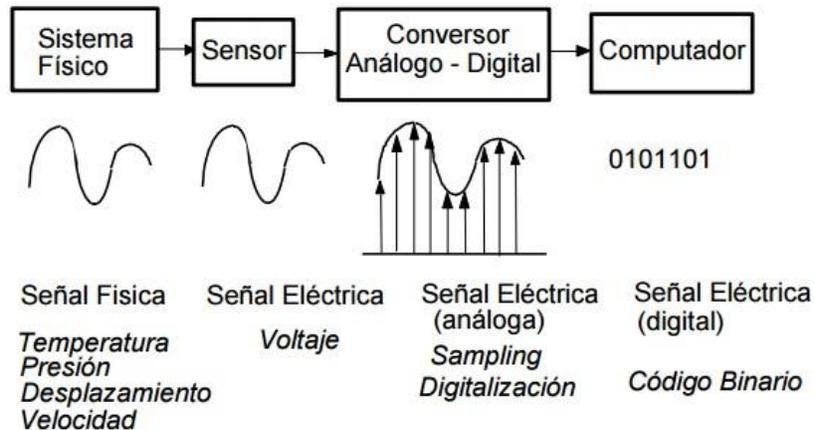
### **2.1.3. Efecto Seebeck**

Thomas J. Seebeck descubrió que en un circuito formado por dos metales distintos homogéneos, A y B, con dos uniones a diferente temperatura, T y T+ΔT, se establece un flujo de corriente eléctrica J, o bien, si se abre el circuito una fuerza termo electromotriz (f.t.e.m.) EAB que depende de los metales utilizados en la unión y de la diferencia de temperatura entre las dos uniones. (Galperin, 2001).

## **2.2. Conversor análogo digital**

Un conversor análogo digital o ADC por sus siglas en inglés, tiene como objeto básico transformar una señal eléctrica análoga en un número digital equivalente. Esta función exige que los pasos intermedios se realicen de manera óptima, ello para no perder información. Según el tipo de componentes y su aplicación existen distintos parámetros que lo caracterizan, estos son: velocidad de conversión, la resolución, los rangos de entrada, etc.

En la figura 1 podemos observar la secuencia de una conversión análoga digital por medio de un diagrama de bloques. (Huircán, 2016).



**Figura 1:** Secuencia de una conversión análoga digital a través de un diagrama de bloques.

Fuente: (Huircán, 2016)

### 2.2.1. Modulo para termocupla MAX6675

La tarjeta de control MAX6675 realiza la compensación y linealización de la respuesta del sensor con un ADC. La resolución es de 0.25° y el rango de uso de la tarjeta es de 3.0V a 5.5V, por lo que se pueden utilizar con cualquier microcontrolador o tarjeta de desarrollo como un Arduino (Vistrónica, 2016). En la figura 2 podemos observar la tarjeta de control.



**Figura 2.** Tarjeta de control MAX6675. Fuente: Autor

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

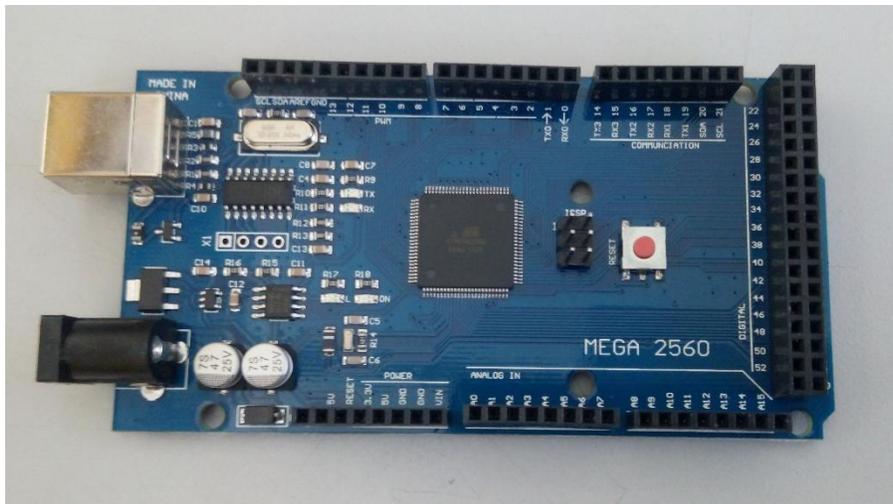
### 2.2.1.1. Características de la tarjeta de control

- Interfaz compatible con SPI solo de lectura.
- Resolución de 12 bits, 0.25 grados centígrados.
- Precisión:  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$
- Medición hasta 1024 grados centígrados.
- Alimentación de 3.3 a 5 volts.
- Temperatura de medición:  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$
- Frecuencia de reloj SPI máxima F<sub>scl</sub> 4.3 Mhz.
- Tiempo de conversión 0.17 s máximo 0.22 segundos.
- Consumo máximo de 1.5 mA.
- Dimensiones: 25mm x 15mm x 13mm

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

### 2.2.2. Arduino

Arduino es una plataforma de creación de prototipos de código abierto básico y fácil de usar en hardware y software, compuestas por una placa con un microcontrolador capaz de leer entradas las cuales las convierte en salida. Para su programación se utiliza el lenguaje de programación de Arduino (basado en cableado) y el software de Arduino (IDE) el cual es libre. (Arduino, 2016). En la figura 3 podemos observar la placa de Arduino Uno.



**Figura 3.** Placa de Arduino Mega. Fuente: Autor

### 2.3. Tipos de contactores

Un contactor es un aparato mecánico de conexión con una sola posición de reposo. Un contactor es capaz de establecer, soportar e interrumpir la corriente en el circuito donde está instalado en condiciones normales de utilización. (Universitat Politècnica de València, 2016).

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

### **2.3.1. Contactor de mercurio**

Un contactor de mercurio es un dispositivo cuya función es permitir o interrumpir el flujo de corriente eléctrica, dependiendo de su alineamiento relativo con una posición vertical, ya que trabaja por medio de una ampolla de cristal sellado que contiene cierta cantidad de mercurio. Este tipo de contactores puede durar hasta 15 veces más. El contactor de mercurio puede trabajar en ambientes de donde hay presencia de polvo. Este tipo de contactores aprovecha una propiedad inusual del mercurio, éste conduce la electricidad fácilmente y es líquido a temperatura ambiente. Esto quiere decir que reacciona al movimiento.

### **2.3.2. Contactor de estado sólido**

Un contactor de estado sólido cumple la misma función que los contactes básicos con bobinas en su interior, pero con la diferencia de que no tienen partes móviles en su interior y el paso de la corriente la regulan tiristores internos, los cuales son muchos más confiables en aplicaciones de alta exigencia y con altas frecuencias de conmutaciones. En la figura 4 podemos observar uno de los tantos tipos de contactores de estado sólido que existen actualmente en el mercado. (Schneider Electric, 2013).

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



**Figura 4:** Contactor de estado sólido. Fuente: (Schneider Electric, 2013)

## 2.4. Kanthal

Kanthal es un tipo de aleación compuesta por hierro y cromo (20-30%), aluminio (4-7.5%), se conoce también como FeCrAl. Es un tipo de material que tiene una resistencia muy alta y es capaz de soportar temperaturas de hasta 1425°C (2600°F). (Kanthal, 2016).

## 2.5. Estado del arte

### 2.5.1. Sistema intercambiador de calor

#### 2.5.1.1. Diseño y construcción de un intercambiador de calor directo para horno cubilote.

Un horno cubilote es un horno vertical empleado para fundir el hierro (ver figura 5), el cual para mejorar la eficiencia del equipo se inyecta aire caliente que permite realizar una mejor

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

combustión al interior del horno, el cual aprovecha el calor sensible del horno, con ello mejora su eficiencia térmica. El aprovechamiento el aire que sale del horno evita la utilización de algún combustible fósil para el funcionamiento del mismo, de esta manera se contribuye a disminuir las emisiones de agentes contaminantes. (López & Trejos, 2013).



**Figura 5.** Modelo de horno Cubilote. Fuente: (López & Trejos, 2013)

El horno cubilote es muy utilizado para la obtención de fundición gris debido a:

- Fusión continua
- Bajo costo de fusión
- Control de la composición química
- Control de temperatura

#### **2.5.1.1.1. Pre calentamiento de aire en el cubilote.**

Para mejorar la eficiencia del cubilote, se inyecta aire caliente a la cama de combustión, al utilizar los gases de combustión en un intercambiador de calor se puede calentar aire y se evita el uso de un medio externo para obtener dicho objetivo.

Al precalentar el aire en el horno cubilote se aumentan tanto la eficiencia como la velocidad de combustión del mismo y la obtención de temperaturas más altas, comparado con el

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

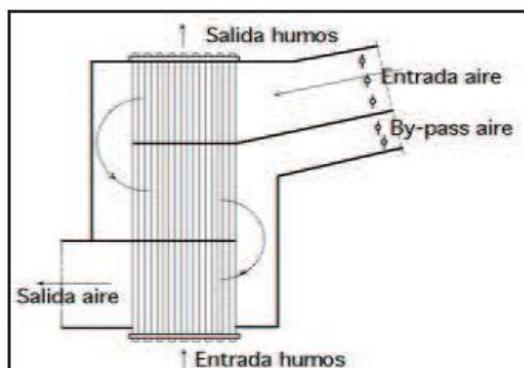
sistema con aire frío. Por ello en este trabajo se estudia la manera de facilitar la operación y reducir los costos de mantenimiento.

### 2.5.1.1.2. Selección de recuperador de calor.

En (López & Trejos, 2013) se evaluaron tres alternativas de selección del recuperador de aire: Intercambiador de calor de coraza tubo, calentador de tipo recuperativo y recuperador de calor tipo Griffin. Después de evaluar las características de cada uno de los sistemas de recuperación de calor mencionados anteriormente, se seleccionó la mejor opción, esta fue el calentador de tipo recuperativo, puesto que cumple con las especificaciones de eficiencia requerida por el autor en el horno cubilote.

Calentador tipo recuperativo: los calentadores de aire tubulares verticales son aquellos en los cuales los gases circulan por el inferior de los tubos y el aire realiza varios pasos en flujo cruzado a contracorriente, su diseño se realiza bajo criterios técnico-económico basados en el primer principio de la termodinámica.

Este calentado recuperativo transfiere calor a través de una superficie de intercambio térmico, que garantiza la separación de los flujos de humos y aire que llegan al calentador, esta superficie puede estar conformada por un conjunto de tubos y un conjunto de placas paralelas como se muestra en la figura 6.



**Figura 6.** Esquema del calentador de aire tipo recuperativo. Fuente: (López & Trejos, 2013)

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

Al culminar el análisis del estudio de la viabilidad y la construcción del sistema recuperador de calor se verifica el cumplimiento de los objetivos propuestos por el trabajo puesto que el intercambiador de calor alcanza la temperatura requerida, lo que implica que se obtiene un ahorro en el combustible y un aumento en la eficiencia del horno. (López & Trejos, 2013).

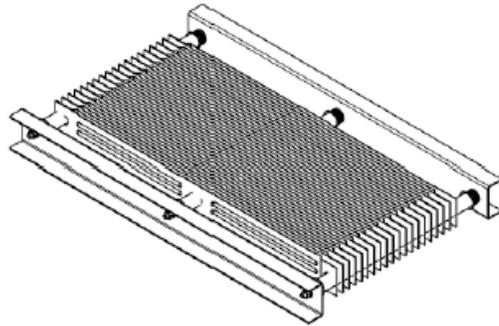
### **2.5.2. Sistema de resistencias eléctricas.**

En (Perez & Parrondo, 2013) se presenta un estudio sobre la disipación de energía térmica en resistencias eléctricas como las que se emplean en el frenado de trenes. Para dicho estudio emplearon el software Ansys Fluent. Al momento de realizar el frenado de un tren se disipa demasiada energía. Actualmente se emplean discos de freno para su detención, con este sistema se presenta siempre un desgaste, lo cual genera un alto gasto de mantenimiento y reemplazo de piezas.

En esta referencia bibliográfica se propone una alternativa como es el frenado regenerativo, esta alternativa es más viable desde el punto de vista energético, ya que al realizar el frenado los motores transforman la energía cinética del tren en energía eléctrica.

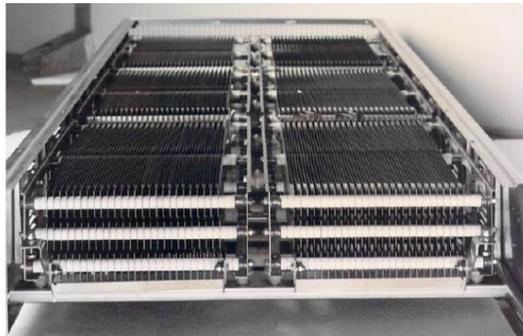
En el momento de realizar el diseño de las resistencias, se debe saber de antemano el área predefinida y normalmente estas zonas son de muy pequeñas dimensiones y presentan condiciones de trabajo muy severas, por lo que se deben diseñar disminuyendo las dimensiones y el peso. Estas resistencias deben tener una alta resistencia a la vibración, fácil mantenimiento y alta durabilidad. Para ello es necesario que las resistencias no alcancen cierta temperatura en su operación, esto depende del material y otros factores. Por este motivo se requiere refrigerar las resistencias mediante convección natural de la corriente de aire del ambiente. En la figura 7 se evidencia en detalle de la parrilla empleada por el autor.

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



**Figura 7.** Detalle de una parrilla de resistencias. Fuente: (Perez & Parrondo, 2013)

Para la simulación de este estudio se analizó una resistencia compuesta por 18 bloques de resistencias con una distribución homogénea de 2 filas de tres columnas y con una altura de tres niveles como se muestra en la figura 8 (Perez & Parrondo, 2013).

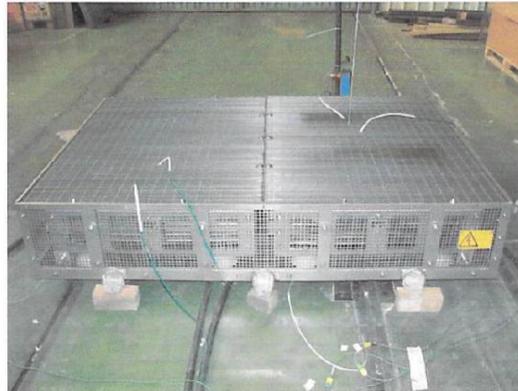


**Figura 8.** Resistencia simulada. Fuente: (Perez & Parrondo, 2013)

Se realizaron una serie de pruebas y simulaciones, donde compararon los resultados del modelo de resistencia propuesta con otro modelo de otras dimensiones.

Se diseñó el prototipo y se expuso a condiciones similares de operación para la toma de datos como temperatura en distintos puntos, la potencia en la que se ha estabilizado la resistencia, con lo cual comprueban muchos de los datos obtenidos en la simulación. En la figura 9 se evidencia el ensayo de las resistencias. (Perez & Parrondo, 2013).

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



**Figura 9.** Ensayo de la resistencia. Fuente: (Perez & Parrondo, 2013)

### 2.5.2.1. Tipos de resistencias eléctricas para hornos industriales

En la industria, los fabricantes de resistencias y de hornos eléctricos tienen diferentes tipos y materiales para la fabricación de las resistencias eléctricas, estos dependen para el uso o aplicación. En la figura 10 (Resistencias Tópe S.A., 2016) se muestra una resistencia con aletas helicoidales de acero inoxidable, la cual es especialmente para el calentamiento de gases a temperaturas máximas de aire de 400°C.



**Figura 10:** Resistencia de aletas helicoidales. Fuente: (Resistencias Tópe S.A., 2016)

En la figura 11, (TRE C, 2016) muestra las resistencias tubulares lisas, las cuales se adaptan a una variedad de aplicaciones industriales donde es necesario calentar el aire, su función consiste en generar corrientes de aire o de gas a una determinada temperatura o en

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

mantener los ambientes a temperaturas controladas, los materiales empleados para estas resistencias son el acero al carbón y el acero inoxidable.



**Figura 11:** Resistencias tubulares lisas. Fuente: (TRE C, 2016)

En la figura 12, (RINDESA, 2016), nos muestra las resistencia eléctrica hechas en forma de espiral, este tipo de resistencias se usan principalmente para hornos que alcanzan altas temperaturas hasta los 1000 a 1200 °C, pueden estar soportadas con aisladores cerámicos de variados diseños (como las parrillas calefactoras, resistencias para aire forzado, calefactores de ductos de aire, etc.).



