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

EVALUACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA EMBEBIDO EN UN MATERIAL CERÁMICO EN SISTEMA DE BOLAS EMPACADAS

Santiago José Gutiérrez Cardona

Tecnología Electromecánica

Luis Fernando Cardona Sepúlveda

Asesor


INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

FACULTAD DE INGENIERIAS

TECNOLOGÍA ELECTROMECAÁNICA

MEDELLÍN-COLOMBIA

2016

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

RESUMEN


El principal objetivo de este trabajo se centra en tratar de buscar solución al problema que tienen las mediciones de temperatura con termopares en un fluido. El tema central del problema es la falta de exactitud en este tipo de instrumento cuando se realiza un proceso experimental recogiendo datos.

Al utilizar un termopar para medir temperatura en un fluido se acercan la punta de éste a la superficie de interés. Al realizar este proceso se ve afectado el patrón de flujo alrededor del termopar, llevando así a una mala medición en un multímetro o en una tarjeta de adquisición de datos, ya que se obstruye con el volumen del termopar y el cable el flujo del fluido en la zona donde se ubican éstos.

Esta interferencia también ocurre en proyectos experimentales con bolas de cerámica empacadas (regeneradores, acumuladores de calor, quemadores de gas entre otros) al momento de medir la temperatura superficial de las bolas.

En este trabajo se plantea una rectificación de estas mediciones, diseñando un sensor de temperatura embebido en las bolas cerámicas, haciéndoles un orificio en donde la punta metálica del termopar se inserta evitando así que esta afecte el fluido cerca de la superficie de la bola y por ende la medida. Se plantea evaluar experimentalmente el patrón de calentamiento de bolas cerámicas para determinar la sensibilidad del sensor y la rapidez de calentamiento del material. Esta toma de mediciones se realizará en el laboratorio de ciencias térmicas del Instituto Tecnológico Metropolitano con el instrumento termopar convencional y con el propuesto en este trabajo.

Palabras clave: Termopares, medición de temperatura, fluido, patrón de flujo, sensor, bolas de cerámica, interferencia.


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

RECONOCIMIENTOS

Agradezco el apoyo y la confianza que me fueron entregadas por parte del asesor y director Luis Fernando Cardona Sepúlveda encargado del proyecto que además fue el eje, con su conocimiento y dedicación en el tema a tratar, los cuales ayudaron para un buen desarrollo temático que dieron pie a críticas constructivas, conclusiones y recomendaciones para un trabajo a futuro. De igual forma le doy las gracias al jefe encargado del laboratorio de Termodinámica en la sede Fraternidad puesto que nos facilitó el lugar para realizar algunas pruebas, además nos aconsejó en un momento de la experimentación.

Le agradezco a los señores Jesús Alberto Ríos y Carlos Ospina de la empresa Ríos Cerámica quienes aportaron con su buen trabajo artesanal cerámico creando esferas ideas para la realización del proceso experimental.

Por último, le doy las gracias a mi familia que apoyó incondicionalmente el proceso y que estuvo atenta con el desarrollo y la conclusión de este. En el proceso experimental mi padre estuvo presente con sus buenos consejos y sabiduría para darme claridad frente a muchas situaciones, por esto y más le agradezco mucho.

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

ACRÓNIMOS

Símbolo	Término
<i>T</i>	Temperatura
°C	Grados Celsius
<i>V</i>	Voltios
<i>mV</i>	mili voltios
<i>W</i>	Potencia
<i>C</i>	Calor específico
<i>k</i>	Conductividad Térmica
<i>Ni</i>	Níquel
<i>Cu</i>	Cobre
<i>Cr</i>	Cromo
<i>Fe</i>	Hierro
<i>Al</i>	Aluminio
<i>d</i>	Diámetro
ρ	Densidad
<i>t</i>	Tiempo


Abreviaturas

<i>FEM</i>	Fuerza electromotriz
<i>DIN</i>	Instituto Alemán de Normalización

 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.....	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1 Termopares.....	15
2.1.1 Tipos de termopares.	17
2.1.2 Función polinómica f.e.m.	20
2.1.3 Termopares con protección	21
2.2 Esferas empacadas.....	23
2.3 Material cerámico de fabricación de las esferas.....	25
2.4 Ecuación de la conducción de calor en una esfera.	26
3. METODOLOGÍA.....	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1 Diseño y construcción del medidor de temperatura embebido en material cerámico.	42
4.1.1 Medidor de temperatura embebido en material cerámico.	42
4.2 Pruebas experimentales	48
4.2.1 Recolección de datos.	48
4.2.2 Gráficas	51
4.3 Análisis de resultados	57
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	61
5.1 Conclusiones.....	61
5.2 Recomendaciones	62
REFERENCIAS.....	63
APÉNDICE	64
Apéndice A.....	64
Apéndice B.....	66

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

INDICES DE TABLAS Y FIGURAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Termopar. Fuente: (Creus, 2010).	15
Figura 2. Curvas características fem/temperatura de los termopares. Fuente: (Creus, 2010)	17
Figura 3. Tubos de protección y vainas para termopares. Fuente: (Creus, 2010).....	23
Figura 4. Diagrama esquemático de maquina experimental. Fuente: (Singh, Saini, & Saini, 2006).....	24
Figura 5. Diferentes puntos donde se ubican los termopares. Fuente: (Smith & Hashemi, 2006).....	25
Figura 6. Conducción unidimensional de calor a través de un elemento de volumen de una esfera. Fuente: (Cengel, 2011).	27
Figura 7. Fábrica de cerámica en Caldas Antioquia. Fuente: Autor.....	29
Figura 8. Moldes para las esferas cerámicas. Fuente: Autor.....	30
Figura 9. Arcilla de San Antonio, Fuente: Autor.	30
Figura 10. Horno de gas, Fuente: Autor.	31
Figura 11. Esferas de cerámica de dos tamaños y con perforaciones, Fuente: Autor.	31
Figura 12. Horno para proceso de esmaltado y autor del trabajo. Fuente: Autor.....	32
Figura 13. Esferas esmaltadas con sus trípodes, Fuente: Autor.....	33
Figura 14. Multímetro y termopar tipo K, Fuente: Autor.....	33
Figura 15. Medidor de temperatura embebido en un material cerámico esférico. Fuente: Autor.....	34


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

Figura 16. Mediciones en agua con termopar embebido y en superficie de esfera. Fuente: Autor	34
Figura 17. Mediciones en la superficie y embebido en las esferas. Fuente: Autor	35
Figura 18. Esfera grande con termopar embebido con sellante. Fuente: Autor	36
Figura 19. Esfera pequeña con termopar embebido con sellante. Fuente: Autor	36
Figura 20. Esfera de alúmina de alta densidad, con ensayo de perforación. Fuente: Autor	37
Figura 21. Recuperador de calor. Fuente: Autor	38
Figura 22. Termopares originales del recuperador de calor. Fuente: Autor.	39
Figura 23. Collar de esferas con el termopar embebido. Fuente: Autor	39
Figura 24. Collar y esferas empacadas en el recuperador de calor. Fuente: Autor.....	40
Figura 25. Tubo del recuperador de calor	40
Figura 26. Paneles de control. Fuente: Autor.....	41
Figura 27. Mezcla de arcilla para cerámica. Fuente: Autor	42
Figura 28. Moldes de yeso. Fuente: Autor	43
Figura 29. Horno para cocción a 900 °C. Fuente: Autor	44
Figura 30. Horno para proceso de esmaltado a 1200 °C. Fuente: Autor.....	44
Figura 31. Esferas esmaltadas con trípode. Fuente: Autor	45
Figura 32. Esfera ensamblada. Fuente: Autor.	45
Figura 33. Esfera sellada. Fuente: Autor.	46
Figura 34. Medidor de temperatura. Fuente: Autor.	47
Figura 35. Medidor de temperatura. Fuente: Autor.	47
Figura 36. Grafica de los resultados de la prueba 1, 2, 3, 4 y 5. Fuente: Autor.....	52
Figura 37. Grafica de los resultados de la prueba 1 y 5. Fuente: Autor.	52