**Figura 12:** Resistencia tipo espiral 1. Fuente: (RINDESA, 2016)

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

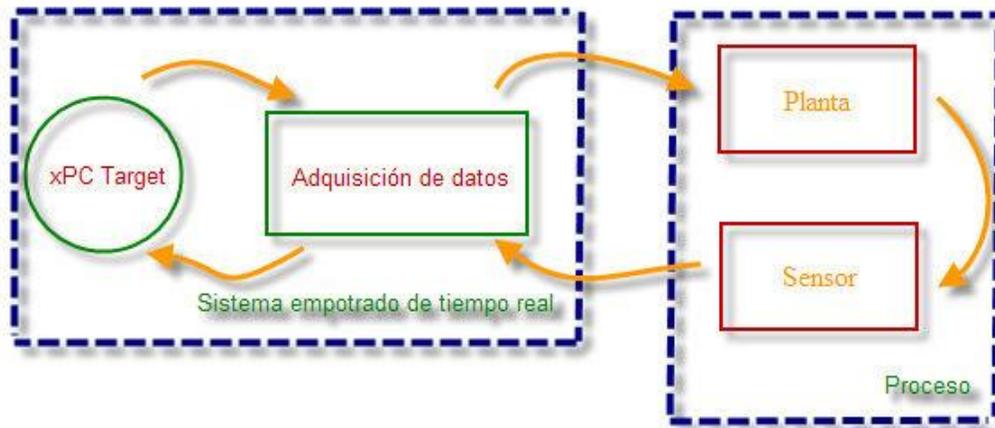


**Figura 13:** Resistencia tipo espiral 2. Fuente: (Resista, 2016)

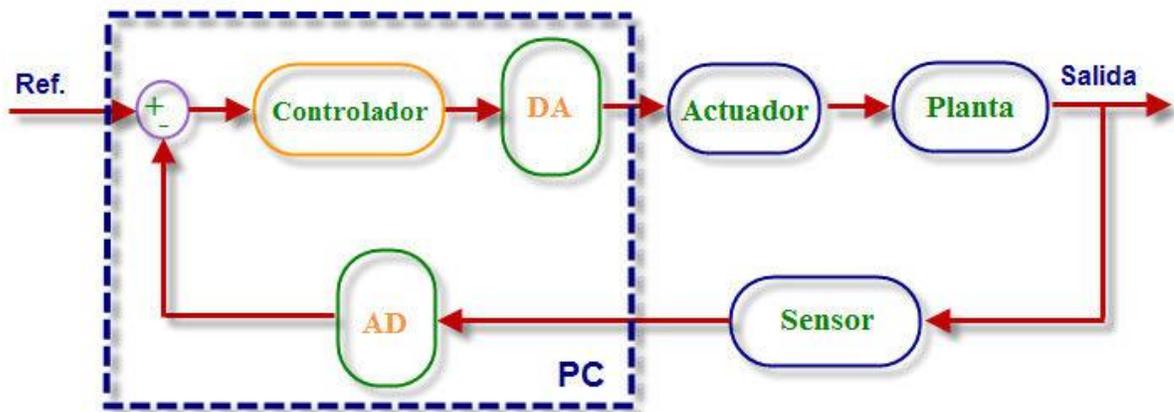
## **2.6. Sistema de adquisición de datos.**

### **2.6.1. Desarrollo de sistema de control de temperatura.**

En (Olejua & Ospina, 2008) plantean implementar un sistema de control en tiempo real usando la herramienta xPC-Target de MATLAB®. Es un sistema que puede controlar un proceso como la temperatura, la presión o el nivel de un tanque. El sistema adquiere una señal medida por un sensor de temperatura utilizando una tarjeta de adquisición de datos. Esta señal se procesa en el sistema empotrado de tiempo real que a su vez genera la acción de control utilizando una de las salidas de la tarjeta de adquisición de datos. En la figura 14 se presenta un esquema del sistema de control en tiempo real y en la figura 15 el sistema de control digital planteado por el autor.



**Figura 14.** Esquema del sistema de control en tiempo real. Fuente: (Olejua & Ospina, 2008)



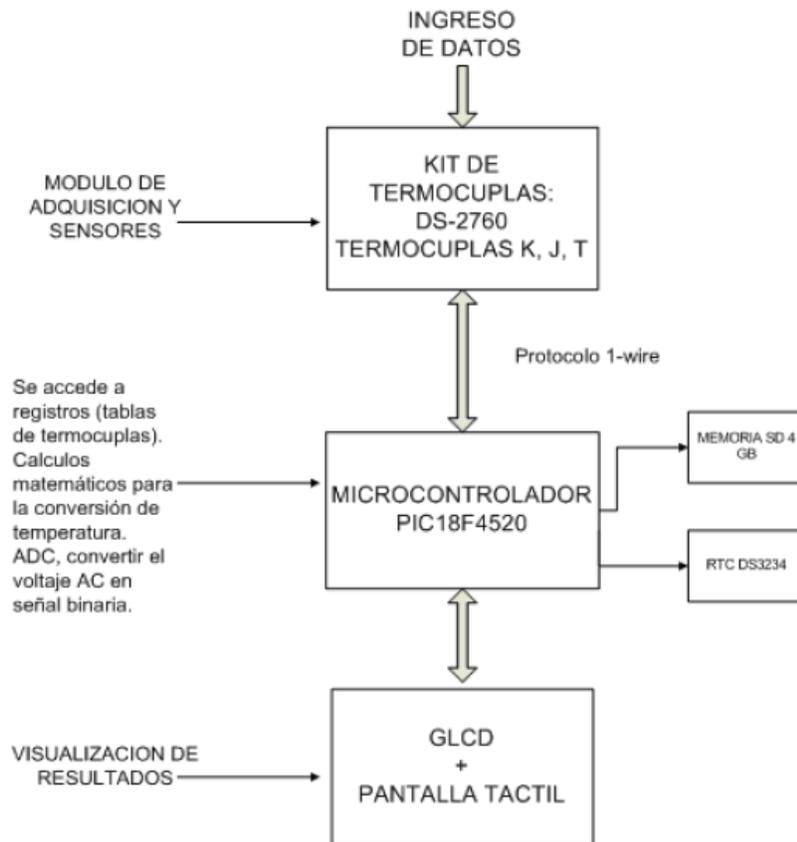
**Figura 15.** Sistema de control digital. Fuente: (Olejua & Ospina, 2008)

En (Sac & García, 2007) se pretende diseñar un control y monitoreo de temperatura vía PC, en donde utilizarán circuitos convertidores analógico/digital para convertir el valor de la temperatura en un formato digital; también utilizarán el PIC16F84A que será el encargado de procesar la señal digital para la visualización en el PC; un circuito integrado MAX232 que será el encargado de solucionar los problemas de niveles de voltaje cuando se envían señales digitales hacia el puerto serial.

En medio de la investigación se encontró un tercer trabajo de grado de la Escuela Superior Politécnica Del Litoral para obtener el título de ingeniero en electrónica, en donde diseñan

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

una interfaz gráfica que es capaz de mostrar los datos de temperatura obtenidos por las termocuplas K, J y T; a través de un software llamado MicroC Pro y Proteus logran comunicar una memoria SD de 4 Gb en donde están guardados los datos de temperatura de las termocuplas con un microcontrolador, para luego mostrar esto en una pantalla táctil GLCD en la figura 16 vemos el diagrama de bloques de intercomunicación empleado por el autor. (Contreras & Mite, 2011).



**Figura 16:** Diagrama de bloques intercomunicación (termocuplas, microcontrolador, GLCD, memoria SD, RTC DS3224). Fuente: (Contreras & Mite, 2011)

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

### 3. METODOLOGÍA

---

Para el proceso de investigación y desarrollo del siguiente proyecto se hará uso de las bases de datos con las que cuenta la universidad actualmente. Se empleará el prototipo ubicado en el laboratorio de mecánica de fluidos de la institución. Se contará con la asesoría del laboratorista Vladimir Imbol, del mismo laboratorio y con el docente Diego Muñoz del cual este proyecto hace parte de uno de los objetivos de la tesis de maestría para otorgar el título de Magister en Gestión Energética del Instituto Tecnológico Metropolitano. La metodología es la siguiente:

- Como primer paso se evaluará la eficiencia de las resistencias que actualmente tiene el prototipo por medio de simulaciones o termogramas realizados por una cámara termográfica, ello para poder realizar pruebas de comparación con las futuras resistencias a diseñar.
- Para condiciones similares de operación se investigará sobre las diferentes geometrías de resistencias eléctricas comerciales, adicionalmente se propondrán diseños cumpliendo con los requisitos para obtener la eficiencia deseada, por medio de la modificación de su geometría.
- Se procederá a simular cada geometría seleccionada por medio de algún software o empleando una cámara termográfica, donde evaluaremos la capacidad de transferencia de calor y el desempeño de las resistencias.
- A través de los resultados obtenidos sobre la eficiencia de cada simulación seleccionar la resistencia adecuada que cumpla con los requerimientos del prototipo.
- Fabricar las resistencias con base en los resultados obtenidos.
- Estudiar el comportamiento de las termocuplas para establecer una correcta comunicación con el dispositivo electrónico a diseñar.

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

- Se investigará sobre los diferentes controladores, *datalogger* y circuitos, para diseñar un dispositivo electrónico de almacenamiento de datos de temperatura.
- Estudiar la interfaz adecuada que sea compatible con dispositivo electrónico y el computador (software).
- Realizar pruebas con diferentes software y determinar el mejor y más efectivo en genere las gráficas requeridas
- Analizar los diferentes elementos de control y potencia de accionamiento rápido y de larga duración (relé estado sólido, contactor de mercurio, etc.), y escoger el más óptimo para instalar en el prototipo.

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

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Para las modificaciones que se llevaron a cabo se conservó el diseño original del prototipo planteado y fabricado por (Imbol Rúa, 2015). En la figura 17 se muestra el prototipo del recuperador original, sin ninguna modificación:



**Figura 17.** Prototipo del recuperador de calor completo. Fuente: (Imbol Rúa, 2015).

### 4.1. Rediseño del sistema de calentamiento del aire

En esta sección se realizaron una serie de averiguaciones con personal experto en el tema de la fabricación de resistencias, contamos con la asesoría del señor Rogelio Zapata, el cual lleva 42 años en la fabricación de resistencias para hornos.

Se realizaron las respectivas simulaciones de las diferentes geometrías seleccionadas, asimismo se simuló el tipo de resistencia actual para comparar las eficiencias con las

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

geometrías seleccionadas y de dichos resultados escoger la ideal y que cumpla con las expectativas de eficiencia.

La simulación la realizamos de manera real empleando una cámara termográfica marca FLUKE Ti25 (ver cámara en la figura 18), en la que era necesario conocer los coeficientes de emisividad de los materiales a los que se tomaron las fotos termográficas, es decir, cuando se usa una cámara termográfica, ésta se debe apuntar a un punto específico, en este caso los materiales son el cilindro de acero que va dentro del intercambiador de calor del cual se realizarán los análisis y pruebas, y el ladrillo del material refractario AU-23. En la tabla 1 se muestran los coeficientes de emisividad de los materiales a los que se le realizaron las pruebas.

<b>MATERIAL</b>	<b>COEFICIENTE DE EMISIVIDAD <math>\epsilon</math></b>
Acero	0.52
AU-23	0.94

**Tabla 1:** Coeficiente de emisividad. Fuente: (TESTO, 2016)



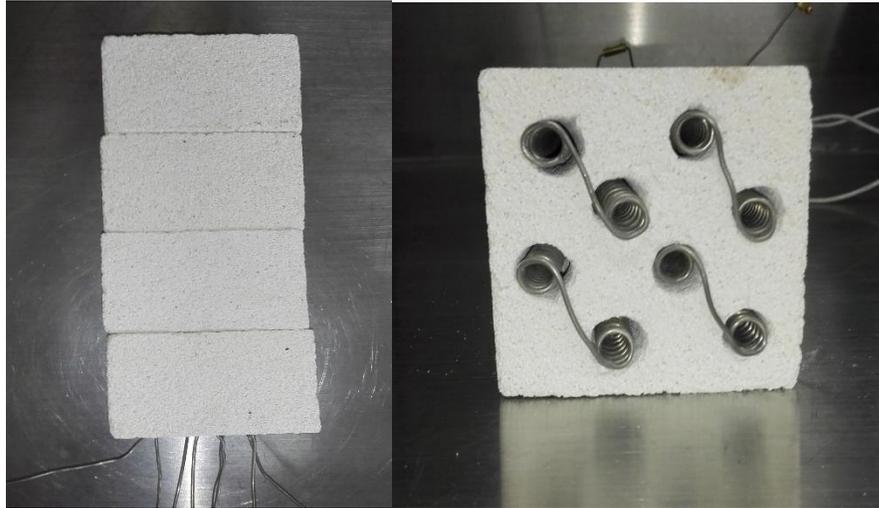
**Figura 18:** Cámara termográfica FLUKE Ti25. Fuente: Autor

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

#### 4.1.1. Selección de las resistencias

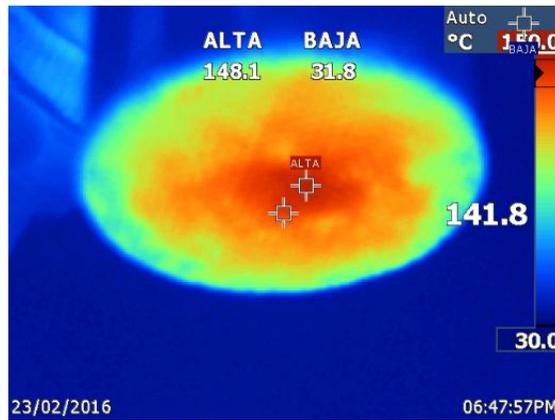
##### 4.1.1.1. Resistencia 1

La resistencia 1 está compuesta por alambre Kanthal A1 de un diámetro de 1.8mm, compuesta por 4 resistencias conectadas en serie alimentadas a 110V, con una resistencia de 10Ω. La resistencia está en una estructura compuesta por 4 cubos de ladrillo refractario AU-23 cada uno mide (9.8x9.8x6.4 cm), con 8 orificios de 1.5cm de diámetro distribuidos de manera equidistante. En la figura 19 se observa el diseño de la resistencia 1.

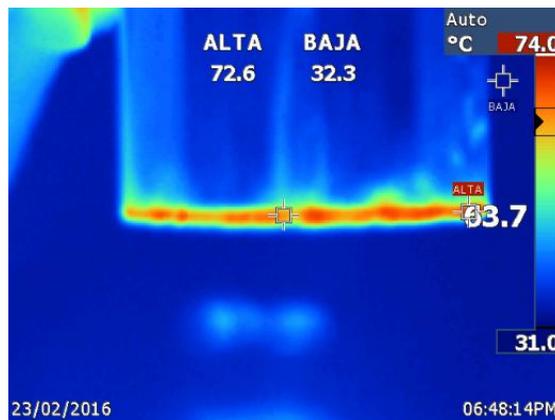


**Figura 19:** Diseño resistencia 1. Fuente: Autor

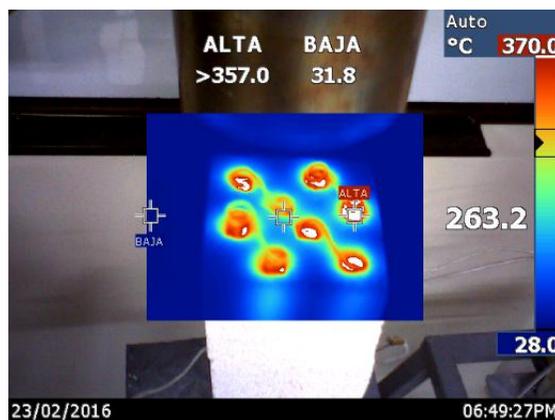
En las Figuras de la 20 a la 23 se observa los resultados de las simulaciones hechas con la cámara termográfica FLUKE Ti25:



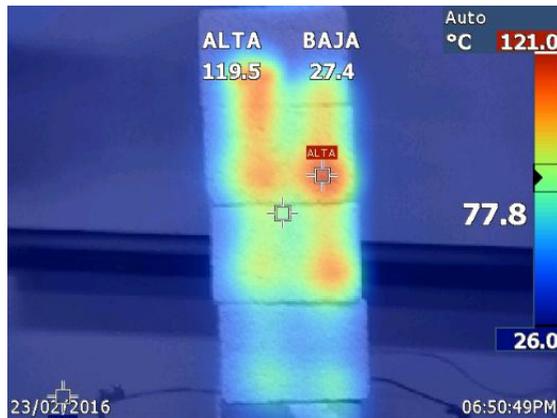
**Figura 20:** Foto termográfica parte inferior de cilindro de acero. Fuente: Autor.



**Figura 21:** Foto termográfica parte posterior de cilindro de acero. Fuente: Autor.



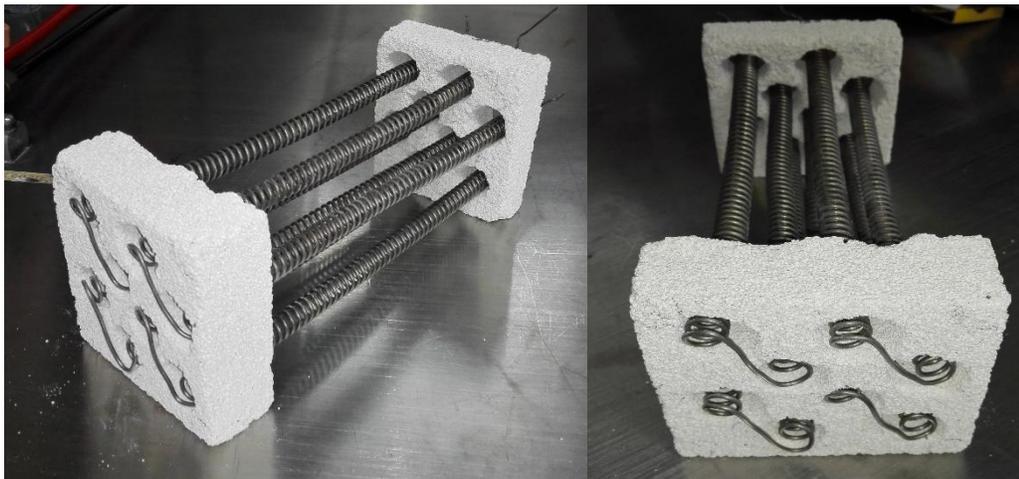
**Figura 22:** Foto termográfica parte superior de la resistencia. Fuente: Autor.



**Figura 23:** Foto termográfica parte posterior del material refractario. Fuente: Autor.

#### 4.1.1.2. Resistencia 2

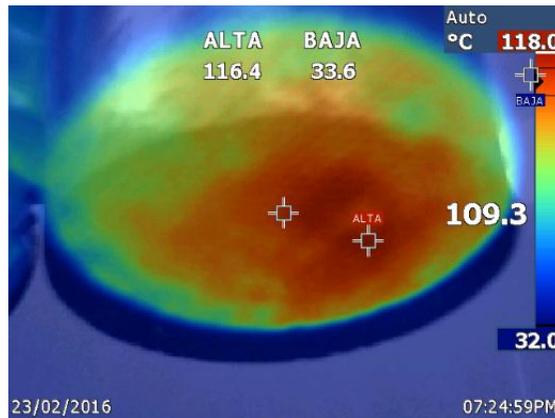
La resistencia 2 está compuesta por alambre Kanthal A1 de un diámetro de 1.8mm, compuesta por 4 resistencias conectadas en serie alimentadas a 110V, con una resistencia de 10Ω. La resistencia está en una estructura compuesta por 2 cubos de ladrillo refractario AU-23 cada uno mide (9.8x9.8x3 cm) uno de ellos en la parte superior y otro en la parte inferior, con 8 orificios de 2cm de diámetro distribuidos de manera equidistante. En la figura 24 podemos observar el diseño de la resistencia 2.



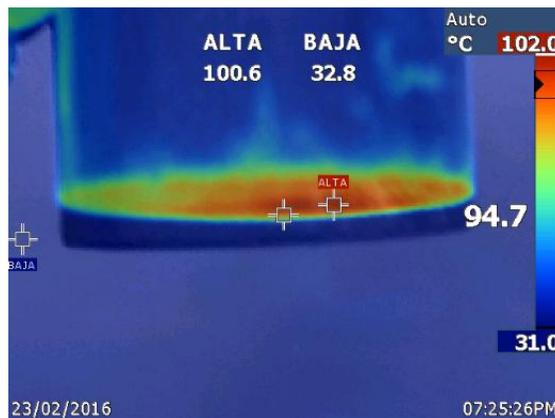
**Figura 24:** Diseño resistencia 2. Fuente: Autor

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

En las Figuras de la 25 a la 28 podemos observar los resultados de las fotos termográficas hechas con la cámara termográfica FLUKE Ti25:

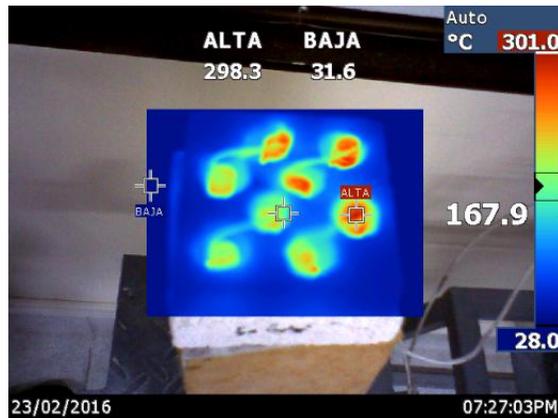


**Figura 25:** Foto termográfica parte inferior de cilindro de acero. Fuente: Autor.

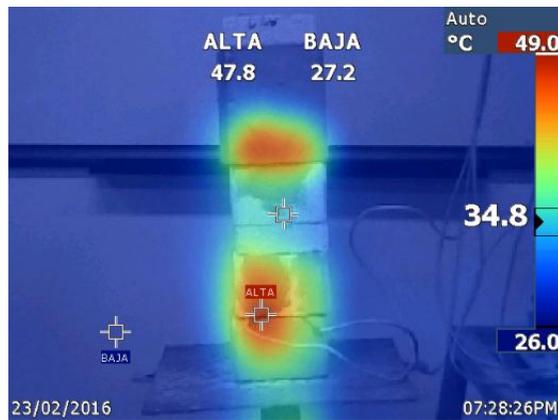


**Figura 26:** Foto termográfica parte posterior de cilindro de acero. Fuente: Autor.

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



**Figura 27:** Foto termográfica parte superior de la resistencia. Fuente: Autor.



**Figura 28:** Foto termográfica parte posterior del material refractario. Fuente: Autor.

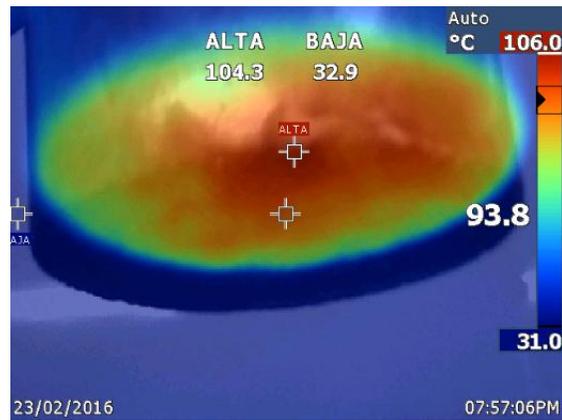
#### 4.1.1.3. Resistencia 3

La resistencia 3 es la resistencia del prototipo original, está compuesta por alambre Kanthal A1 de un diámetro de 1mm, compuesta por 2 resistencias conectadas en paralelo alimentadas a 220V, con una resistencia de 26.8Ω. La resistencia está en una estructura compuesta por 2 cubos de ladrillo refractario AU-23 cada uno mide (10x10x6.4 cm), con 20 orificios de 2cm de diámetro distribuidos de manera equidistante. En la figura 29 se observa el diseño de la resistencia 3 la cual es la resistencia del prototipo original.

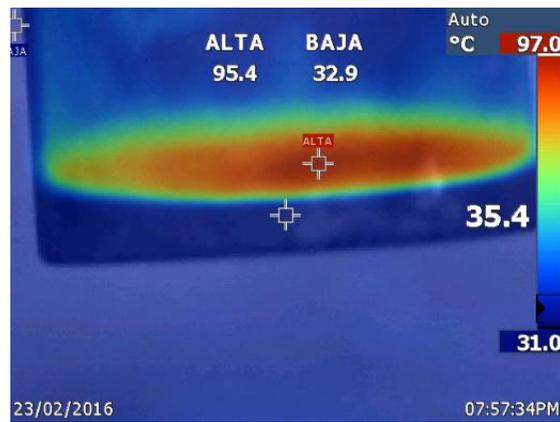


**Figura 29:** Diseño resistencia 3. Fuente: Autor

En las Figuras de la 30 a la 33 se puede observar los resultados de las fotos termográficas hechas con la cámara termográfica FLUKE Ti25:



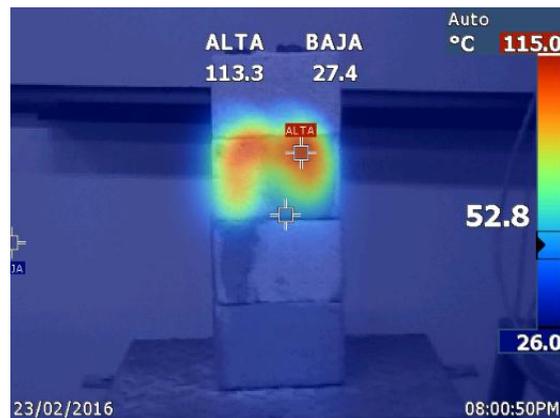
**Figura 30:** Foto termográfica parte inferior de cilindro de acero. Fuente: Autor.



**Figura 31:** Foto termográfica parte posterior de cilindro de acero. Fuente: Autor.



**Figura 32:** Foto termográfica parte superior de la resistencia. Fuente: Autor.

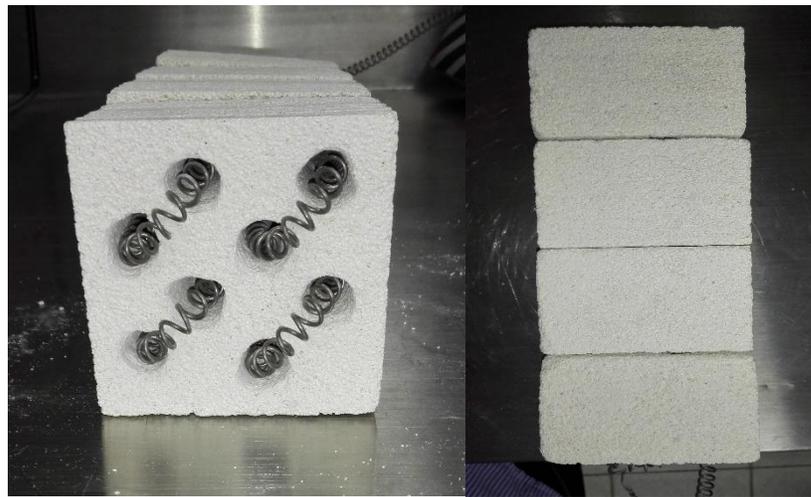


**Figura 33:** Foto termográfica parte posterior del material refractario. Fuente: Autor.

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

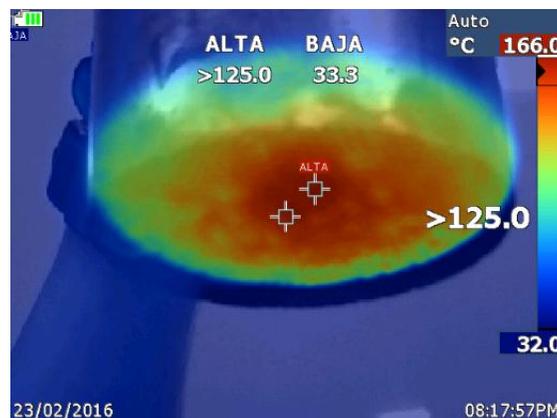
#### 4.1.1.4. Resistencia 4

La resistencia 4 está compuesta por alambre Kanthal A1 de un diámetro de 1.8mm, compuesta por 1 resistencia alimentadas a 110V, con una resistencia de 2.5Ω. La resistencia está en una estructura compuesta por 4 cubos de ladrillo refractario AU-23 cada uno mide (9.8x9.8x6.4 cm), con 8 orificios de 2cm de diámetro distribuidos de manera equidistante. En la figura 34 se puede observar el diseño de la resistencia 4.



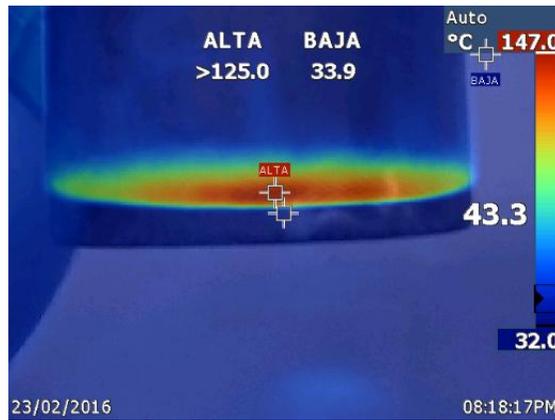
**Figura 34:** Diseño resistencia 4. Fuente: Autor

En las Figuras de la 35 a la 38 se observa los resultados de las fotos termográficas hechas con la cámara termográfica FLUKE Ti25:

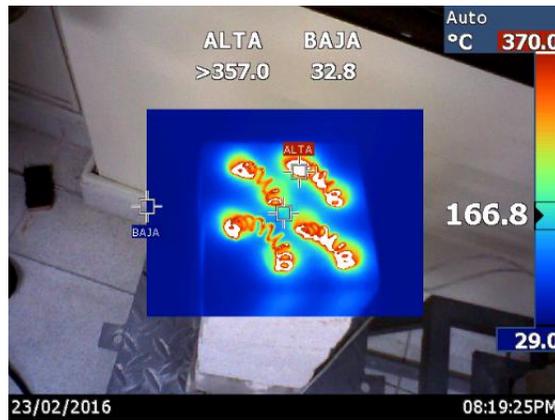


**Figura 35:** Foto termográfica parte inferior de cilindro de acero. Fuente: Autor.

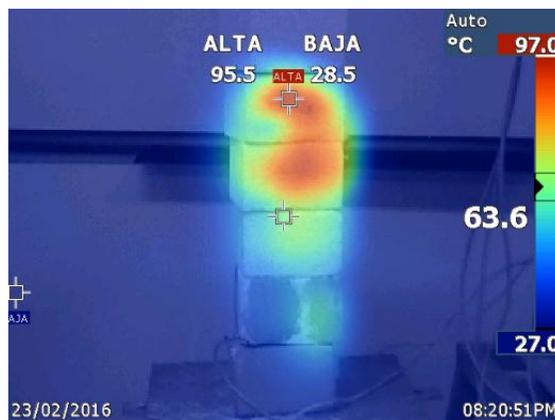
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 36:** Foto termográfica parte posterior de cilindro de acero. Fuente: Autor.



**Figura 37:** Foto termográfica parte superior de la resistencia. Fuente: Autor.



**Figura 38:** Foto termográfica parte posterior del material refractario. Fuente: Autor.

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

#### **4.1.2. Análisis de los termogramas**

De las figuras anteriores tomadas por la cámara termográfica y realizando el respectivo análisis térmico en cuanto a la eficiencia de la mejor resistencia probadas en el laboratorio en condiciones de trabajo real se puede decir que:

En la primera foto térmica de cada una de las tomas la que presentó mejores resultados fue la resistencia 4, la cual en el primer minuto de la toma la superficie del cilindro alcanzó 166°C, es decir la temperatura más alta en el mismo tiempo de la toma de datos.

En la segunda foto se ve de igual forma que la resistencia 4 es la que tiene mayor temperatura desde el mismo ángulo de la toma de datos.

En la tercera foto la diferencia no es significativa, las resistencias 1, 3 y 4 tienen los mismos valores 370°C.

En la foto número 4 de cada una de las tomas, podemos observar que la resistencia 2 y la resistencia 4 presentan menos fugas de calor, 49 y 97 °C respectivamente, pero teniendo en cuenta que la resistencia 4 fue la que alcanzó la mayor temperatura al comienzo de la prueba se puede decir que el diseño de la resistencia 4 es la más eficiente de todas las resistencias analizadas con la cámara termográfica.

La selección de la resistencia se realizó con base en los resultados obtenidos en las fotos con la cámara termográfica y que el diseño cumpliera con las modificaciones planteadas, es decir, que el diseño no obstruyera el paso del aire previamente calentado, ya que el diseño original contaba con unos orificios de un diámetro muy pequeño que impedía el paso del aire y esto disminuía la presión del mismo. Adicionalmente que el tipo y material de la resistencia soportara las condiciones de trabajo, puesto que esta se debilitaba con el tiempo y se dañaba.