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

Figura 38. Grafica de los resultados de las pruebas 6,7 y 8. Fuente: Autor. 53

Figura 39. Grafica de los resultados de la pruebas 9,10 y 11. Fuente: Autor..... 53

Figura 40. Grafica de los resultados de las pruebas 12,13 y 14. Fuente: Autor 54

Figura 41. Grafica de los resultados de las pruebas 15 y 16. Fuente: Autor. 54


Figura 42. Grafica de los resultados de la prueba 17. Fuente: Autor..... 55

Figura 43. Grafica de los resultados de las pruebas 4 y 18. Fuente: Autor. 55

Figura 44. Grafica de los resultados de las pruebas 21, 22 y 23. Fuente: Autor. 56

Figura 45. Grafica de los resultados de la prueba 24, 25, 26 y 27. Fuente: Autor. 56

Figura 46. Grafica de los resultados de la prueba 28. Fuente: Autor..... 57

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

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tolerancias y temperaturas de trabajo de termopares. Fuente: (Creus, 2010). ...	20
Tabla 2. Coeficientes polinómicos para los termopares. Fuente: (Creus, 2010).....	21
Tabla 3. Numero de prueba con su descripción. Fuente: Autor.....	48
Tabla 4. Peso y diámetro de esferas pequeñas. Fuente: Autor.....	50
Tabla 5. Peso y diámetro de esferas grandes. Fuente: Autor.....	50
Tabla 6. Densidades de las esferas pequeñas. Fuente: Autor.	50
Tabla 7. Densidad de las esferas grandes. Fuente: Autor.	51
Tabla 8. Prueba 1 de esfera pequeña (a) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor	66
Tabla 9. Prueba 2 de esfera pequeña (b) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor	66
Tabla 10. Prueba 3 de esfera pequeña (c) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor	66
Tabla 11. Prueba 4 de esfera pequeña (d) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor	67
Tabla 12. Prueba 5 de esfera pequeña (e) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor.....	67
Tabla 13. Prueba 6 de esfera grande (A) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor	68
Tabla 14. Prueba 7 de esfera grande (B) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor.....	69
Tabla 15. Prueba 8 de esfera grande (C) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor.....	70
Tabla 16. Prueba 9 de esfera pequeña (a) con temperatura-tiempo en agua caliente. Fuente: Autor.....	71


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

Tabla 17. Prueba 10 de esfera pequeña (b) con temperatura-tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor..... 71

Tabla 18. Prueba 11 de esfera pequeña (c) con temperatura-tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor..... 72

Tabla 19. Prueba 12 de esfera grande (A) con temperatura- tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor..... 72

Tabla 20. Prueba 13 de esfera grande (B) con temperatura-tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor..... 73

Tabla 21. Prueba 14 de esfera grande (C) con temperatura-tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor..... 74

Tabla 22. Prueba 15 de esferas pequeñas (a) y (b) con temperatura-tiempo en horno.
Fuente: Autor..... 74

Tabla 23. Prueba 16 de esferas pequeñas (c), (d) y (e) con temperatura-tiempo en horno.
Fuente: Autor 79

Tabla 24. Prueba 17 de esferas grandes (A), (B) y (C) con temperatura-tiempo en horno.
Fuente: Autor..... 82

Tabla 25. Prueba 18 de esfera pequeña sellada (a) con temperatura-tiempo en agua fría.
Fuente: Autor..... 87

Tabla 26. Prueba 19 de esfera pequeña sellada (a) con temperatura-tiempo en agua caliente. Fuente: Autor 88

Tabla 27. Prueba 20 de esfera grande sellada (C) con temperatura-tiempo en agua fría.
Fuente: Autor..... 88

Tabla 28. Prueba 21 de esfera pequeña (a) con temperatura-tiempo medida en la superficie en agua fría. Fuente: Autor 89

Tabla 29. Prueba 22 de esfera pequeña (b) con temperatura-tiempo medida en la superficie en agua fría. Fuente: Autor 90

Tabla 30 Prueba 23 de esfera grande (A) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua fría. Fuente: Autor 91


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


Tabla 31 Prueba 24 de esfera pequeña (a) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua caliente. Fuente: Autor. 91

Tabla 32 Prueba 25 de esfera pequeña (b) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua caliente. Fuente: Autor. 92

Tabla 33 Prueba 26 de esfera grande (A) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua caliente. Fuente: Autor. 92

Tabla 34. Prueba 27 de esfera grande (B) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua caliente. Fuente: Autor. 92

Tabla 35. Prueba 28 de esferas empacadas con temperatura-tiempo medida en el centro y superficie de la bola. Fuente: Autor. 93

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

1. INTRODUCCIÓN


1.1 Generalidades

En nuestra sociedad Colombiana se hace necesario la correcta implementación de sistemas de medición las cuales sean confiables y que posibiliten un alto desarrollo tecnológico que genere efectividad y ahorro en procesos industriales. La medición de temperatura requiere utilizar instrumentos que puedan tomar datos con un excelente grado de exactitud, pues esta información es indispensable tanto en investigación como en la industria, para que aumente el grado de confianza y entregue valor agregado. Por ejemplo, en el desarrollo y evaluación de un prototipo de recuperador de calor residual de lecho empacado (Rua, 2015), se puede evidenciar la necesidad de mediciones de alta fidelidad en sistemas que utilicen flujos calientes.

Los elementos de medición de temperatura, en este caso termopares, están en contacto con el fluido. Es necesario que tengan una protección para evitar que, en la recolección de datos, éstos instrumentos estén interviniendo en el patrón de flujo y por ende perturbando los datos al momento de medir. Esto ocurre también en sistemas de lecho empacado/porosos como el mencionado anteriormente, donde se debe poner la punta del termopar en la superficie del material a medir. Existe entonces una gran incertidumbre pues este instrumento modifica el patrón de flujo que pasa alrededor del punto de contacto dando así una medida desconfiable.

En sistemas de bolas empacadas en particular existe una manera de mejorar las mediciones: insertar la punta del termopar en el centro de la esfera y el cable del termopar fuera del contacto del fluido, lo que se logra perforando unas esferas hasta el centro y otras totalmente.

Este proyecto va encaminado en buscar mejorar la calidad de la medición de temperatura

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

en sistemas térmicos de lecho de bolas empacadas. Para esto se deben realizar experimentos de medida de temperatura con y sin esferas para analizar si la estrategia propuesta mejora las mediciones.


1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar un sensor de temperatura embebido en un material cerámico, que evite el cambio del patrón de flujo del fluido para un sistema de esferas empacadas, de modo que la medida se haga más confiable.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un medidor de temperatura utilizando materiales cerámicos y que permita hacer lectura de temperaturas desde adentro haciéndolas más confiables.
- Evaluar y comparar experimentalmente la temperatura superficial de las bolas cerámicas en un proceso de calentamiento con el sensor propuesto y con uno convencional.
- Evaluar y comparar experimentalmente el tiempo de respuesta del sensor propuesto respecto al tamaño de la bola cerámica en la cual está embebida respecto al caso convencional.

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


1.3 Organización de la tesis

En el marco teórico se describe elementos fundamentales acerca de los termopares haciendo énfasis en la historia y cómo funcionan, mostrando los tipos y los materiales de fabricación, además de tener elementos físicos de transferencia de calor y trabajos en los que utilizan esferas en lechos empacados.

La metodología da una descripción detallada de cómo se realizaron las actividades para llegar al cumplimiento de los objetivos propuestos, entre éstas están la fabricación de las esferas, método de medición y descripción general de sistemas utilizados.

En los resultados y las discusiones se da una descripción detallada con los pasos a seguir para la creación del medidor de temperatura embebido en material cerámico, con sus partes fundamentales. También se plasma tanto la mezcla de las esferas cerámicas como los moldes empleados para la creación de éstas. De igual forma se muestra la manera de cómo es su ensamble con sellante o sin sellante. Se muestra el medidor utilizado y su referencia. En esta parte también se encuentran las pruebas experimentales con la recolección de datos y las gráficas correspondientes, de igual forma se incluyen el análisis de los resultados realizado con base a las gráficas.

En las conclusiones se sintetizan los principales resultados obtenidos luego del proceso de experimentación, dando respuesta a los objetivos planteados, asimismo se incluyen las limitaciones y fortalezas que se dieron en el transcurso del trabajo. De igual forma se describen las recomendaciones para mejorar el proceso de fabricación de las esferas.