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

#### 4.1.3. Fabricación de la resistencia

Para la fabricación de la resistencia se seleccionó uno de los materiales más comunes para dichas resistencias, alambre de Kanthal A-1, el cual tiene gran resistencia y alcanza una temperatura máxima de 1425°C. Dicho alambre seleccionado tiene un diámetro de 1.8mm. Este tipo de material es usado comúnmente para la fabricación de resistencias de hornos industriales, por lo que es de fácil consecución y precio. En la figura 34 se muestra la resistencia seleccionada.

Temperatura máxima de operación	1400°C
Composición nominal %: Cr	22
Cr	5,8
Al	Balance
Densidad g/cm <sup>3</sup>	7,1
Resistividad a 20°C Ω mm <sup>2</sup> /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 <sup>2</sup>	680
Punto de fluencia N/mm <sup>2</sup>	545
Elongación a la ruptura %	20
Diámetro en mm	1
Resistencia a 20°C Ω/m	1,85
Área de la sección transversal	0,785

**Tabla 2.** Propiedades del alambre Kanthal A1. Fuente: (Kanthal, 2016)

Para evitar que las resistencias hagan contacto entre sí al interior del intercambiador de calor, se colocó un cubo del material refractario en la parte inferior y superior sujetas con unos soportes de material cerámicos que evitan que dichas bases se muevan, en la figura 39 se muestran las bases del material refractario. Este proviene de un ladrillo refractario aislante, según la investigación previa a (Imbol Rúa, 2015), (Velásquez Gomez & Aragón Molina, 2014) emplea el ladrillo refractario UA-23, el cual se seleccionó por su facilidad para

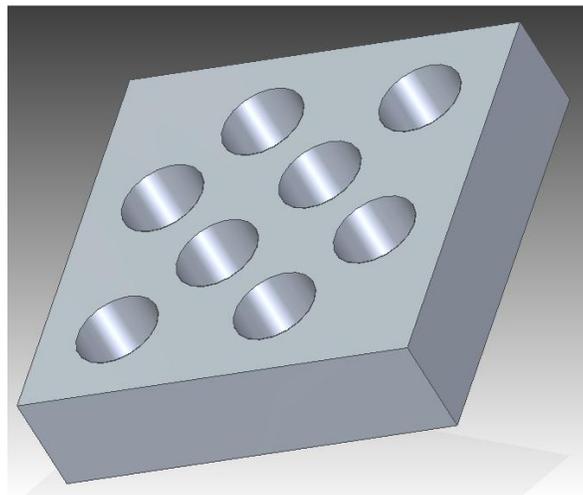
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

hallarlo en el mercado, tiene buenas propiedades para aislar, posee un gran número de burbujas de aire dispersas uniformemente y es de fácil manejo.



**Figura 39:** Bases de las resistencias en material refractario. Fuente: Autor

En la base de la figura anterior se realizaron 8 orificios con un diámetro de 1.5 cm, los cuales fueron hechos de manera equidistantes y con un diámetro mucho mayor al prototipo anterior, las dimensiones de las bases son de (9.8x9.8x6.4 cm), esto para no obstruir el flujo de aire al interior de intercambiador. La distribución seleccionada se muestra en la figura 40.



**Figura 40:** Distribución de los orificios. Fuente: Autor

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

El diseño anterior eran dos resistencias compuesta por 2 bloques de ladrillo refractario UA-23 de (10x10x6.4 cm), con 20 orificios por donde pasaba el alambre de la resistencia, el cual era de un calibre menor, por ello para el diseño de la nueva resistencia los orificios que se hicieron fueron muchos más grandes. En la figura 34 tenemos la resistencia modificada ya terminada.

#### 4.1.4. Cálculo de las resistencias

Por ley de Ohm:

$$V = I * R \quad (1)$$

Donde:

V: Voltaje

I: Corriente

R: Resistencia

Además,

$$P = I * V \quad (2)$$

Donde:

P: Potencia

Empleando un multímetro se midió la resistencia de cada par de resistencias, donde el multímetro dio como resultado 2.5Ω, entonces despejando a I de la ecuación 1, tenemos:

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

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

Reemplazando los valores en la ecuación 3 tenemos que las 4 resistencias suman  $10 \Omega$ , entonces:

$$I = \frac{110V}{10\Omega} = 11A$$

Reemplazamos los valores en la ecuación 2, tenemos:

$$P = 11A * 110V = 1210W$$

Información obtenida a partir de los cálculos:

Voltaje de alimentación: 110V

Corriente de las resistencias: 11A

Resistencia por cada hilo resistivo:  $2.5\Omega$ ,  $10\Omega$  en total

Comparando los resultados obtenidos, con el nuevo diseño de la resistencia se requiere suministrar menor potencia para alcanzar la misma temperatura.

El alambre usado para nuestras resistencias tiene un diámetro de 1.8mm, es decir que la cantidad de ohmios por metros es de  $0.56 \Omega/m$ , ver tabla 2.

$\varnothing$ [mm]	$\Omega/m$	m/kg
1	1,84	179,3
1,2	1,28	124,5
1,3	1,09	106,1
1,5	0,82	79,7
1,6	0,72	70,05
1,8	0,56	55,35
2	0,46	44,83

**Tabla 3.** Cantidad de ohmios por metros según diámetros. Fuente: (Damfer, 2016)

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

Para el sistema de control se mantuvo la configuración que se planteó en el trabajo (Imbol Rúa, 2015). Para ello a continuación se describe cómo se realizó originalmente dicho ensamble.

#### **4.1.5. Ensamble sistema de control original**

##### **4.1.5.1. Caja y tablero de control**

Se instaló una caja donde en su interior están los componentes y los circuitos eléctricos necesarios para el funcionamiento del sistema de recuperador de calor. Las dimensiones de dicha caja son 300x300x105 mm, esta fue sujeta en la estructura base a través de tornillos y tuercas; la puerta de la caja se aprovecha para convertirla en tablero de control donde hay 5 displays para las respectivas mediciones, como se observa en la figura 41 (Imbol Rúa, 2015).



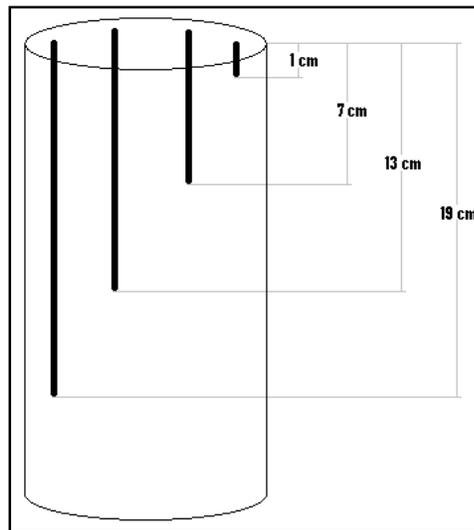
**Figura 41:** Tablero de control. Fuente: (Imbol Rúa, 2015)

Como se menciona en (Imbol Rúa, 2015), el prototipo final tiene la función de medir dos variables, ellas son la temperatura y la presión.

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

#### 4.1.6. Temperatura

La temperatura es la variable más importante para medir en las pruebas realizadas por el prototipo, ya que el cilindro-tapa tiene instalada 5 termopares para medir la temperatura en 5 puntos diferentes en la realización de las pruebas. La distribución de las termocuplas es como se muestra en la figura 42.



**Figura 42:** Esquema de distribución de termopares en cilindro móvil. Fuente: (Imbol Rúa, 2015)

##### 4.1.6.1. Sistema de adquisición de datos implementado

Se realizó un sistema de adquisición de datos que se muestra en tiempo real en un servidor, el servidor puede ser externo o interno, es decir, un servidor interno es transmitir la señal por medio de un Arduino Mega y un router a través de la red del mismo (por medio de la dirección IP), mientras que un servidor externo es adquirir esos datos de forma remota y real a través de la web. La diferencia es que el servidor interno trabaja en cierto radio de alcance del router (es limitado) y el servidor externo es remoto y en tiempo real y se puede adquirir desde cualquier parte del mundo.

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

La información adquirida por medio de las termocupas se va a almacenar en una tabla que va a estar disponible en un servidor web. Los registros tienen cierto tiempo de muestreo, por ejemplo cada 500 milisegundos se almacena un dato de temperatura de las 5 termocupas, cada dato es discriminado de acuerdo a la termocupla que corresponda.

Adicionalmente con los datos almacenados se realizará una gráfica que ayudará a interpretar la información. Hay tres formas para adquirir la gráfica: la primera es a través de HTML, es decir, que en el mismo servidor se realice la gráfica, el cual se debe tener ciertos conocimientos de programación; la segunda es a través de LabVIEW, pero al igual que el anterior opción, LabVIEW tiene ciertas líneas de códigos de programación por medio de Arduino, los cuales son muy diferentes; y la tercera es hacer un informe en Excel, la cual se hace de manera automática ya que es una opción del servidor web que hay disponible. De acuerdo al fácil manejo, se decidió optar por la tercera opción, la generación de la gráfica por Excel, ya que en Excel se puede obtener la ecuación característica de las gráficas, la cual es importante analizar en la continuación del presente trabajo para el informe de la tesis de maestría. Adicional si se quiere visualizar los datos desde cualquier computador o desde el Smartphone es más fácil emplear Excel que LabVIEW puesto que tendríamos que tener instalado el software en todos los dispositivos.

Se decidió trabajar con la plataforma de Arduino, ya que es de fácil programación, es mucho más comercial y de un bajo costo.

#### **4.1.6.2. Programación en Arduino**

En el apéndice A se puede observar el código de programación de Arduino. En este código se pueden ver las diferentes librerías que éste necesita para poder trabajar, en este caso las librerías para los módulos MAX6675 son para las termocupas tipo K que son las que se

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

están empleando, se escogieron estas porque son las más usadas en el mercado, por tanto son mucho más fáciles de conseguir y más económicas, adicional porque resisten temperaturas más altas en comparación con las tipo J. En el código podemos observar la Mac del Arduino Mega, la Mac es un código único que tiene cada placa de Arduino, las placas genuinas tienen una Mac diferente, en este caso como está empleando una placa genérica no es necesario cambiarla.

Como se va a adquirir los datos con el servidor interno se necesita conocer una dirección IP para visualizar los datos en la web, para ello se debe crear a través del router, una red privada que nos proporciona la dirección IP. En la figura 43 se observa el router empleado.



**Figura 43:** Router D-LINK empleado. Fuente: Autor

Físicamente se puede ver que cada módulo de termocupla tiene unos pines (ver figura 2), cada uno cumple diferente función: GND es la tierra, VCC es la alimentación a 5V, SCK, CS y SO. Se emplearon estos módulos para evitar la escalización de las termocuplas con el Arduino, ya que la señal de las termocuplas es análoga y los pines del Arduino es una señal digital, es decir, esto es un convertidor análogo-digital.

Dentro del código está definida cada termocupla desde la 1 hasta la termocupla 5, en este caso se emplearon las termocuplas tipo K, las cuales depende del tipo de termocupla para esto se debe tener una librería ya que los datos varían de acuerdo al tipo. En el apéndice B

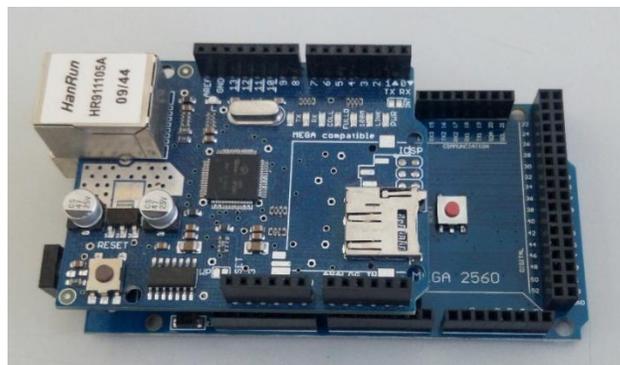
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

se observa una tabla donde se muestra que a diferente nivel de temperatura tiene diferente valor en milivoltios.

La comunicación hacia el PC se inicia por medio de una Shield Ethernet W5100, la cual permite a una placa de Arduino conectarse a internet, en nuestro caso para mostrar en el servidor los datos de temperatura. Esta placa se basa en la Wiznet 5100 chip Ethernet (hoja de datos). El W5100 ofrece una red (IP). Esta Shield es compatible hasta con cuatro conexiones de socket simultáneas; Para ello es necesario que en el código de programación de Arduino se descargue de igual forma la librería Ethernet. Este módulo tiene de igual forma una ranura de tarjeta micro SD para almacenar allí también los datos que se adquieran. (ARDUINO, 2016). En la figura 44 podemos observar la placa del módulo Ethernet W5100.



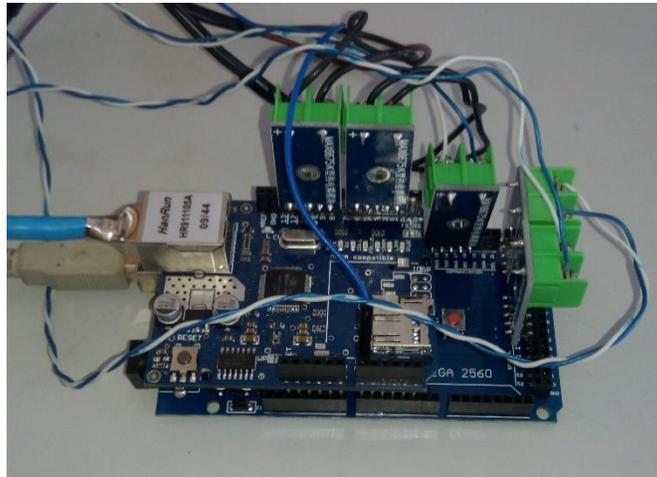
**Figura 44:** Módulo Ethernet W5100. Fuente: Autor.



**Figura 45:** Ensamble de Arduino Mega y módulo Ethernet W5100. Fuente: Autor.

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

Para evitar cablear y realizar tantos puentes, se optó por alimentar en el pin de tierra GND y en el VCC de los módulos MAX6675 directamente desde el código, asignando un bajo y un alto (0V, 5V) respectivamente. Esto se puede observar en el apéndice A. De esta manera puede conectarse físicamente como se ve en la figura 46, en donde los únicos cables que se tienen son los de las termocuplas.



**Figura 46:** Conexión de los módulos MAX6675, Shield Ethernet W5100 y Arduino Mega.

Fuente: Autor

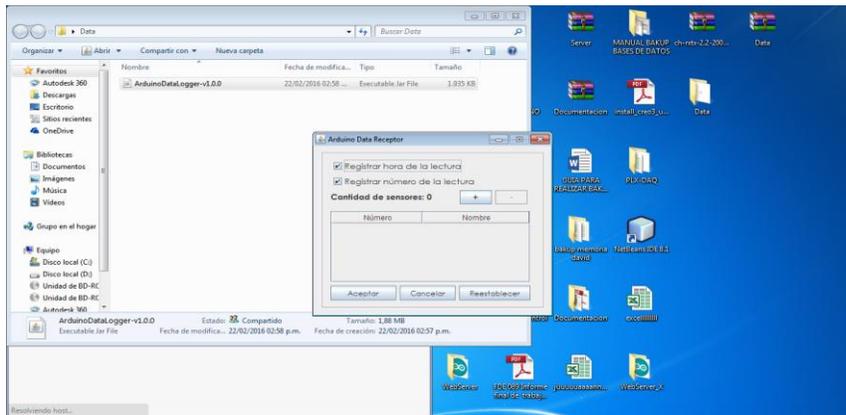
Dentro del código está la programación HTML (ver en apéndice C la configuración que se necesitó) que es la configuración por medio de la dirección IP para poder entrar en cualquier navegador y visualizar los datos tanto en grados Celsius como en Fahrenheit que se van tomando de cada termocupla. En el código se llamó “TESIS DE GRADO” a la tabla donde se almacenan los datos. En la figura 47 se puede observar en la dirección IP 10.1.1.5, una muestra de los datos que se van almacenando cada 200 milisegundos.