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

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Termopares

El *termopar* se basa en el efecto, descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura, tal como se muestra en la figura 1 (Creus, 2010). El termopar consiste en dos conductores metálicos diferentes unidos en un extremo denominado casi siempre unión caliente o detectora, y que van conectados a algún instrumento de medición de f.e.m. (Fuerza electromotriz), o sea, un mili voltímetro potenciómetro en el extremo frío de los conductores. La f.e.m. medida se compara normalmente con una referencia, por ejemplo, el punto de fusión del hielo (Soisson, 2007).

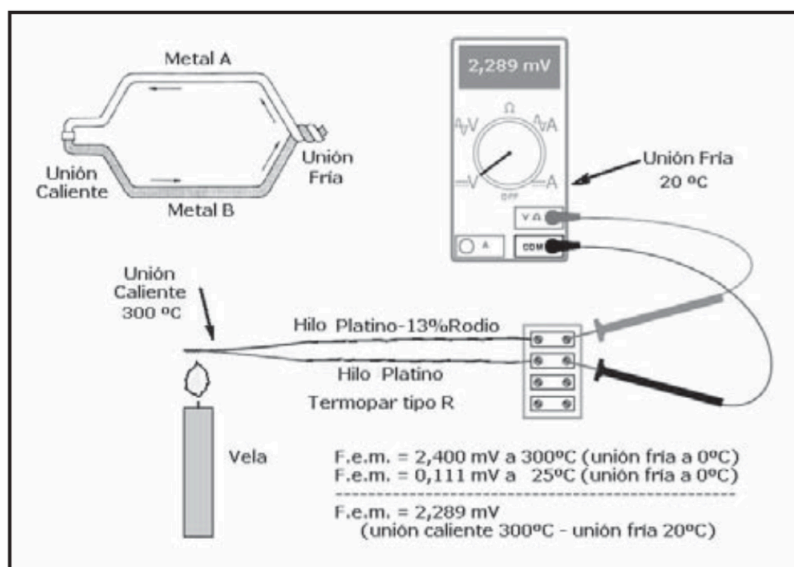



Figura 1. Termopar. Fuente: (Creus, 2010).

Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier (año 1834) que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de los


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

metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión y el efecto Thomson (año 1854), que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas (Creus, 2010).

Estudios realizados sobre el comportamiento de termopares han permitido establecer tres leyes fundamentales (Creus, 2010):

1. Ley del circuito homogéneo. En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor
2. Ley de los metales intermedios. Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura A, a otro punto B, la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B.
3. Ley de las temperaturas sucesivas.

Por estas leyes, se hace evidente que en el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua, proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperaturas con la unión de referencia. Los valores de esta f.e.m. están tabulados en tablas de conversión con la unión de referencia a 0 °C. En la figura 2 se presentan las curvas características de los termopares, que pueden utilizarse como guía en la selección de los mismos (Creus, 2010).

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

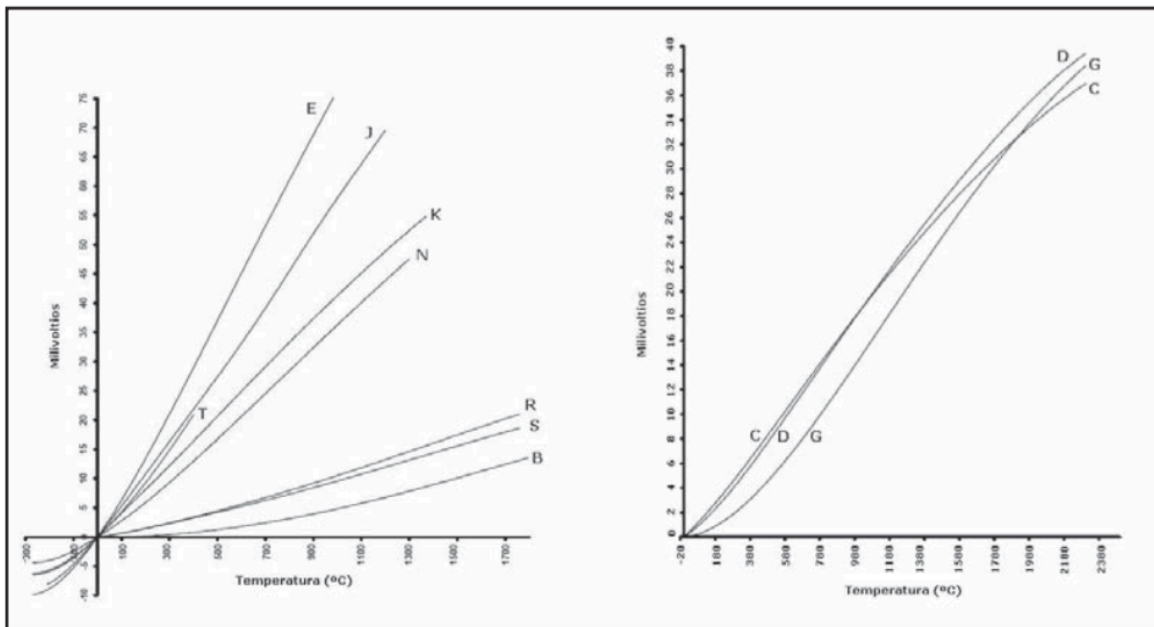



Figura 2. Curvas características fem/temperatura de los termopares. Fuente: (Creus, 2010)


2.1.1 Tipos de termopares.

La selección de los alambres para termopares se hace de forma que tengan una resistencia adecuada a la corrosión, a la oxidación, a la reducción y a la cristalización, que desarrollen una f.e.m. relativamente alta, que sean estables, de bajo coste y de baja resistencia eléctrica, y que la relación entre la temperatura y la f.e.m. sea tal que el aumento de ésta sea (aproximadamente) paralelo al aumento de la temperatura (Creus, 2010).

- Termopar tipo E, de Níquel-Cromo (cromel)/Cobre-Níquel (constantan). Puede usarse en vacío o en atmósfera inerte o medianamente oxidante o reductora. Este termopar posee la f.e.m. más alta por variación de temperatura. Es adecuado para temperaturas entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alta sensibilidad ($68\text{ V}/^{\circ}\text{C}$).

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

- Termopar tipo T, de Cobre/Cobre-Níquel (constatan). Tiene una elevada resistencia a la corrosión por humedad atmosférica o condensación y puede utilizarse en atmósferas oxidantes o reductoras. Se pre ere, generalmente, para las medidas de temperatura entre -200 °C y +260 °C.
- Termopar tipo J, de Hierro/Cobre-Níquel (constatan). Es adecuado en atmósferas inertes y para temperaturas entre -200 °C y 1.200 °C. La oxidación del hilo de hierro aumenta rápidamente por encima de 550 °C, siendo necesario un mayor diámetro del hilo hasta una temperatura límite de 750 °C. También es necesario tomar precauciones a temperaturas inferiores a 0 °C debido a la condensación del agua sobre el hierro.
- Termopar tipo K, de Níquel-Cromo (cromel) /Níquel-Aluminio (alumel). Se recomienda en atmósferas oxidantes y a temperaturas de trabajo entre 500 °C y 1.250° C. No debe ser utilizado en atmósferas reductoras ni sulfurosas, a menos que esté protegido con un tubo de protección. Se utiliza para temperaturas entre -40 °C y 1.100 °C.
- Termopar tipo R (Platino-13% Rodio/Platino). Se emplea en atmósferas oxidantes y temperaturas de trabajo de hasta 1.500 °C. Es más estable y produce una f.e.m. mayor que el tipo S. Poca sensibilidad (10 V/°C).
- Termopar tipo S (Platino-10% Rodio/Platino), de características similares al tipo R. Poca sensibilidad (10 V/°C).
- Tipo B (Platino-30% Rodio/Platino-6% Rodio), adecuado para altas temperaturas hasta los 1.800 °C. Poca sensibilidad (10 V/°C).

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

- Termopar tipo N (84,6% Níquel-14% Cromo-1,4% Silicio)/ (95,6% Níquel-0,4% Silicio). Protegido con aislamiento de óxido de berilio y camisa de molibdeno y de tantalio, se emplea en atmósferas inertes o en vacío a las temperaturas de trabajo de 0 °C a 2316 °C.

Se utiliza, cada vez con mayor frecuencia, para sustituir al tipo K, presentando una mejor estabilidad y una mejor resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Otros termopares son:

- Tipo C (Tungsteno-5% Renio/Tungsteno-26% Renio) (ASTME 988), con temperaturas de trabajo entre 0 °C y 2320 °C.
- Tipo D (Tungsteno-3% Renio/Tungsteno-25% Renio) (ASTME 988), con temperaturas de trabajo entre 0 °C y 2495 °C.
- Tipo G (Tungsteno/Tungsteno-26% Renio), con temperaturas de trabajo entre 0 °C y 2320 °C.
- Tipo L (Hierro/Cobre-Níquel) (DIN 43710), similar al tipo J, con temperaturas de trabajo entre -200 °C y +900 °C.
- Tipo U (Cobre/Cobre-Níquel) (DIN 43710), similar al tipo T, con temperaturas de trabajo entre -200 °C y +600 °C.

Para este proceso experimental se utilizó el termopar tipo K, el cual podemos plasmar los valores con tolerancias y temperaturas de trabajo de esta clase en particular mostradas en la tabla 1, de igual forma se muestra en el apéndice A la f.e.m del termopar en función de la temperatura (°C) – Unión de referencia a 0 (°C).


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

Tabla 1. Tolerancias y temperaturas de trabajo de termopares. Fuente: (Creus, 2010).

TERMOPAR	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	Temperaturas de trabajo
Tipo E Ni Cr/Cu Ni	±1.5°C ó ±(0.004 x t) -40°C a 800°C	±2.5°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 900°C	±2.5°C ó ±(0.0015 x t) -200°C a 40°C	-200 a 915 °C
Tipo T Cu/Cu Ni	±0.5°C ó ±(0.004 x t) -40°C a 350°C	±1°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 350°C	±1°C ó ±(0.0015 x t) -200°C a 40°C	-200 a +400 °C
Tipo J Fe/Cu Ni	±1.5°C ó ±(0.004 x t) -40°C a 750°C	±2.5°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 750°C	-----	-200 a +1200 °C
Tipo K Ni Cr/Ni Al	±1.5°C ó ±(0.004 x t) -40°C a 1000°C	±2.5°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 1200°C	±2.5°C ó ±(0.0015 x t) -200°C a 40°C	-200 a +1372 °C
Tipo R Pt13%Rh/Pt	±1°C ó (1+0.003(t-1100)) 0°C a 1600°C	±1.5°C ó ±(0.0025 x t) 0°C a 1600°C	-----	-50 a +1768 °C
Tipo S Pt10%Rh/Pt	±1°C ó (1+0.003(t-1100)) 0°C a 1600°C	±1.5°C ó ±(0.0025 x t) 0°C a 1600°C	-----	-50 a +1768 °C
Tipo B Pt30%Rh/Pt6%Rh	-----	±1.5°C ó ±(0.0025 x t) 600°C a 1700°C	±4°C ó ±(0.005 x t) 600°C a 1700°C	0 a 1820 °C
Tipo N Ni Cr Si/Ni Si Mg	±1.5°C ó ±(0.004 x t) 40°C a 1000°C	±2.5°C ó ±(0.0075 x t) -40°C a 1200°C	±2.5°C ó ±(0.0015 x t) -200°C a 40°C	-270 a 1300 °C

2.1.2 Función polinómica f.e.m.

La función polinómica f.e.m. La función polinómica para el termopar tipo K con T en °C.

$$mV = \sum_{i=0}^n a_i \times T^i + a_0 \times e^{a_1 \times (T - a_2)^2}$$

Los coeficientes a_i se encuentran en la tabla 2. La función polinómica inversa determina la temperatura T (°C) a partir de la f.e.m. (mV) desarrollada por el termopar:

$$T(^{\circ}C) = \sum_{i=0}^n d_i \times (mV)^i$$



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

Tabla 2. Coeficientes polinómicos para los termopares. Fuente: (Creus, 2010).

Termopar tipo K						
Campo de medida (°C)	Coeficientes			Campo de medida (°C)	Coeficientes	
-270 a 0	a0	0.000000000000E+00		0 a 1372	a0	-0.176004136860E-01
	a1	0.394501280250E-01			a1	0.389212049750E-01
	a2	0.236223735980E-04			a2	0.185587700320E-04
	a3	-0.328589067840E-06			a3	-0.994575928740E-07
	a4	-0.499048287770E-08			a4	0.318409457190E-09
	a5	-0.675090591730E-10			a5	-0.560728448890E-12
	a6	-0.574103274280E-12			a6	0.560750590590E-15
	a7	-0.310888728940E-14			a7	-0.320207200030E-18
	a8	-0.104516093650E-16			a8	0.971511471520E-22
	a9	-0.198892668780E-19			a9	-0.121047212750E-25
	a10	-0.163226974860E-22			Coeficientes Exponencial	a0
			a1	-0.118343200000E-03		
			a2	0.126968600000E+03		

2.1.3 Termopares con protección

Los termopares de superficie (Skin Points) se utilizan para tomar la temperatura de una superficie (tubería, depósito, horno, etc.). Están embebidos en una lámina que puede curvarse y que se suelda a la tubería. En la mayoría de ocasiones no es deseable exponer los termopares (o los sensores de temperatura en general) directamente a las condiciones de un proceso. Por ello, se utilizan fundas o vainas de protección para evitar los daños

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

causados por erosión, corrosión, abrasión, y por los procesos de alta presión, en forma parecida a la sonda de resistencia (Creus, 2010).


El sensor debe ajustarse al máximo en la vaina, al objeto de lograr una mínima resistencia a la transferencia de calor y, por lo tanto, una máxima velocidad de transmisión de la temperatura. Incluso en los procesos de captación de temperatura de gases se opta, siempre que sea posible, por tener el sensor en contacto directo con los gases, sirviendo la vaina, exclusivamente, como elemento de protección mecánica (Creus, 2010).

Los errores debidos a la conducción del calor del fluido de la vaina se minimizan mediante la utilización de termopares de pequeño diámetro y mayor longitud (profundidad de inmersión de diez diámetros de vaina), materiales para la vaina que tengan baja conductividad térmica o consiguiendo altos coeficientes de convección de transmisión de calor entre el fluido y el termopar. Cuando los termopares directos convencionales no proporcionan una adecuada medida de la temperatura del fluido se pueden diseñar termopares angulados o curvos para mejorar aún más las medidas (Creus, 2010).

En aplicaciones especiales se emplean tubos de protección contruidos con materiales metálicos o cerámicos tales como porcelana, grafito, oxido de aluminio, carburo de silicio, etc. Los tubos de protección cerámicos se emplean cuando el termopar está expuesto a la acción directa de una llama, están presentes gases contaminantes, o bien cuando las temperaturas son superiores a las que pueden tolerar los tubos metálicos (baños de tratamientos térmicos) (Creus, 2010).

Los termopares de platino, normalmente, precisan de un tubo cerámico que los proteja contra la contaminación de los gases de los hornos y otros gases reductores (Creus, 2010).

En la figura 3 pueden verse varios tipos de termopares con tubo de protección. El material del tubo de protección o vaina debe ser el adecuado para el proceso donde se aplica y

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

suele ser de hierro, acero sin soldadura, acero inoxidable, inconel, cerámico, carburo de silicio, etc. (Creus, 2010) .