**CONTROL TERMOCUPLAS**

TERMOCUPLA 1	TERMOCUPLA 2	TERMOCUPLA 3	TERMOCUPLA 4	TERMOCUPLA 5
C = 31.75 F = 89.15	C = 29.75 F = 85.55	C = 30.25 F = 86.45	C = 35.50 F = 95.90	C = 30.00 F = 86.00
C = 31.50 F = 88.70	C = 30.00 F = 86.00	C = 30.00 F = 86.00	C = 35.75 F = 96.35	C = 29.75 F = 85.55
C = 31.75 F = 89.15	C = 29.75 F = 85.55	C = 30.00 F = 86.00	C = 36.75 F = 98.15	C = 30.00 F = 86.00
C = 31.75 F = 89.15	C = 30.00 F = 86.00	C = 30.00 F = 86.00	C = 36.75 F = 98.15	C = 29.50 F = 85.10
C = 32.00 F = 89.60	C = 29.75 F = 85.55	C = 30.00 F = 86.00	C = 37.00 F = 98.60	C = 29.75 F = 85.55
C = 30.75 F = 87.35	C = 29.50 F = 85.10	C = 30.00 F = 86.00	C = 37.00 F = 98.60	C = 29.25 F = 84.65
C = 32.00 F = 89.60	C = 29.75 F = 85.55	C = 29.75 F = 85.55	C = 37.25 F = 99.05	C = 29.50 F = 85.10
C = 31.25 F = 88.25	C = 29.75 F = 85.55	C = 29.50 F = 85.10	C = 37.50 F = 99.50	C = 29.50 F = 85.10
C = 31.75 F = 89.15	C = 30.00 F = 86.00	C = 29.75 F = 85.55	C = 38.50 F = 101.30	C = 30.00 F = 86.00
C = 31.75 F = 89.15	C = 29.25 F = 84.65	C = 29.75 F = 85.55	C = 38.75 F = 101.75	C = 29.75 F = 85.55
C = 31.75 F = 89.15	C = 30.00 F = 86.00	C = 29.75 F = 85.55	C = 39.00 F = 102.20	C = 30.00 F = 86.00
C = 31.75 F = 89.15	C = 29.75 F = 85.55	C = 30.00 F = 86.00	C = 38.75 F = 101.75	C = 29.50 F = 85.10
C = 31.75 F = 89.15	C = 30.00 F = 86.00	C = 30.00 F = 86.00	C = 38.50 F = 101.30	C = 29.50 F = 85.10
C = 31.25 F = 88.25	C = 30.00 F = 86.00	C = 30.00 F = 86.00	C = 38.50 F = 101.30	C = 29.50 F = 85.10
C = 31.75 F = 89.15	C = 30.00 F = 86.00	C = 30.00 F = 86.00	C = 38.25 F = 100.85	C = 29.75 F = 85.55
C = 31.75 F = 89.15	C = 29.75 F = 85.55	C = 30.00 F = 86.00	C = 38.25 F = 100.85	C = 29.75 F = 85.55
C = 31.50 F = 88.70	C = 30.25 F = 86.45	C = 29.50 F = 85.10	C = 38.25 F = 100.85	C = 29.50 F = 85.10
C = 31.75 F = 89.15	C = 30.00 F = 86.00	C = 29.75 F = 85.55	C = 38.50 F = 101.30	C = 30.00 F = 86.00
C = 32.00 F = 89.60	C = 29.50 F = 85.10	C = 29.25 F = 84.65	C = 38.50 F = 101.30	C = 29.25 F = 84.65
C = 31.75 F = 89.15	C = 30.00 F = 86.00	C = 30.00 F = 86.00	C = 38.50 F = 101.30	C = 29.50 F = 85.10
C = 31.50 F = 88.70	C = 29.75 F = 85.55	C = 30.00 F = 86.00	C = 38.50 F = 101.30	C = 29.75 F = 85.55

**Figura 47:** Muestra de los datos almacenados. Fuente: Autor.

Para exportar los datos de la figura 47 es necesario la instalación de una aplicación de Java llamada *Datalogger* Arduino. Es una herramienta que se enlaza con Arduino por medio de comunicación serial, es decir, todo lo que se imprima en el código de forma *serial print* (ver apéndice A) va a la aplicación Java. En la figura 48 se observa el cuadro de dialogo donde se seleccionan los datos que se quieren ver en el informe, en este caso se selecciona lo que se muestra en la figura.



**Figura 48:** Paso a paso para adquirir los datos desde el *Datalogger* de Arduino 1.

Fuente: Autor

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

A continuación se selecciona el número de datos que queremos visualizar, en la figura 49 vemos que seleccionamos 5 y después asignamos los nombre que deseamos visualizar, por defecto siempre aparece el nombre “sensor”, ya que esta aplicación de Java es diseñada para adquisición de datos generados por sensores.



**Figura 49:** Paso a paso para adquirir los datos desde el *Datalogger* de Arduino 2.

Fuente: Autor

Debemos asignar el puerto COM#, esto es de acuerdo al puerto asignado para Arduino. Por defecto en el código se tiene la velocidad de conexión de 9600 Baudios, este dato debe coincidir con el que se ingresa en la interfaz de Java. Luego se acciona el botón conectar Arduino, para después ejecutar la toma de datos; estos datos se registran de manera automática en una ventana adicional a la interfaz. Se debe tener en cuenta que como se está trabajando en lenguaje C el programa se ejecuta código por código y para este caso se programó en el *Void Loop* (ver apéndice A) un *While* que condiciona al código a que solo se ejecute cuando haya un cliente conectado, es decir, para iniciar la toma de datos se debe primero inicializar el cliente desde el servidor ingresando la dirección IP desde cualquier dispositivo electrónico como se muestra en la figura 50.

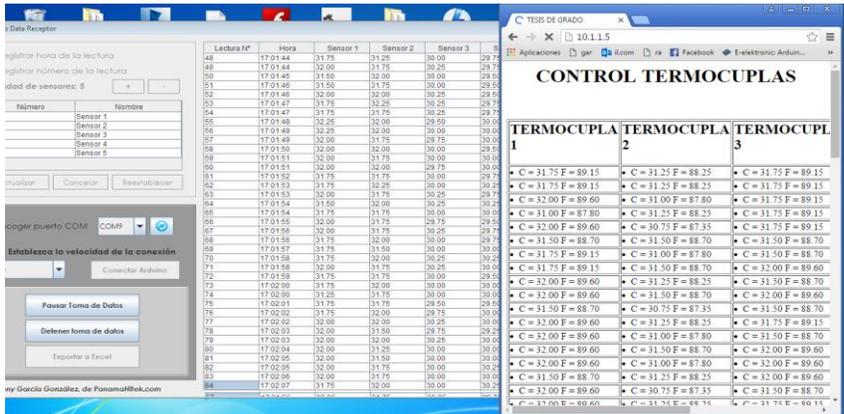


Figura 50: Paso a paso para adquirir los datos desde el Datalogger de Arduino 3.

Fuente: Autor

Aquí ya se puede pausar, detener e iniciar la toma de datos, dichos datos se registra con fecha, numero de lectura y hora, así como el dato de temperatura. Ejecutada cualquiera de las acciones anteriores se habilita el botón “Exportar a Excel”, esto genera un archivo .xlsx con los datos registrados los cuales se deben seleccionar la ubicación en la que deseamos guardar (ver figura 53).

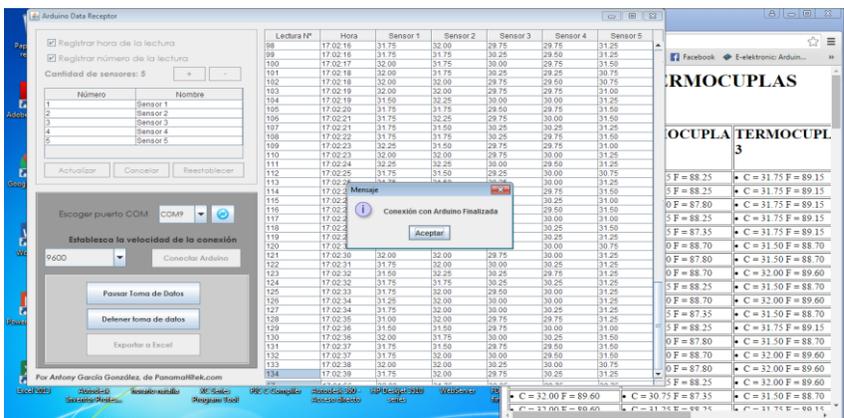


Figura 51: Paso a paso para adquirir los datos desde el Datalogger de Arduino 4.

Fuente: Autor

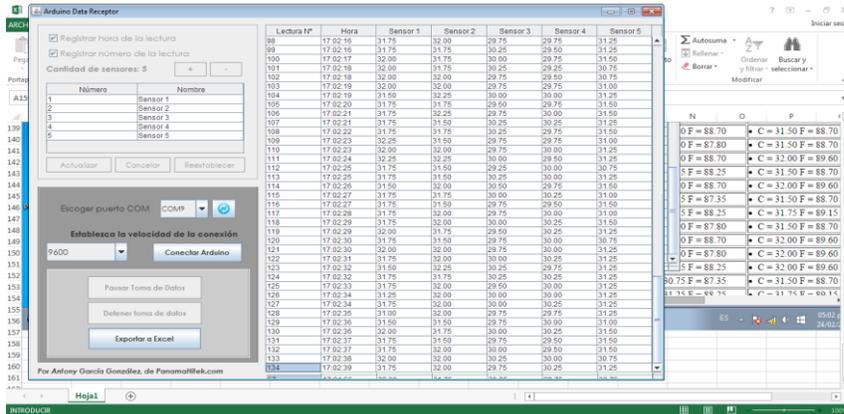


Figura 52: Paso a paso para adquirir los datos desde el Datalogger de Arduino 5.

Fuente: Autor

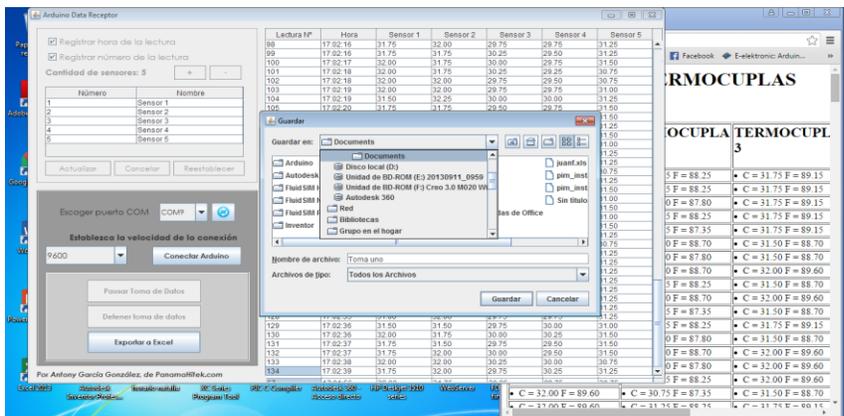
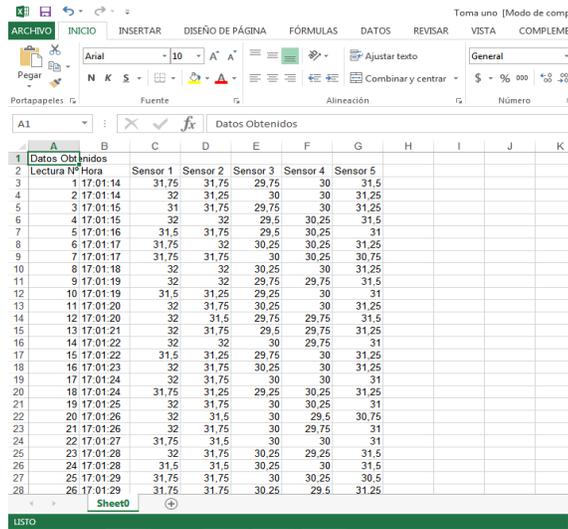


Figura 53: Paso a paso para adquirir los datos desde el Datalogger de Arduino 6.

Fuente: Autor

En la figura 54 se observa los datos exportados a Excel, estos se emplean para generar graficas de temperatura vs tiempo, temperatura vs lectura, esto dependiendo de la necesidad del usuario. En la figura 55 se observa un ejemplo de una gráfica, la cual se analiza la toma de datos a temperatura ambiente.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Datos Obtenidos										
2			Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5				
3	1	17:01:14	31,75	31,75	29,75	30	31,5				
4	2	17:01:14	32	31,25	30	30	31,25				
5	3	17:01:15	31	31,75	29,75	30	31,25				
6	4	17:01:15	32	32	29,5	30,25	31,5				
7	5	17:01:16	31,5	31,75	29,5	30,25	31				
8	6	17:01:17	31,75	32	30,25	30,25	31,25				
9	7	17:01:17	31,75	31,75	30	30,25	30,75				
10	8	17:01:18	32	32	30,25	30	31,25				
11	9	17:01:19	32	32	29,75	29,75	31,5				
12	10	17:01:19	31,5	31,25	29,25	30	31				
13	11	17:01:20	32	31,75	30,25	30	31,25				
14	12	17:01:20	32	31,5	29,75	29,75	31,5				
15	13	17:01:21	32	31,75	29,5	29,75	31,25				
16	14	17:01:22	32	32	30	29,75	31				
17	15	17:01:22	31,5	31,25	29,75	30	31,25				
18	16	17:01:23	32	31,75	30,25	30	31,25				
19	17	17:01:24	32	31,75	30	30	31				
20	18	17:01:24	31,75	31,25	29,25	30,25	31,25				
21	19	17:01:25	32	31,75	30	30,25	31				
22	20	17:01:26	32	31,5	30	29,5	30,75				
23	21	17:01:26	32	31,75	30	29,75	31				
24	22	17:01:27	31,75	31,5	30	30	31				
25	23	17:01:28	32	31,75	30,25	29,25	31,5				
26	24	17:01:28	31,5	31,5	30,25	30	31,5				
27	25	17:01:29	31,75	31,75	30	30,25	30,5				
28	26	17:01:29	31,75	31,75	30,25	29,5	31,25				

Figura 54: Paso a paso para adquirir los datos desde el Datalogger de Arduino 7.

Fuente: Autor

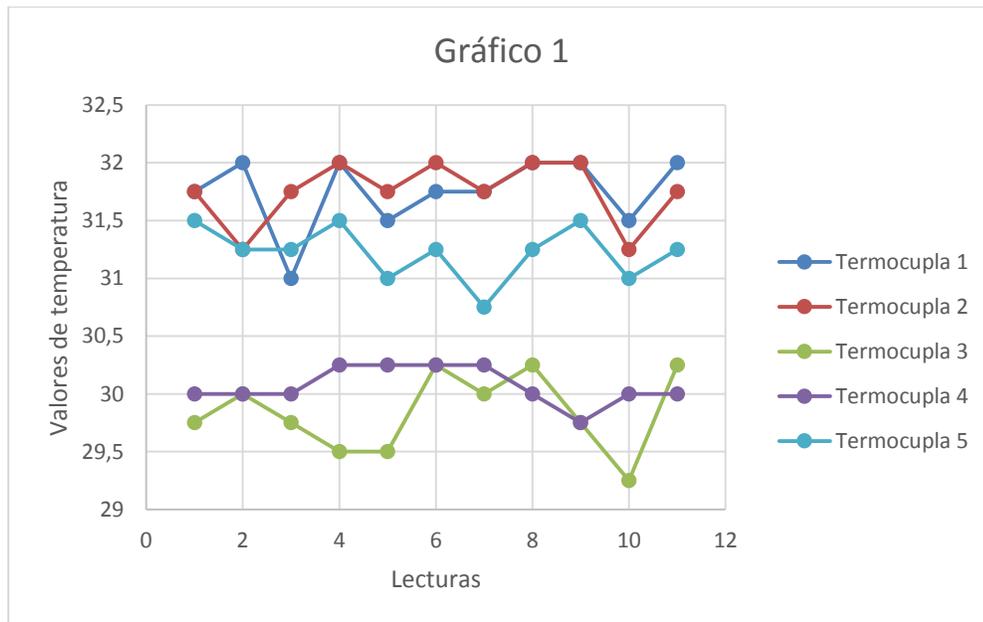


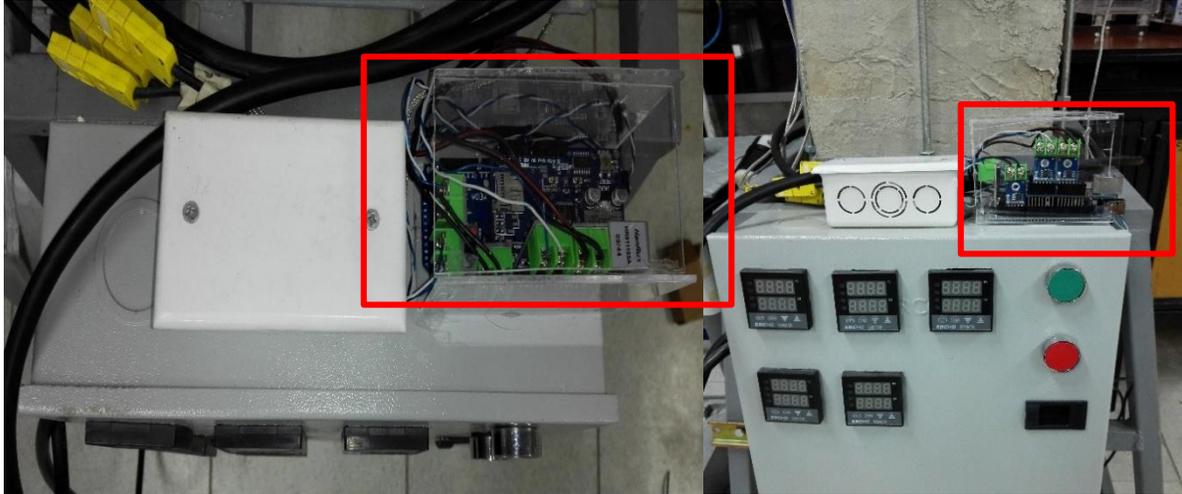
Figura 55: Gráfica de datos adquiridos. Fuente: Autor

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

#### 4.1.6.3. Montaje físico del sistema de adquisición de datos

A continuación se observa el montaje final del sistema de adquisición de datos, el cual está dentro de una caja de acrílico encima de la caja de control como se muestra en la figura 56.