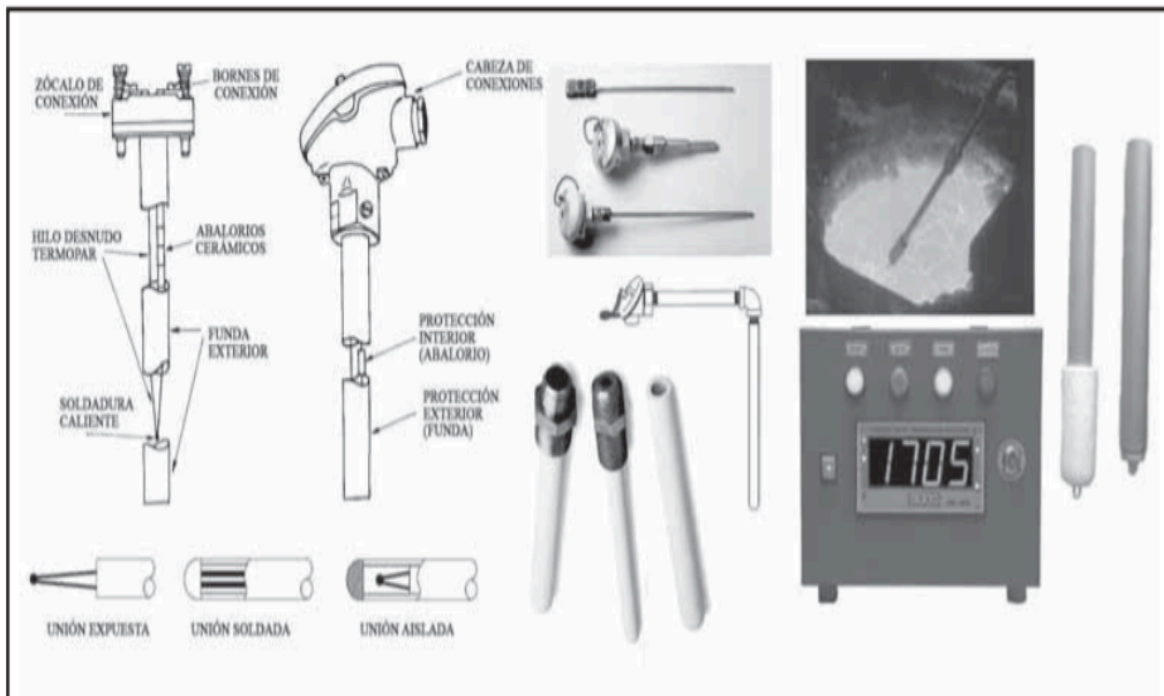



Figura 3. Tubos de protección y vainas para termopares. Fuente: (Creus, 2010).

2.2 Esferas empacadas

Los usos de las esferas empacadas son varios a nivel investigativo e industrial. Por ejemplo en sistemas de almacenamiento de energía solar con bolas empacadas, se trata de establecer rendimientos a partir del número de Nusselt en función del número de Reynolds (Singh, Saini, & Saini, 2006). Para esas mediciones de temperatura se utilizaron termopares insertados en grifos a lo largo del tubo. El montaje se muestra en la figura 4.

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

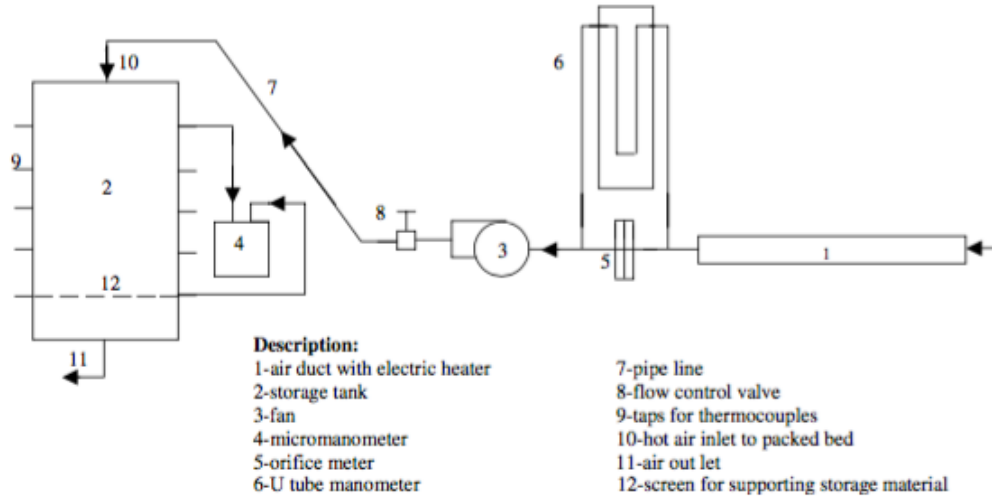
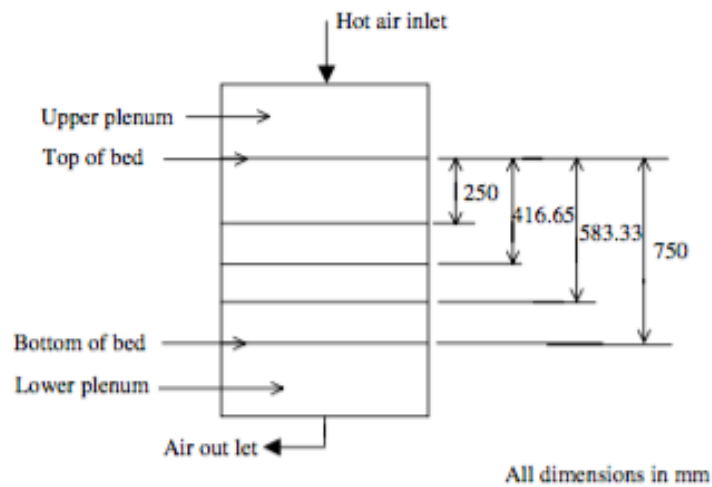


Figura 4. Diagrama esquemático de maquina experimental. Fuente: (Singh, Saini, & Saini, 2006).

Antes de embalaje de material de almacenamiento, los termopares eran fijos en ranuras de tamaño pequeño. Durante el embalaje éstos fueron colocados en diferentes puntos en secciones transversales del lecho junto con termopares para la medición de la temperatura del aire en los mismos puntos. Este diseño se muestra en la figura 5 (Smith & Hashemi, 2006).




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

Figura 5. Diferentes puntos donde se ubican los termopares. Fuente: (Smith & Hashemi, 2006)


En otro sistema de bolas empacadas nos referimos a otro estudio realizado, el cual consiste en analizar las características de la filtración en la combustión de gas premezclado en un quemador de medio poroso (Wu, Liu, Xie, Liu, & Sun, 2012).

En el Instituto Tecnológico Metropolitano también se realizó un estudio experimental acerca de la estabilidad de la combustión y la eficiencia térmica en un quemador de medios porosos utilizando partículas de alúmina procedentes de los desechos de molienda. (Herrera, Cagua, & Olmos-Villalba, 2015). En este y en el anterior ejemplo la metodología de medición de temperatura es similar a la explicada al principio de esta sección (Smith & Hashemi, 2006).

2.3 Material cerámico de fabricación de las esferas.

De acuerdo a la literatura las arcillas utilizadas para cerámica convencional son ricas en silicatos y rocas silicatadas. Los principales minerales que entran en composiciones cerámicas son: cuarzo, feldespatos, nefelina, talco, magnesita, olivino, serpentina, sepiolita, vermiculita, wollastonita, cromita, grafito, andalucita/sillimanita/distena, cordierita, pirofilita, minerales de Li y B, zircón (Galan & Aparicio).

Una consistencia porosa ya que permite absorción de agua del 26.60%. Es de vital importancia tener en cuenta que las esferas debido a ser de cerámica presentan buenas estabilidad química y térmica. Además los materiales cerámicos son duros y quebradizos, tienen altos puntos de fusión y son malos conductores térmicos y eléctricos, esto debido a sus enlaces iónicos y covalentes lo cual proporcionan resultados experimentales mucho más confiables en el objeto de estudio (Smith & Hashemi, 2006).

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

2.4 Ecuación de la conducción de calor en una esfera.

La conducción de calor a través de una pared plana grande, como la de una casa, se puede considerar unidimensional, ya que la conducción a través de ella será dominante en una dirección y despreciable en las demás. Este es también el caso de la conducción de calor unidimensional en esferas (Cengel, 2011).


Considere una esfera con densidad ρ , calor específico c y radio exterior R . El área de la esfera normal a la dirección de transferencia de calor, en cualquier lugar, es $A=4\pi r^2$, en donde r es el valor del radio en ese lugar. Noté que, en este caso, el área de transferencia de calor A , depende de r y, por lo tanto, varía con la ubicación. Al considerar un elemento con forma de casco esférico delgado de espesor Δr , la ecuación unidimensional de conducción de calor en régimen transitorio para una esfera es la ecuación 3. En la ecuación 4 se muestra el caso cuando la conductividad se vuelve constante (Cengel, 2011).

- **Conductividad variable**

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

- **Conductividad constante**

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

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

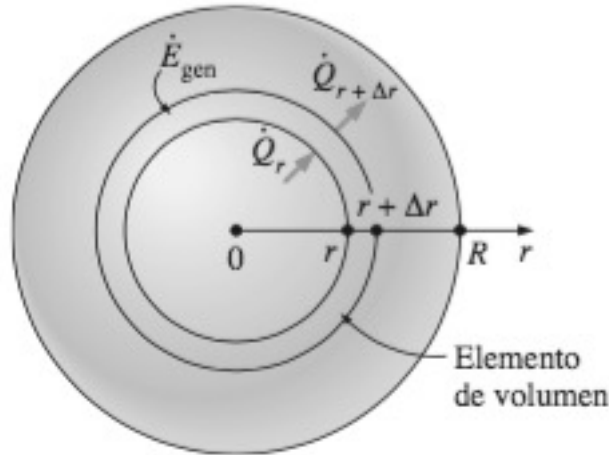


Figura 6. Conducción unidimensional de calor a través de un elemento de volumen de una esfera. Fuente: (Cengel, 2011).

La propiedad $\alpha = k/\rho c$ de difusividad térmica del material. En condiciones específicas las ecuaciones se pueden reducir a las formas siguientes (Cengel, 2011).

Régimen estacionario: $(\partial/\partial t = 0)$


$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = 0$$

Sin generación interna de calor ($\dot{e}_{gen} = 0$)

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Régimen estacionario sin generación de calor ($\partial/\partial t = 0$ y $\dot{e}_{gen} = 0$)

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad \text{o} \quad r \frac{d^2 T}{dr^2} + 2 \frac{dT}{dr} = 0$$


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

En estas ecuaciones podemos obtener la distribución de temperatura $T(r)$ al relizar la integración, resultado mostrado en la ecuación 8, asimismo la tasa de transferencia de calor \dot{Q} la cual está definida en las ecuación 9 (Cengel, 2011).

Las ecuaciones 8 y 9 se obtienen por la integración de la ecuación del régimen estacionario sin generación de calor cuando se conocen las temperaturas interna (T_1) y superficial (T_2) y los respectivos radios.

$$T(r) = \frac{r_1 r_2}{r(r_2 - r_1)} (T_1 - T_2) + \frac{r_2 T_2 - r_1 T_1}{r_2 - r_1} \quad (8)$$

$$\dot{Q} = 4\pi k r_1 r_2 \frac{(T_1 - T_2)}{(r_2 - r_1)} \quad (9)$$

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

3. METODOLOGÍA

Este trabajo se sigue la siguiente estrategia:

- Debido a la dificultad para obtener las bolas cerámicas a nivel industrial, se dispuso a la fabricación de éstas a través de la industria artesanal cerámica del municipio de Caldas Antioquia mostrada en la figura 7.



Figura 7. Fábrica de cerámica en Caldas Antioquia. Fuente: Autor.

- Las esferas se elaboran con la colaboración de los señores Jesús Alberto Ríos y Carlos Ospina de la empresa Ríos Cerámica y quienes permitieron la elaboración de moldes, mostrados en la figura 8.


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



Figura 8. Moldes para las esferas cerámicas. Fuente: Autor.

- Se dispuso para la fabricación de la cerámica arcilla de San Antonio, oriente Antioqueño con porcentajes variados de feldspatos, cuarzos, arenas silíceas, calcitas y dolomitas las cuales aportan grados de mayor o menor plasticidad mostrado en la figura 9.



Figura 9. Arcilla de San Antonio, Fuente: Autor.

- Se contó con un horno de gas el cual proporcionaba una temperatura de 900°C para la cocción, ideal para la fabricación de cerámicas de cocción blanca mostrado en la figura 10.


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




Figura 10. Horno de gas, Fuente: Autor.

- Una vez realizado el procedimiento de cocción se llegó a un producto final, esferas de dos tamaños diferentes. Estas a su vez, en el momento de la fabricación se le tomaron previamente las medidas necesarias para las perforaciones y así poder insertar del termopar tipo K las cuales se muestran en la figura 11.



Figura 11. Esferas de cerámica de dos tamaños y con perforaciones, Fuente: Autor.

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

- Se crearon esferas cerámicas con esmalte para incluir otra variante y poder compararla con el método inicial de cocción sin este proceso de esmaltado. Esta técnica adicional a la anterior se creó en un horno especializado para este procedimiento puesto que debe tener una temperatura de 1100°C ideal para su cocción, ver figura 12.



Figura 12. Horno para proceso de esmaltado y autor del trabajo. Fuente: Autor.

- Adicionalmente se necesitó fabricar trípodes para sostener las esferas dentro del horno con el mismo material para evitar que se perjudicara su proceso. El acabado final de estas esferas se puede evidenciar en la figura 13.


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



Figura 13. Esferas esmaltadas con sus trípodes, Fuente: Autor

- Se consiguieron termopares tipo K y multímetro que permite medir directamente las temperaturas, con conversión interna de mV a °C, ver figura 14.

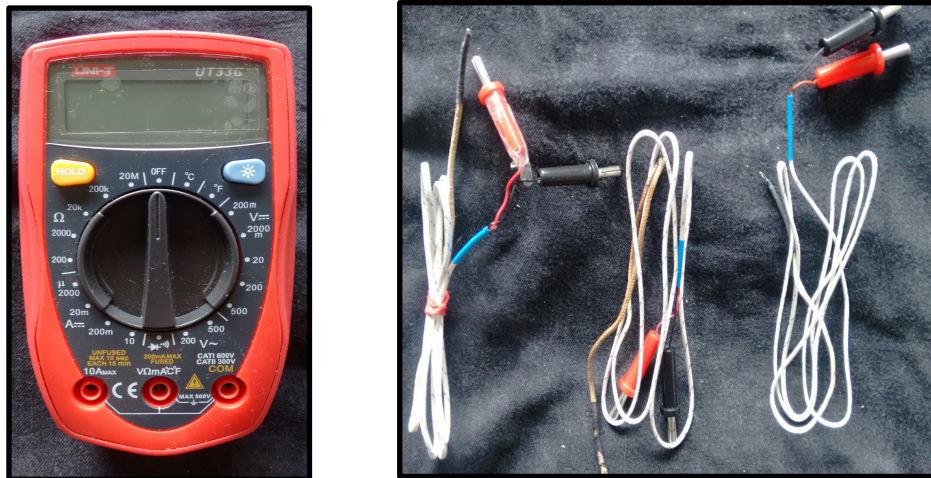


Figura 14. Multímetro y termopar tipo K, Fuente: Autor.

- Se diseñó y construyó el medidor de temperatura embebido en un material cerámico esférico de dos tamaños y dos procesos, los cuales se conectaron al multímetro. Estos se muestran en la figura 15.


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



Figura 15. Medidor de temperatura embebido en un material cerámico esférico. Fuente: Autor

- Se tomaron mediciones de temperatura con el instrumento construido y el multímetro mostrado en la figura 16, las cuales fueron recopiladas de un sistema que contenía agua líquida. El primer experimento fue calentar el agua hasta punto de ebullición, luego se tomaron datos, sumergiendo las esferas con el termopar embebido en ellas, en el agua y con un cronometro para tomar el tiempo que se demora en calentarse con una esfera u otra. Asimismo se tomaron datos en la superficie y en el ambiente con distintos termopares tipo k.