**Figura 56:** Montaje físico del sistema de adquisición de datos. Fuente: Autor



#### 4.1.7. Presión

El objetivo de medir esta variable es analizar la caída de presión que se realiza al interior del intercambiador de calor, las mediciones son hechas tanto en la entrada como en la salida del prototipo (Imbol Rúa, 2015).

Con el diseño seleccionado se busca mantener la presión constante, puesto que los agujeros por donde pasa el aire caliente son mucho más grandes que los de las resistencias del prototipo original.

El prototipo modificado conserva los dos manómetros de alta sensibilidad y baja rangeabilidad.



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

segunda línea. Cuando se presiona el botón de start, el circuito se cierra, haciendo que pase corriente por el núcleo de K1 y cambiando el estado de sus contactos; el esquema muestra que hay dos contactos NA de K1 siendo usados, uno para accionar el contactor KM y el otro hace que prenda los medidores de temperatura; que en el circuito de control, sólo se centrará en el medidor programado como controlador.

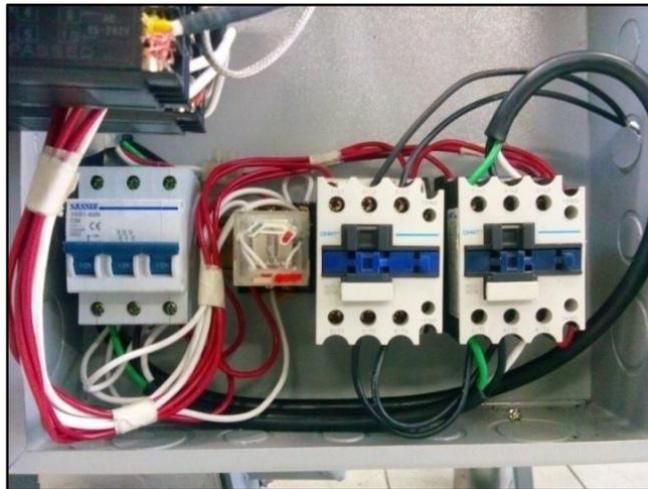
Los contactores KM y los medidores de temperatura se accionan mientras el relé K1 esté activo, y como se observa en la Figura 57, paralelo al pulsador start está conectado el contacto auxiliar de KM, por lo que entre K1 y KM hace que el sistema de control permanezca activo hasta que se desenergice el relé K1, lo cual se logra presionando el pulsador de stop que es NC.

Y el contactor KR se mantiene activo mientras el controlador de temperatura esté por debajo del punto de referencia (*Set point*), el cual es de 546°C, cuando la temperatura sea igual o mayor al *set-point*, cambia el contacto en el controlador de temperatura, haciendo que se desenergice el contactor KR, y cortando el suministro de voltaje a las resistencias. (Imbol Rúa, 2015).

#### **4.1.8.2. Circuito de potencia**

En la figura 58 se muestra el actual sistema de conexión eléctrica del recuperador de calor.

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



**Figura 58:** Instalación eléctrica del recuperador de calor. Fuente: (Imbol Rúa, 2015).

El dispositivo en el lado izquierdo es un breaker trifásico que tiene una capacidad nominal de 32A, por las conexiones superiores del breaker se conectó el cable trifásico que suministra el voltaje por medio de una clavija como la de la Figura 59, mientras que en las conexiones inferiores del breaker se suministra el voltaje tanto a los sistemas de control como el voltaje a las resistencias y al ventilador. (Imbol Rúa, 2015).



**Figura 59:** Clavija NEMA L21. Fuente: (Imbol Rúa, 2015).

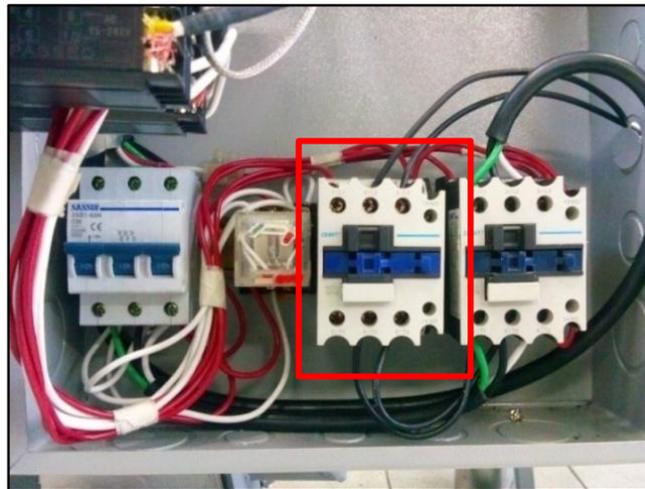
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En resto de conexiones del prototipo original se conservó, debido a que no era necesario ninguna modificación, ya que el objetivo de nuestro trabajo es el sistema de adquisición de datos.

#### 4.2. Cambio de contactor mecánico

Teniendo en cuentas las recomendaciones hechas por (Imbol Rúa, 2015), se decidió cambiar el contactor mecánico que suministra la tensión a las resistencias, ya que éste debe estar conmutando constantemente para mantener la temperatura de referencia en su punto, el cual tiene posibilidad de dañarse fácilmente, se optó por un contactor de estado sólido, el cual es mucho más confiable y resiste a altas frecuencias de conmutaciones.

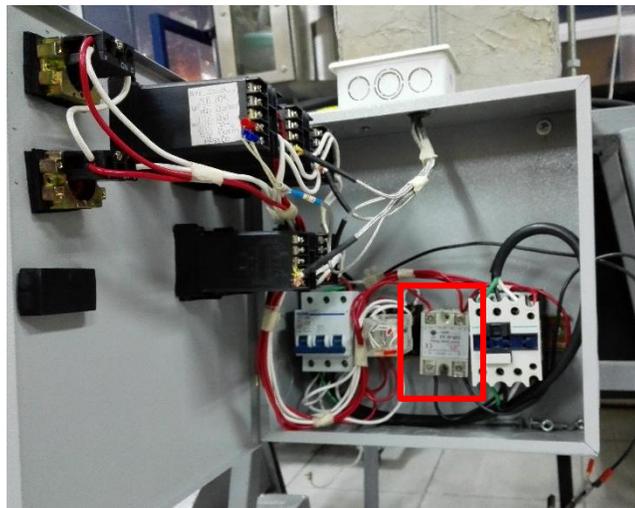
En las figuras 60 y 61 se puede observar el contactor original y el contactor de mercurio que se cambió.



**Figura 60:** Contacto mecánico. Fuente: Autor



**Figura 61:** Contactor de estado sólido. Fuente: Autor



**Figura 62:** Contactor de estado sólido instalado. Fuente: Autor

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

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 5.1. Conclusiones

- Se realiza un nuevo diseño de las resistencias que calientan el aire al interior del intercambiador de calor, mejorando de esta manera la eficiencia de las resistencias. Se diseña, programa y se monta un sistema de adquisición de datos en tiempo real por medio de la plataforma de Arduino y se da la opción de graficar los resultados y obtener la ecuación característica de la gráfica.
- Se logra diseñar una resistencia teniendo en cuenta los resultados de las termogramas realizados y comparándolas con otros tipos y geometrías de resistencias, encontrando ésta como la más eficiente desde el punto de vista del consumo energético, además de esto, aumentando la vida útil del material de la resistencia, teniendo en cuenta que era una limitación del prototipo anterior.
- Por medio de una serie de placas de Arduino se logra diseñar un dispositivo y realizar un código de programación que traduzca los valores análogos de las termocuplas a señales digitales para después, por medio de un router transferir esos datos y almacenarlos para posteriormente obtener la gráfica que deseamos.
- Se logra tener una herramienta adicional de almacenamiento de datos por medio de la programación HTML que permite hacer un seguimiento de los valores de temperatura y tiempo cada 200 milisegundos o el tiempo que deseamos, de manera

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

inalámbrica desde cualquier dispositivo electrónico que se encuentre en el rango del router.

- Se cambia el relé mecánico por un relé de estado sólido, el cual permite altas frecuencias de conmutaciones, este por no tener partes móviles en su interior, tiene una vida útil mayor que los convencionales.

## **5.2. Recomendaciones y trabajo futuro**

Se recomienda mejorar el ducto de aire del Blower-Resistencia, para disminuir turbulencias producidas por el diseño de éste.

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

## REFERENCIAS

---

- Arduino. (09 de Febrero de 2016). Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- ARDUINO. (20 de Febrero de 2016). *Arduino*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoEthernetShield>
- Contreras, A. M., & Mite, M. J. (2011). *Interfaz Grafica con pantalla LCD táctil para analizar señales de Termocuplas tipo K, J y T, usando el chip DS2760 de Dallas/Maxim y un microcontrolador*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Damfer. (16 de Febrero de 2016). *Damfer, materiales para resistencias eléctricas*. Obtenido de <http://www.damfer.com/index.php?paginas=acr3>
- Galperin, Y. M. (2001). *Introduction to modern Solid State Physics*. Oslo.
- Huircán, J. I. (9 de Febrero de 2016). *Convertidores análogo-digital y digital-análogo, conceptos básicos*. Obtenido de [http://quidel.inele.ufro.cl/~jhuircan/PDF\\_CTOSII/ad03.pdf](http://quidel.inele.ufro.cl/~jhuircan/PDF_CTOSII/ad03.pdf)
- Imbol Rúa, V. (2015). *Construcción y evaluación de un prototipo de recuperador de calor residual de lecho empacado de caliza y carbón*. Medellín, Colombia.
- Kanthal. (11 de Febrero de 2016). *KANTHAL*. Obtenido de <http://www.kanthal.com/en/products/furnace-products-and-heating-systems/electric-heating-elements/metallic-heating-elements/>
- López, C. F., & Trejos, L. A. (2013). *Diseño y construcción de un intercambiador de calor directo para un horno cubilote*. Quito, Ecuador.
- Olejua, M. L., & Ospina, O. J. (2008). *Implementación de un sistema de control de temperatura en tiempo real utilizando la herramienta xPC-Target de MatLab*. Bucaramanga, Santander: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Perez, D., & Parrondo, J. L. (2013). *Modelado mediante CFD de la disipación térmica de resistencias eléctricas para frenado de trenes*. Asturias: Universidad de Oviedo.
- Resista. (17 de Febrero de 2016). *Resista, resistencias eléctricas para la industria*. Obtenido de <http://www.resistaltda.com/resista/vp5809/sp/resistencias-espiral-alambre#ad-image-0>

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

Resistencias Tope S.A. (17 de Febrero de 2016). *Resistencias Tope S.A. Soluciones térmicas industriales*. Obtenido de <http://www.resistenciastope.com/es/11-resistencias-aire/20-resistencias-aleteadas-con-aletas-helicoidales-de-acero-inox>

Rindesa. (septiembre de 2015). Obtenido de Resistencias eléctricas industriales: <http://rindesa.com/resespir.html>

RINDESA. (17 de Febrero de 2016). *Rindesa, Resistencias eléctricas industriales*. Obtenido de <http://rindesa.com/resespir.html>

Sac, D. M., & García, O. (2007). *Circuitos electrónicos para propósito de control y monitoreo de temperatura vía PC*. Veracruz: Universidad Veracruzana.

Schneider Electric. (12 de Noviembre de 2013). *Contactores de estado sólido*. Obtenido de <http://www.schneider-electric.com/press/es/es/schneider-electric-amplia-su-gama-de-reles-de-estado-solido-zelio-relay/>

TESTO. (23 de Febrero de 2016). *We measure it. testo*. Obtenido de [https://www.testo.com.ar/es/home/formacion/curso\\_online\\_de\\_termografia\\_/tabla\\_de\\_emisividades/3\\_1\\_\\_emissivity\\_table\\_mastercontent.jsp](https://www.testo.com.ar/es/home/formacion/curso_online_de_termografia_/tabla_de_emisividades/3_1__emissivity_table_mastercontent.jsp)

TRE C. (17 de Febrero de 2016). Obtenido de <http://www.resistencias-electricas.com/productos/aire/resistencias-blindadas-lisas-y-aleteadas/resistencias-tubulareslisas/>

Universitat Politècnica de València. (09 de Febrero de 2016). *Documento sobre Contactor*. Obtenido de [http://www.upv.es/electrica/material\\_tecno/Transparencias\\_PDF/T2/tema2-5.pdf](http://www.upv.es/electrica/material_tecno/Transparencias_PDF/T2/tema2-5.pdf)

Velásquez Gomez, L. B., & Aragón Molina, L. (2014). *Diseño de un prototipo de recuperador de calor residual de lecho empacado de caliza y carbón*. Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano.

Vistronica. (08 de Febrero de 2016). Obtenido de <http://www.vistronica.com/sensores/temperatura/modulo-para-termocupla-max6675-detail.html>

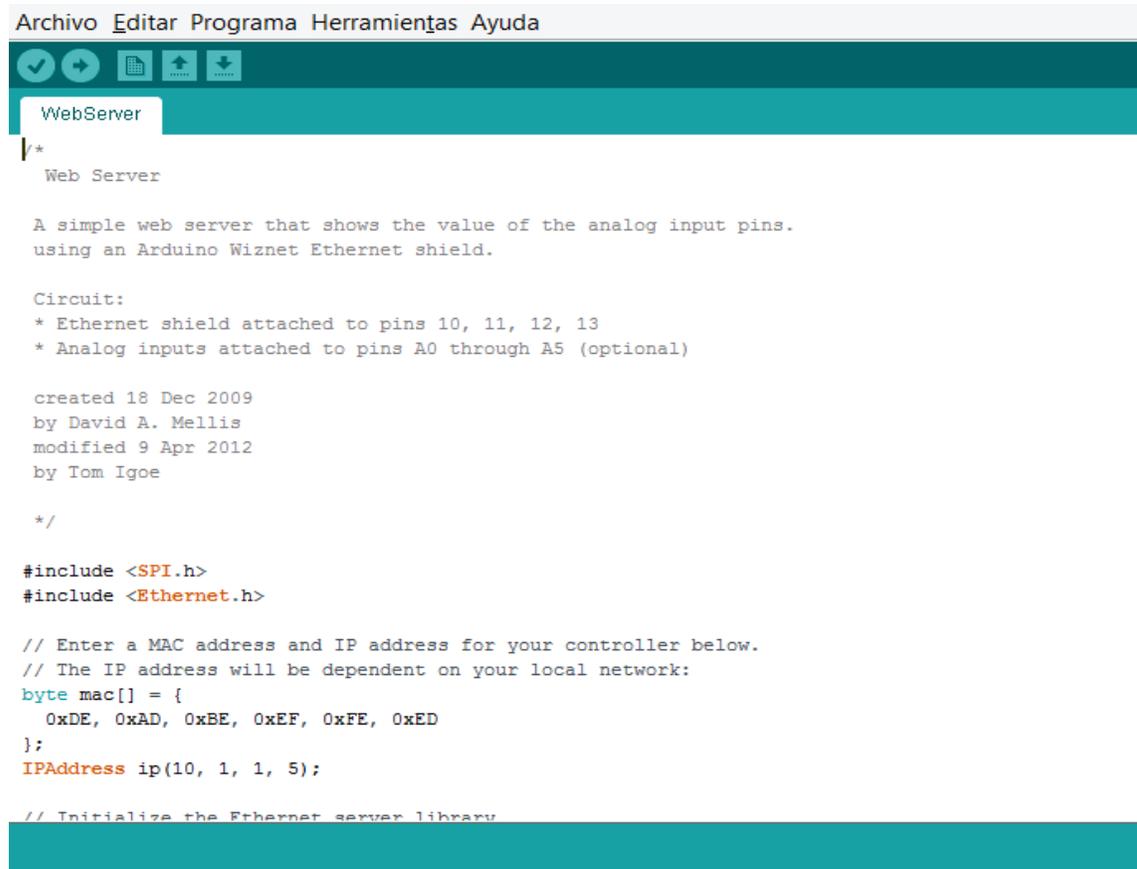
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# APÉNDICE