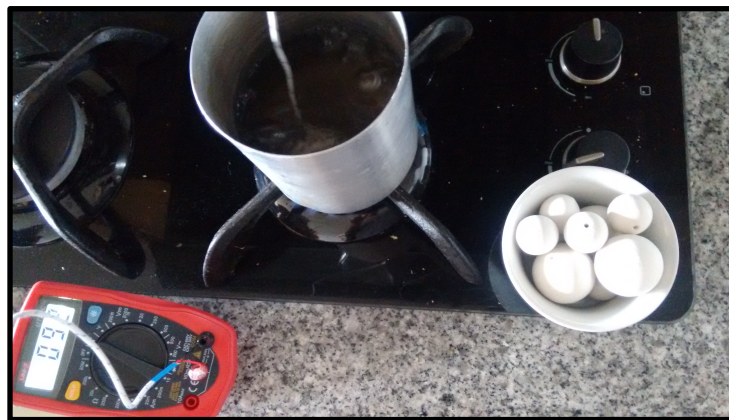


Figura 16. Mediciones en agua con termopar embebido y en superficie de esfera. Fuente: Autor


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

- En el segundo experimento se procedió a tomar mediciones en un sistema caliente seco, montando las esferas esmaltadas, sin esmaltar y de dos tamaños distintos en un horno a temperatura constante. Se tomaron medidas tanto dentro de la esfera como también en su superficie, mostrando así una serie de datos comparativos en el tiempo para ser analizados. En esta fase, la metodología propuesta fue meter las bolas previo calentamiento del horno, ver figura 17.



Figura 17. Mediciones en la superficie y embebido en las esferas. Fuente: Autor

- En un tercer experimento se procedió a tomar mediciones en un sistema de agua fría con temperaturas de hasta 0.4°C con termopares embebidos en las esferas grandes, pequeñas y con esmalte, siguiendo un procedimiento similar al primer experimento. Esto con el fin de obtener datos y observar si se aumentaba la eficacia de mediciones con este tipo de instrumento tanto con agua fría, como también con agua caliente y ambiente caliente seco.
- En un cuarto experimento se procedió a sellar unas esferas grandes y pequeñas para mostrar si había diferencias con respecto a las embebidas sin sellante. El

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

procedimiento de sellado de la esfera grande se muestra en la figura 18, asimismo de la pequeña que está en la figura 19.

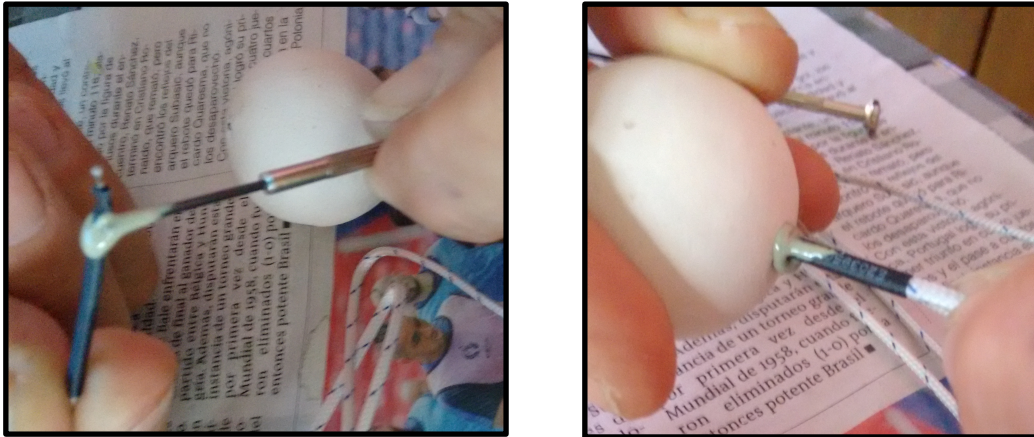


Figura 18. Esfera grande con termopar embebido con sellante. Fuente: Autor

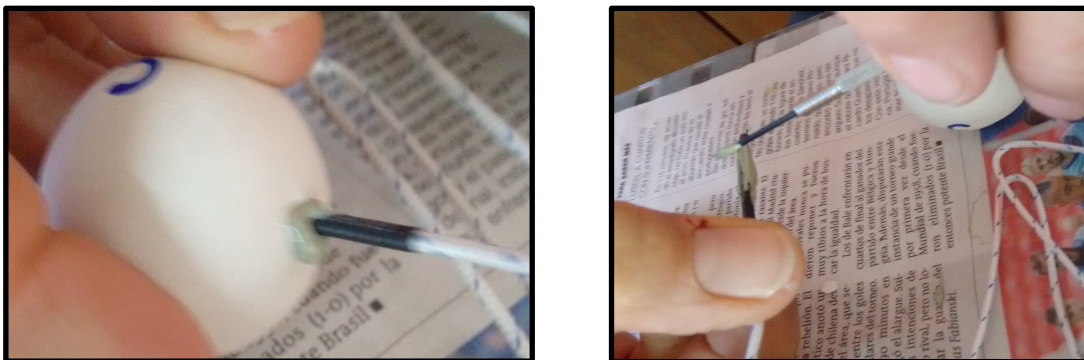


Figura 19. Esfera pequeña con termopar embebido con sellante. Fuente: Autor

- Se realizó una prueba de perforación con una esfera de alúmina de alta densidad, con un resultado poco satisfactorio puesto que este material es muy duro, la broca utilizada no pudo resistir a tan alta exigencia. Esta esfera se muestra en la figura 20.


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



Figura 20. Esfera de alúmina de alta densidad, con ensayo de perforación. Fuente: Autor

- Se realizó un quinto experimento en un sistema de lecho empacado mostrado en la figura 21 que se encuentra en el laboratorio de fluidos del Instituto Tecnológico Metropolitano, que con la ayuda del laboratorista Vladimir Imbol Rúa se pudo llevar a cabo. Estas mediciones se realizaron con los termopares originales de la maquina mostrados en la figura 22 y dos más adicionales que se colocan dentro de la bola y en la superficie de esta. La metodología de medición empieza por introducir las esferas con perforación pasante, creando un collar para evitar el deterioro de éste y el cambio del flujo del fluido como se muestra en la figura 23, luego la punta del termopar se introduce en la esfera para así poder tomar datos suficientes para el análisis. Luego se introducen las esferas sobrantes y se empieza la medición.

Se enciende el recuperador de calor con todas las esferas empacadas y en el panel de control mostrado en la figura 26 se le ordena una temperatura inicial de 70 °C. Una vez alcanzada dicha temperatura en el aire se introduce el tubo que contiene

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

las esferas y en este punto se sube la temperatura a 140 °C, en este momento se empieza a tomar la medida hasta que llega hasta esta temperatura.



Figura 21. Recuperador de calor. Fuente: Autor


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



Figura 22. Termopares originales del recuperador de calor. Fuente: Autor.



Figura 23. Collar de esferas con el termopar embebido. Fuente: Autor


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



Figura 24. Collar y esferas empacadas en el recuperador de calor. Fuente: Autor.



Figura 25. Tubo del recuperador de calor


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



Figura 26. Paneles de control. Fuente: Autor

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

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diseño y construcción del medidor de temperatura embebido en material cerámico.


4.1.1 Medidor de temperatura embebido en material cerámico.

El medidor de temperatura embebido en el material cerámico consta de 3 partes fundamentales: la primera es el elemento cerámico, en la cual esta las esferas cerámicas; la segunda es la termocupla; y por último el instrumento medidor de la temperatura.

La realización de las esferas cerámicas con perforación para que el termopar pueda ser embebido se realizó con la colaboración de la empresa Ríos Cerámica quienes aportaron la materia prima y la mano de obra. Esta realización tuvo como mezcla un producto cerámico, compuesto por arcilla de San Antonio oriente Antioqueño con porcentajes variados de feldespatos, cuarzos, arenas silíceas, calcitas, y dolomitas, además de tener alúmina. Ésta se muestra en la figura 27.



Figura 27. Mezcla de arcilla para cerámica. Fuente: Autor

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

Luego de realizar la mezcla, se vierte en un molde hecho de yeso mostrado en la figura 28, que tiene la forma adecuada para realizar esferas de dos tamaños. Este vertimiento se debe realizar de forma seguida puesto que al estar en reposo se va perdiendo tamaño en la mezcla. Para realizar el orificio se tiene que introducir el termopar para que tome la forma de este y poder luego introducirlo sin ningún inconveniente.