---

## APENDICE A

### Código de programación de Arduino Mega



```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
WebServer
/*
  Web Server

  A simple web server that shows the value of the analog input pins.
  using an Arduino Wiznet Ethernet shield.

  Circuit:
  * Ethernet shield attached to pins 10, 11, 12, 13
  * Analog inputs attached to pins A0 through A5 (optional)

  created 18 Dec 2009
  by David A. Mellis
  modified 9 Apr 2012
  by Tom Igoe

  */

#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>

// Enter a MAC address and IP address for your controller below.
// The IP address will be dependent on your local network:
byte mac[] = {
  0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED
};
IPAddress ip(10, 1, 1, 5);

// Initialize the Ethernet server library

```

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

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

```

✓ ↻ 📄 ⬆️ ⬇️
WebServer
// Initialize the Ethernet server library
// with the IP address and port you want to use
// (port 80 is default for HTTP):
EthernetServer server(80);
//.....

//.....

#include "max6675.h"

int thermoDO = 6; // termocupla 1
int thermoCS = 5;
int thermoCLK = 4;

MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
int vccPin = 3;
int gndPin = 2;

//.....

int thermoDO2 = 12; // termocupla 2
int thermoCS2 = 11;
int thermoCLK2 = 10;

MAX6675 thermocouple2(thermoCLK2, thermoCS2, thermoDO2);
int vccPin2 = 9;

```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

```

✓ ↻ 📄 ⬆️ ⬇️
WebServer
MAX6675 thermocouple2(thermoCLK2, thermoCS2, thermoDO2);
int vccPin2 = 9;
int gndPin2 = 8;

//.....

int thermoDO3 = 14; // termocupla 3
int thermoCS3 = 15;
int thermoCLK3 = 16;

MAX6675 thermocouple3(thermoCLK3, thermoCS3, thermoDO3);
int vccPin3 = 17;
int gndPin3 = 18;

//.....

int thermoDO4 = 22; // termocupla 4
int thermoCS4 = 24;
int thermoCLK4 = 26;

MAX6675 thermocouple4(thermoCLK4, thermoCS4, thermoDO4);
int vccPin4 = 28;
int gndPin4 = 30;

//.....

int thermoDO5 = 36; // termocupla 5
int thermoCS5 = 38;

```

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

```

Archivo  Editar Programa Herramientas Ayuda
[Icons: Check, Refresh, Print, Upload, Download]
WebServer
//.....

int thermoD05 = 36;  // termocupla 5
int thermoCS5 = 38;
int thermoCLK5 = 40;

MAX6675 thermocouple5(thermoCLK5, thermoCS5, thermoD05);
int vccPin5 = 42;
int gndPin5 = 44;

void setup() {
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for Leonardo only
  }

  // start the Ethernet connection and the server:
  Ethernet.begin(mac, ip);
  server.begin();
  Serial.print("server is at ");
  Serial.println(Ethernet.localIP());

  //

```

```

Archivo  Editar Programa Herramientas Ayuda
[Icons: Check, Refresh, Print, Upload, Download]
WebServer
//.....

pinMode(vccPin, OUTPUT); digitalWrite(vccPin, HIGH);
pinMode(gndPin, OUTPUT); digitalWrite(gndPin, LOW);

pinMode(vccPin2, OUTPUT); digitalWrite(vccPin2, HIGH); // termo 2
pinMode(gndPin2, OUTPUT); digitalWrite(gndPin2, LOW);

pinMode(vccPin3, OUTPUT); digitalWrite(vccPin3, HIGH); // termo 3
pinMode(gndPin3, OUTPUT); digitalWrite(gndPin3, LOW);

pinMode(vccPin4, OUTPUT); digitalWrite(vccPin4, HIGH); // termo 4
pinMode(gndPin4, OUTPUT); digitalWrite(gndPin4, LOW);

pinMode(vccPin5, OUTPUT); digitalWrite(vccPin5, HIGH); // termo 5
pinMode(gndPin5, OUTPUT); digitalWrite(gndPin5, LOW);

Serial.println("MAX6675 test");
// wait for MAX chip to stabilize
delay(500);

//.....
}

void loop() {
  // listen for incoming clients

```

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

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda



WebServer

```
pinMode(vccPin5, OUTPUT); digitalWrite(vccPin5, HIGH); // termo 5
pinMode(gndPin5, OUTPUT); digitalWrite(gndPin5, LOW);

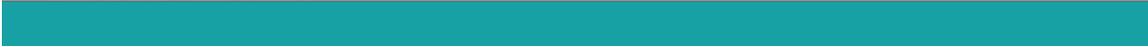
Serial.println("MAX6675 test");
// wait for MAX chip to stabilize
delay(500);

//.....
}

void loop() {
  // listen for incoming clients

  //.....

  EthernetClient client = server.available();
  if (client) {
    Serial.println("new client");
    // an http request ends with a blank line
    boolean currentLineIsBlank = true;
    while (client.connected()) {
```



Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda



WebServer

```
EthernetClient client = server.available();
if (client) {
  Serial.println("new client");
  // an http request ends with a blank line
  boolean currentLineIsBlank = true;
  while (client.connected()) {
    if (client.available()) {
      char c = client.read();
      Serial.write(c);
      // if you've gotten to the end of the line (received a newline
      // character) and the line is blank, the http request has ended,
      // so you can send a reply
      if (c == '\n' && currentLineIsBlank) {
        // send a standard http response header
        client.println("HTTP/1.1 200 OK");
        client.println("Content-Type: text/html");
        //client.println("Connection: close"); // the connection will be closed after completion of the response
        client.println("Refresh: 2"); // refresh the page automatically every 2 sec
        client.println();
        //client.println("<!DOCTYPE HTML>");
        client.println("<html>");
        client.println("<head>");
        client.println("<title>TESIS DE GRADO</title>");
        client.println("</head>");
        client.println("<body width=100% height=100%>");
        client.println("<center>");
        client.println("<h1>CONTROL TERMOCUPLAS</h1>");
        client.println("</center>");
```



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

```

Archivo  Editar Programa Herramientas Ayuda
WebServer
client.println("<h1>CONTROL TERMOCUPLAS</h1>");
client.println("</center>");
client.print("<br><br>");

client.println("<TABLE BORDER>");
client.println("<TR>");
client.println("<TD>");
client.println("<body width=50% height=100%>");
client.println("<h2> TERMOCUPLA 1 </h2>");
client.println("</TD>");

client.println("<TD>");
client.println("<h2> TERMOCUPLA 2 </h2>");
client.println("</TD>");

client.println("<TD>");
client.println("<h2> TERMOCUPLA 3 </h2>");
client.println("</TD>");

client.println("<TD>");
client.println("<h2> TERMOCUPLA 4 </h2>");
client.println("</TD>");

client.println("<TD>");
client.println("<h2> TERMOCUPLA 5 </h2>");
client.println("</TD>");
client.println("</TR>");

```

```

Archivo  Editar Programa Herramientas Ayuda
WebServer
client.println("<h2> TERMOCUPLA 5 </h2>");
client.println("</TD>");
client.println("</TR>");

while(1){
client.println("<TR>");
client.println("<TD>");
client.println("<LI>");
client.print("C = ");
client.println(thermocouple2.readCelsius());

client.print("F = ");
client.println(thermocouple2.readFahrenheit());
client.println("</TD>");
// OTRA TERMOCUPLA

client.println("<TD>");
client.println("<LI>");
client.print("C = ");
client.println(thermocouple.readCelsius());

client.print("F = ");
client.println(thermocouple.readFahrenheit());
client.println("</TD>");

```

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

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

```

client.println("<TD>");
client.println("<LI>");
client.print("C = ");
client.println(thermocouple3.readCelsius());

client.print("F = ");
client.println(thermocouple3.readFahrenheit());
client.println("</TD>");

//

client.println("<TD>");
client.println("<LI>");
client.print("C = ");
client.println(thermocouple4.readCelsius());

client.print("F = ");
client.println(thermocouple4.readFahrenheit());
client.println("</TD>");

//

client.println("<TD>");
client.println("<LI>");
client.print("C = ");
client.println(thermocouple5.readCelsius());

```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

```

client.println(thermocouple5.readCelsius());

client.print("F = ");
client.println(thermocouple5.readFahrenheit());
client.println("</TD>");

client.println("</TR>");

/*client.println("<script>");
client.println("<src=../js/Chart.min.js>");
</script>
client.println("<div id='canvas-holder'>");
client.println("<canvas id='chart-area' width='300' height='300'>");
client.println("</canvas>");
client.println("</div>");
client.println("<script>");
client.println("var pieData = [{value:40,color:'#0b82e7',highlight: '#0c62ab',label: 'Primer dato'},");
client.println("{value:60,color:'#0b82e7',highlight: '#0c62ab',label: 'Segundo dato'}];");
var ctx = document.getElementById("chart-area").getContext("2d");
window.myPie = new Chart(ctx).Pie(pieData);
client.println("</script>");*/

word termo1 = termocouple.readCelsius();
word termo2 = termocouple2.readCelsius();

```

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

```

Archivo  Editar Programa  Herramientas  Ayuda
WebServer
word term02 = thermocouple2.readCelsius();

analogWrite(0, (termo1/4));
analogWrite(1, (termo2/4));

delay(200);
}
client.println("</TABLE>");

//.....

client.println("</html>");
break;
}
if (c == '\n') {
// you're starting a new line
currentLineIsBlank = true;
}
else if (c != '\r') {
// you've gotten a character on the current line

```

```

Archivo  Editar Programa  Herramientas  Ayuda
WebServer
delay(200);
}
client.println("</TABLE>");

//.....

client.println("</html>");
break;
}
if (c == '\n') {
// you're starting a new line
currentLineIsBlank = true;
}
else if (c != '\r') {
// you've gotten a character on the current line
currentLineIsBlank = false;
}
}
}
// give the web browser time to receive the data
delay(1);
// close the connection:
client.stop();
Serial.println("client disconnected");
}
}

```

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

## APENDICE B

### Tabla de programación de termocupla tipo K

TERMOCUPLA K										
milivolts										
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-270	-6.458									
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.371	-6.377	-6.382	-6.388	-6.394	-6.399
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.253
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.796	-5.813	-5.829	-5.845	-5.860	-5.876
-180	-5.550	-5.569	-5.587	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.712
-170	-5.354	-5.374	-5.394	-5.414	-5.434	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.249	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333
-150	-4.912	-4.936	-4.959	-4.983	-5.006	-5.029	-5.051	-5.074	-5.097	-5.119
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.743	-4.768	-4.792	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889
-130	-4.410	-4.437	-4.463	-4.489	-4.515	-4.541	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644
-120	-4.138	-4.166	-4.193	-4.221	-4.248	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384
-110	-3.852	-3.881	-3.910	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.053	-4.082	-4.110
-100	-3.553	-3.584	-3.614	-3.644	-3.674	-3.704	-3.734	-3.764	-3.793	-3.823
-90	-3.242	-3.274	-3.305	-3.337	-3.368	-3.399	-3.430	-3.461	-3.492	-3.523
-80	-2.920	-2.953	-2.985	-3.018	-3.050	-3.082	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211
-70	-2.586	-2.620	-2.654	-2.687	-2.721	-2.754	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887
-60	-2.243	-2.277	-2.312	-2.347	-2.381	-2.416	-2.450	-2.484	-2.518	-2.552
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.102	-2.137	-2.173	-2.208
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

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

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-40	-1.527	-1.563	-1.600	-1.636	-1.673	-1.709	-1.745	-1.781	-1.817	-1.853
-30	-1.156	-1.193	-1.231	-1.268	-1.305	-1.342	-1.379	-1.416	-1.453	-1.490
-20	-0.777	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.005	-1.043	-1.081	-1.118
-10	-0.392	-0.431	-0.469	-0.508	-0.547	-0.585	-0.624	-0.662	-0.701	-0.739
0	-0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353
0	-0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.776	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299
180	7.338	7.378	7.418	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097
200	8.137	8.177	8.216	8.256	8.296	8.336	8.376	8.416	8.456	8.497
210	8.537	8.577	8.617	8.657	8.697	8.737	8.777	8.817	8.857	8.898
220	8.938	8.978	9.018	9.058	9.099	9.139	9.179	9.220	9.260	9.300
230	9.341	9.381	9.421	9.462	9.502	9.543	9.583	9.624	9.664	9.705
240	9.745	9.786	9.826	9.867	9.907	9.948	9.989	10.029	10.070	10.111
250	10.151	10.192	10.233	10.274	10.315	10.355	10.396	10.437	10.478	10.519
260	10.560	10.600	10.641	10.682	10.723	10.764	10.805	10.846	10.887	10.928
270	10.969	11.010	11.051	11.093	11.134	11.175	11.216	11.257	11.298	11.339
280	11.381	11.422	11.463	11.504	11.546	11.587	11.628	11.669	11.711	11.752
290	11.793	11.835	11.876	11.918	11.959	12.000	12.042	12.083	12.125	12.166
300	12.207	12.249	12.290	12.332	12.373	12.415	12.456	12.498	12.539	12.581
310	12.623	12.664	12.706	12.747	12.789	12.831	12.872	12.914	12.955	12.997
320	13.039	13.080	13.122	13.164	13.205	13.247	13.289	13.331	13.372	13.414
330	13.456	13.497	13.539	13.581	13.623	13.665	13.706	13.748	13.790	13.832
340	13.874	13.915	13.957	13.999	14.041	14.083	14.125	14.167	14.208	14.250
350	14.292	14.334	14.376	14.418	14.460	14.502	14.544	14.586	14.628	14.670
360	14.712	14.754	14.796	14.838	14.880	14.922	14.964	15.006	15.048	15.090
370	15.132	15.174	15.216	15.258	15.300	15.342	15.384	15.426	15.468	15.510
380	15.552	15.594	15.636	15.679	15.721	15.763	15.805	15.847	15.889	15.931
390	15.974	16.016	16.058	16.100	16.142	16.184	16.227	16.269	16.311	16.353
400	16.395	16.438	16.480	16.522	16.564	16.607	16.649	16.691	16.733	16.776
410	16.818	16.860	16.902	16.945	16.987	17.029	17.072	17.114	17.156	17.199
420	17.241	17.283	17.326	17.368	17.410	17.453	17.495	17.537	17.580	17.622
430	17.664	17.707	17.749	17.792	17.834	17.876	17.919	17.961	18.004	18.046
440	18.088	18.131	18.173	18.216	18.258	18.301	18.343	18.385	18.428	18.470
450	18.513	18.555	18.598	18.640	18.683	18.725	18.768	18.810	18.853	18.895
460	18.938	18.980	19.023	19.065	19.108	19.150	19.193	19.235	19.278	19.320
470	19.363	19.405	19.448	19.490	19.533	19.576	19.618	19.661	19.703	19.746

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

480	19.788	19.831	19.873	19.916	19.959	20.001	20.044	20.086	20.129	20.172
490	20.214	20.257	20.299	20.342	20.385	20.427	20.470	20.512	20.555	20.598
500	20.640	20.683	20.725	20.768	20.811	20.853	20.896	20.938	20.981	21.024
510	21.066	21.109	21.152	21.194	21.237	21.280	21.322	21.365	21.407	21.450
520	21.493	21.535	21.578	21.621	21.663	21.706	21.749	21.791	21.834	21.876
530	21.919	21.962	22.004	22.047	22.090	22.132	22.175	22.218	22.260	22.303
540	22.346	22.388	22.431	22.473	22.516	22.559	22.601	22.644	22.687	22.729
550	22.772	22.815	22.857	22.900	22.942	22.985	23.028	23.070	23.113	23.156
560	23.198	23.241	23.284	23.326	23.369	23.411	23.454	23.497	23.539	23.582
570	23.624	23.667	23.710	23.752	23.795	23.837	23.880	23.923	23.965	24.008
580	24.050	24.093	24.136	24.178	24.221	24.263	24.306	24.348	24.391	24.434
590	24.476	24.519	24.561	24.604	24.646	24.689	24.731	24.774	24.817	24.859

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
600	24.902	24.944	24.987	25.029	25.072	25.114	25.157	25.199	25.242	25.284
610	25.327	25.369	25.412	25.454	25.497	25.539	25.582	25.624	25.666	25.709
620	25.751	25.794	25.836	25.879	25.921	25.964	26.006	26.048	26.091	26.133
630	26.176	26.218	26.260	26.303	26.345	26.387	26.430	26.472	26.515	26.557
640	26.599	26.642	26.684	26.726	26.769	26.811	26.853	26.896	26.938	26.980
650	27.022	27.065	27.107	27.149	27.192	27.234	27.276	27.318	27.361	27.403
660	27.445	27.487	27.529	27.572	27.614	27.656	27.698	27.740	27.783	27.825
670	27.867	27.909	27.951	27.993	28.035	28.078	28.120	28.162	28.204	28.246
680	28.288	28.330	28.372	28.414	28.456	28.498	28.540	28.583	28.625	28.667
690	28.709	28.751	28.793	28.835	28.877	28.919	28.961	29.002	29.044	29.086
700	29.128	29.170	29.212	29.254	29.296	29.338	29.380	29.422	29.464	29.505
710	29.547	29.589	29.631	29.673	29.715	29.756	29.798	29.840	29.882	29.924
720	29.965	30.007	30.049	30.091	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341
730	30.383	30.424	30.466	30.508	30.549	30.591	30.632	30.674	30.716	30.757
740	30.799	30.840	30.882	30.924	30.965	31.007	31.048	31.090	31.131	31.173
750	31.214	31.256	31.297	31.339	31.380	31.422	31.463	31.504	31.546	31.587
760	31.629	31.670	31.712	31.753	31.794	31.836	31.877	31.918	31.960	32.001
770	32.042	32.084	32.125	32.166	32.207	32.249	32.290	32.331	32.372	32.414
780	32.455	32.496	32.537	32.578	32.619	32.661	32.702	32.743	32.784	32.825
790	32.866	32.907	32.948	32.990	33.031	33.072	33.113	33.154	33.195	33.236
800	33.277	33.318	33.359	33.400	33.441	33.482	33.523	33.564	33.604	33.645
810	33.686	33.727	33.768	33.809	33.850	33.891	33.931	33.972	34.013	34.054
820	34.095	34.136	34.176	34.217	34.258	34.299	34.339	34.380	34.421	34.461
830	34.502	34.543	34.583	34.624	34.665	34.705	34.746	34.787	34.827	34.868
840	34.909	34.949	34.990	35.030	35.071	35.111	35.152	35.192	35.233	35.273
850	35.314	35.354	35.395	35.435	35.476	35.516	35.557	35.597	35.637	35.678

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

860	35.718	35.758	35.799	35.839	35.880	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.483
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.684	36.724	36.764	36.804	36.844	36.885
890	36.925	36.965	37.005	37.045	37.085	37.125	37.165	37.205	37.245	37.285
900	37.325	37.365	37.405	37.445	37.484	37.524	37.564	37.604	37.644	37.684
910	37.724	37.764	37.803	37.843	37.883	37.923	37.963	38.002	38.042	38.082
920	38.122	38.162	38.201	38.241	38.281	38.320	38.360	38.400	38.439	38.479
930	38.519	38.558	38.598	38.638	38.677	38.717	38.756	38.796	38.836	38.875
940	38.915	38.954	38.994	39.033	39.073	39.112	39.152	39.191	39.231	39.270
950	39.310	39.349	39.388	39.428	39.467	39.507	39.546	39.585	39.625	39.664
960	39.703	39.743	39.782	39.821	39.861	39.900	39.939	39.979	40.018	40.057
970	40.096	40.136	40.175	40.214	40.253	40.292	40.332	40.371	40.410	40.449
980	40.488	40.527	40.566	40.605	40.645	40.684	40.723	40.762	40.801	40.840
990	40.879	40.918	40.957	40.996	41.035	41.074	41.113	41.152	41.191	41.230
1000	41.269	41.308	41.347	41.385	41.424	41.463	41.502	41.541	41.580	41.619
1010	41.657	41.696	41.735	41.774	41.813	41.851	41.890	41.929	41.968	42.006
1020	42.045	42.084	42.123	42.161	42.200	42.239	42.277	42.316	42.355	42.393
1030	42.432	42.470	42.509	42.548	42.586	42.625	42.663	42.702	42.740	42.779
1040	42.817	42.856	42.894	42.933	42.971	43.010	43.048	43.087	43.125	43.164
1050	43.202	43.240	43.279	43.317	43.356	43.394	43.432	43.471	43.509	43.547
1060	43.585	43.624	43.662	43.700	43.739	43.777	43.815	43.853	43.891	43.930
1070	43.968	44.006	44.044	44.082	44.121	44.159	44.197	44.235	44.273	44.311
1080	44.349	44.387	44.425	44.463	44.501	44.539	44.577	44.615	44.653	44.691
1090	44.729	44.767	44.805	44.843	44.881	44.919	44.957	44.995	45.033	45.070
1100	45.108	45.146	45.184	45.222	45.260	45.297	45.335	45.373	45.411	45.448
1110	45.486	45.524	45.561	45.599	45.637	45.675	45.712	45.750	45.787	45.825
1120	45.863	45.900	45.938	45.975	46.013	46.050	46.088	46.126	46.163	46.201
1030	42.432	42.470	42.509	42.548	42.586	42.625	42.663	42.702	42.740	42.779
1040	42.817	42.856	42.894	42.933	42.971	43.010	43.048	43.087	43.125	43.164
1050	43.202	43.240	43.279	43.317	43.356	43.394	43.432	43.471	43.509	43.547
1060	43.585	43.624	43.662	43.700	43.739	43.777	43.815	43.853	43.891	43.930
1070	43.968	44.006	44.044	44.082	44.121	44.159	44.197	44.235	44.273	44.311
1080	44.349	44.387	44.425	44.463	44.501	44.539	44.577	44.615	44.653	44.691
1090	44.729	44.767	44.805	44.843	44.881	44.919	44.957	44.995	45.033	45.070
1100	45.108	45.146	45.184	45.222	45.260	45.297	45.335	45.373	45.411	45.448
1110	45.486	45.524	45.561	45.599	45.637	45.675	45.712	45.750	45.787	45.825
1120	45.863	45.900	45.938	45.975	46.013	46.050	46.088	46.126	46.163	46.201
1130	46.238	46.275	46.313	46.350	46.388	46.425	46.463	46.500	46.537	46.575
1140	46.612	46.649	46.687	46.724	46.761	46.799	46.836	46.873	46.910	46.948
1150	46.985	47.022	47.059	47.096	47.134	47.171	47.208	47.245	47.282	47.319
1160	47.356	47.393	47.430	47.468	47.505	47.542	47.579	47.616	47.652	47.689
1170	47.726	47.763	47.800	47.837	47.874	47.911	47.948	47.985	48.021	48.058
1180	48.095	48.132	48.169	48.205	48.242	48.279	48.316	48.352	48.389	48.426
1190	48.462	48.499	48.536	48.572	48.609	48.645	48.682	48.718	48.755	48.792
1200	48.828	48.864	48.901	48.937	48.974	49.010	49.047	49.083	49.120	49.156
1210	49.192	49.229	49.265	49.301	49.338	49.374	49.410	49.446	49.483	49.519
1220	49.555	49.591	49.627	49.663	49.700	49.736	49.772	49.808	49.844	49.880
1230	49.916	49.952	49.988	50.024	50.060	50.096	50.132	50.168	50.204	50.240
1240	50.276	50.311	50.347	50.383	50.419	50.455	50.491	50.526	50.562	50.598
1250	50.633	50.669	50.705	50.741	50.776	50.812	50.847	50.883	50.919	50.954

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

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1260	50.990	51.025	51.061	51.096	51.132	51.167	51.203	51.238	51.274	51.309
1270	51.344	51.380	51.415	51.450	51.486	51.521	51.556	51.592	51.627	51.662
1280	51.697	51.733	51.768	51.803	51.838	51.873	51.908	51.943	51.979	52.014
1290	52.049	52.084	52.119	52.154	52.189	52.224	52.259	52.294	52.329	52.364
1300	52.398	52.433	52.468	52.503	52.538	52.573	52.608	52.642	52.677	52.712
1310	52.747	52.781	52.816	52.851	52.886	52.920	52.955	52.989	53.024	53.059
1320	53.093	53.128	53.162	53.197	53.232	53.266	53.301	53.335	53.370	53.404
1330	53.439	53.473	53.507	53.542	53.576	53.611	53.645	53.679	53.714	53.748
1340	53.782	53.817	53.851	53.885	53.920	53.954	53.988	54.022	54.057	54.091
1350	54.125	54.159	54.193	54.228	54.262	54.296	54.330	54.364	54.398	54.432
1360	54.466	54.500	54.535	54.569	54.603	54.637	54.671	54.705	54.739	54.773
1370	54.807	54.841	54.875							

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

## APÉNDICE C

### Guía rápida de comandos HTML

---

# GUÍA RÁPIDA DE COMANDOS HTML

---

FUNCIÓN	CÓDIGO HTML		DESCRIPCIÓN
<b>BÁSICOS</b>			
Inicio y fin de documento	<HTML>	</HTML>	Indica al navegador el principio y el fin de un documento HTML. Toda la codificación debe estar incluida en estas etiquetas
encabezado	<HEAD>	</HEAD>	Dentro del encabezado se incluyen las siguientes etiquetas: title, description, autor, keywords.
titulo	<TITLE>	</TITLE>	Es el texto que aparece en la barra de título del navegador.
autor	<meta name="author" content="mi nombre">		Nombre del autor de la página.
descripcion	<meta name="description" content="esta es la pagina principal del centro">		Breve descripción de la página.
Palabras clave	<meta name="keywords" content="ensenada">		Palabras claves con las que un "cliente" puede encontrar nuestra página.
<b>Cuerpo</b>	<BODY>	</BODY>	Cuerpo de la página donde se deben colocar todos los elementos que se visualizarán en el navegador (texto, imágenes, enlaces, tablas, etc.)

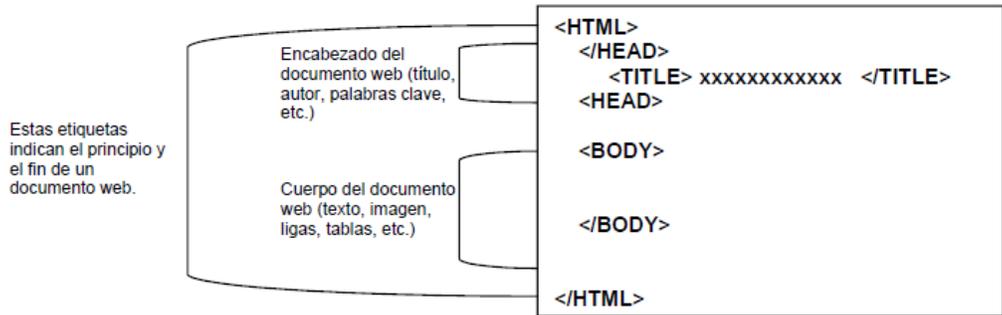
 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FUNCIÓN	CÓDIGO HTML	RESULTADO
<b>PÁGINA</b> fondo (color)	<BODY BGCOLOR="blue"> <BODY BGCOLOR="lightyellow"> <BODY BGCOLOR="#DBD7A4">	*Esta etiqueta debe colocarse en el área del cuerpo del documento (BODY). El fondo de la página aparecerá con el tono de color del código o nombre que se ha indicado.
fondo (img)	<BODY BACKGROUND="fondo.gif">	*En el fondo de la página aparece la imagen que se ha indicado y se repite las veces que cabe en una pantalla.
<b>FUENTES</b> negritas	<B>Esto hará el texto en negritas</B>	<b>Esto hará el texto en negritas</b>
itálico	<I>Esto hará letras itálicas</I>	<i>Esto hará letras itálicas</i>
negritas	<U>Esto hará un texto subrayado</U>	<u>Esto hará un texto subrayado</u>
tachado	<STRIKE>Esto desplegará un texto con una línea</STRIKE>	<del>Esto desplegará un texto con una línea</del>
tamaño	<FONT SIZE="1">Tamaño de fuente 1</FONT> <FONT SIZE="2">Tamaño de fuente 2</FONT> <FONT SIZE="3">Tamaño de fuente 3</FONT> <FONT SIZE="+1">Tamaño de fuente +1</FONT> <FONT SIZE="+2">Tamaño de fuente +2</FONT> <FONT SIZE="-1">Tamaño de fuente -1</FONT> <FONT SIZE="-2">Tamaño de fuente -2</FONT>	Tamaño de fuente 1 Tamaño de fuente 2 Tamaño de fuente 3 Tamaño de fuente 4 Tamaño de fuente 5 Tamaño de fuente -1 Tamaño de fuente -2
color	<FONT COLOR="blue">Texto Azul</FONT> <FONT COLOR="red">Texto Rojo</FONT> <FONT COLOR="yellow">Texto Amarillo</FONT> <FONT COLOR="#000000">Texto Negro </FONT> <FONT COLOR="#FFFFFF">Texto Blanco</FONT> <FONT COLOR="#E1EAF7">Texto Azul Claro</FONT>	Texto Azul Texto Rojo Texto Amarillo Texto Negro Texto blanco Texto Azul Claro
tipo	<FONT FACE="Arial">Fuente arial</FONT>	Fuente arial
<b>ENCABEZADOS</b> Nivel 1	<H1>Nivel 1</H1>	<b>Nivel 1</b>

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

<b>Nivel 2</b>	<H2>Nivel 2</H2>	<b>Nivel 2</b>
<b>Nivel 3</b>	<H3>Nivel 3</H3>	<b>Nivel 3</b>
<b>Nivel 4</b>	<H4>Nivel 4</H4>	<b>Nivel 4</b>
<b>Nivel 5</b>	<H5>Nivel 5</H5>	<b>Nivel 5</b>
<b>Nivel 6</b>	<H6>Nivel 6</H6>	<b>Nivel 6</b>
<b>ALINEACIÓN</b>	<CENTER>Esto centrará una región del texto, imágenes, etc.</CENTER>	Esto centrará una región del texto, imágenes, etc.
<b>SALTO DE LÍNEA</b>	Salto de línea	Salto de línea
<b>PÁRRAFO</b>	Nuevo<P>Párrafo	Nuevo Párrafo
<b>IMÁGENES</b>	<IMG SRC="cicese.gif"></IMG>	
<b>ENLACES interno</b>	<A HREF="otro_archivo.htm">Crea un enlace a una página en el mismo servidor</A>	<u>Crea un enlace a una página en el mismo servidor</u>
<b>externo</b>	<A HREF="http://www.cicese.mx">Crea un enlace a una página/sitio en otro servidor</A>	<u>Crea un enlace a una página/sitio en otro servidor</u>
<b>correo</b>	Crea un enlace a un < A HREF="mailto:desquer@uabc.mx">correo-e</A>	Crea un enlace a un <u>correo-e</u>
	<A HREF="http://www.cicese.mx"> Crea un enlace con una foto</A>	 <u>Crea un enlace con una foto</u>
<b>LISTAS</b>	<UL><LI>ítem 1</LI><LI>ítem 2</LI></UL>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ítem 1</li> <li>• ítem 2</li> </ul>
<b>Viñetas</b>		
<b>Numerada</b>	<OL><LI>ítem 1</LI><LI>ítem 2</LI></OL>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ítem 1</li> <li>2. ítem 2</li> </ol>

<b>LÍNEAS</b>	<HR>			
<b>TABLAS</b>	<pre>&lt;TABLE BORDER="1"&gt; &lt;TR&gt; &lt;TD&gt;uno&lt;/TD&gt; &lt;TD&gt;dos&lt;/TD&gt; &lt;/TR&gt; &lt;TR&gt; &lt;TD&gt;tres&lt;/TD&gt; &lt;TD&gt;cuatro&lt;/TD&gt; &lt;/TR&gt; &lt;/TABLE&gt;</pre>			
<b>CARACTERES ESPECIALES</b>	&aacute; → á &acirc; → ê &iacute; → ï &oacute; → ó &uacute; → ú	&Aacute; → Á &Eacute; → É &Iacute; → Í &Oacute; → Ó &Uacute; → Ú	&ntilde; → ñ &Ntilde; → Ñ &copy; → © &reg; → ® &uuml; → ü	&lt; → < &gt; → > &#137; → % &#153; → ™ &cent; → ¢





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

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_