Figura 28. Moldes de yeso. Fuente: Autor

Cuando la mezcla se encuentra en reposo en el molde se prosigue al desmolde y luego a su cocción a 900 °C. Éste proceso se realiza en un horno a gas el cual se encuentra en la empresa. Este horno se muestra en la figura 29. Asimismo se le quiso poner en algunas esferas un proceso alternativo que consta de un revestimiento de esmalte para bajar la porosidad de éstas. Para la realización exitosa de esta fase alternativa, se debe tener un horno especial el cual sube la temperatura de estas esferas a 1200 °C, además se crearon unos trípodes para realizar correctamente este proceso. En la figura 30 y 31 se evidencian los resultados finales de estos procesos además de los instrumentos utilizados.


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



Figura 29. Horno para cocción a 900 °C. Fuente: Autor



Figura 30. Horno para proceso de esmaltado a 1200 °C. Fuente: Autor




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

Figura 31. Esferas esmaltadas con trípode. Fuente: Autor

Estas esferas quedan listas para realizar el proceso de ensamble del termopar mostrado en la figura 32. Esta forma parte fundamental, y se debe de hacer con mucho cuidado evitando que los conductores se separen en la punta de la termocupla.

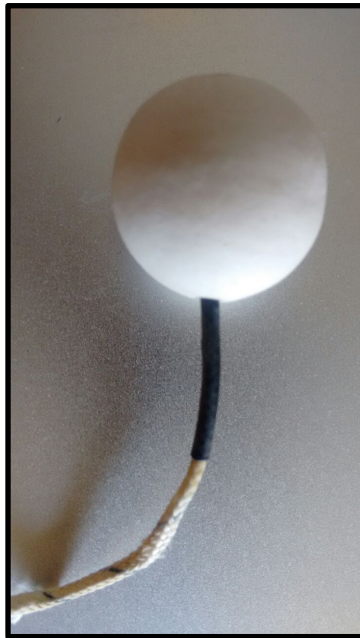


Figura 32. Esfera ensamblada. Fuente: Autor.

En algunas esferas se llevó a cabo un sellado mostrado en la figura 33 con un producto de uso industrial para pegar mesones de mármol y así mostrar una comparación si es o no más confiable la medida realizando este proceso.


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



Figura 33. Esfera sellada. Fuente: Autor.

El medidor mostrado en la figura 34 utilizado es de marca UNI-T modelo UT33C que es un multímetro y un convertidor de mili voltios a grados Celsius y Fahrenheit las cuales son las funciones necesarias para las pruebas.


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



Figura 34. Medidor de temperatura. Fuente: Autor.

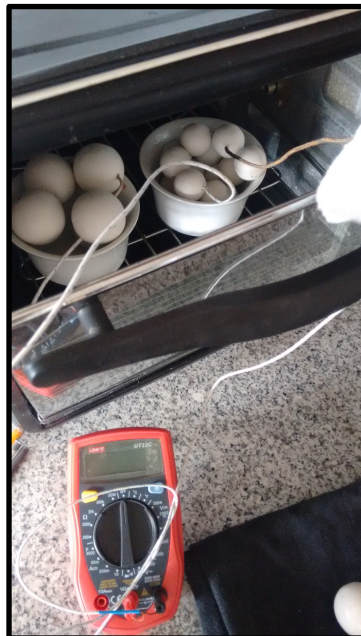



Figura 35. Medidor de temperatura. Fuente: Autor.

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

Luego de fabricar las esferas se empieza a tomar medidas en los distintos sistemas para así poder formar cuadros y gráficas para comparar y así sacar conclusiones de los objetivos acordados.


4.2 Pruebas experimentales

Luego de haber realizado el proceso de diseño y construcción del medidor de temperatura material cerámico todo está listo para realizar pruebas experimentales. Estas pruebas están dirigidas por parte del señor Luis Fernando Cardona Sepúlveda quien da los parámetros y la metodología para así poder realizarla adecuadamente. La temperatura de trabajo de los ambientes térmicos es el parámetro más importante ya que deben estar acordes tanto con la viabilidad del experimento como también el alcance de este. Estos parámetros deben estar correctos pues se deben con los materiales y recipientes con los cuales se trabajara dando medidas que puedan ser analizadas.


4.2.1 Recolección de datos.

Tabla 3. Numero de prueba con su descripción. Fuente: Autor

Numero de prueba	Descripción de la prueba
1	Esfera pequeña (a) Temperatura-tiempo en agua fria
2	Esfera pequeña (b) Temperatura-tiempo en agua fria
3	Esfera pequeña (c) Temperatura-tiempo en agua fria

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

4	Esfera pequeña (d) Temperatura-tiempo en agua fría
5	Esfera pequeña (e) Temperatura-tiempo en agua fría
6	Esfera grande (A) Temperatura-tiempo en agua fría
7	Esfera grande (B) Temperatura-tiempo en agua fría
8	Esfera grande (C) Temperatura-tiempo en agua fría
9	Esfera pequeña (a) Temperatura-tiempo en agua caliente
10	Esfera pequeña (b) Temperatura-tiempo en agua caliente
11	Esfera pequeña (c) Temperatura-tiempo en agua caliente
12	Esfera grande (A) Temperatura-tiempo en agua caliente
13	Esfera grande (B) Temperatura-tiempo en agua caliente
14	Esfera grande (C) Temperatura-tiempo en agua caliente
15	Esferas pequeñas (a) y (b) Temperatura-tiempo en horno
16	Esferas pequeñas (c), (d) y (e) Temperatura-tiempo en horno
17	Esferas grandes (A), (B) y (C) Temperatura-tiempo en horno
18	Esfera pequeña sellada (a) Temperatura-tiempo en agua fría
19	Esfera pequeña sellada (a) Temperatura-tiempo en agua caliente
20	Esfera grande sellada (C) Temperatura-tiempo en agua fría
21	Esfera pequeña (a) Temperatura-tiempo en la superficie en agua fría
22	Esfera pequeña (b) Temperatura-tiempo en la superficie en agua fría
23	Esfera grande (A) Temperatura-tiempo en la superficie en agua fría
24	Esfera pequeña (a) Temperatura-tiempo en la superficie en agua caliente
25	Esfera pequeña (b) Temperatura-tiempo en la superficie en agua caliente
26	Esfera grande (A) Temperatura-tiempo en la superficie en agua caliente
27	Esfera grande (B) Temperatura-tiempo en la superficie en agua caliente
28	Esferas empacadas con temperatura – tiempo medida en el centro y en la superficie de la bola

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

En total se realizaron 28 pruebas mostradas en el apéndice B que van de la tabla 8 hasta la 35 en las cuales se tomaron distintas medidas según el tamaño de las esferas, su proceso de fabricación, el entorno de medición, el embebido con sellante o sin sellante, los rangos de temperaturas y dos puntos de medición en las esferas.

Los datos que se tomaron están registrados en tablas en donde se muestran las temperaturas en grados Celsius, la letra que diferencia cada esfera mostrada en la tabla 4, 5, 6, 7 y el tiempo de respuesta el medidor en segundos.


Tabla 4. Peso y diámetro de esferas pequeñas. Fuente: Autor

Esferas pequeñas	Peso (Gramos)	Diámetro (cm)
a	10	2.3
b	11	2.27
c	10	2.32
d	11	2.3
e	11	2.275

Tabla 5. Peso y diámetro de esferas grandes. Fuente: Autor.

Esferas grandes	Peso (Gramos)	Diámetro (cm)
A	36	3.5
B	34	3.5
C	33	3.47

Tabla 6. Densidades de las esferas pequeñas. Fuente: Autor.

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

Esfera pequeña	Densidad (kg/m³)
a	1569.70
b	1796.04
c	1529.45
d	1726.67


Tabla 7. Densidad de las esferas grandes. Fuente: Autor.

Esfera grande	Densidad (kg/m³)
A	1603
B	1700.7
C	1844.11

4.2.2 Gráficas

Las gráficas se realizan con base a los datos recogidos en donde se pueden comparar, dando así un análisis detallado. Estas graficas se tomaron desde la tabla 8 hasta la 35 mostradas en el apéndice B las cuales irán desde la figura 36 hasta la 46, separándolas en partes lógicas para analizarlas según su necesidad. El software utilizado es Microsoft Excel.

El análisis de las gráficas mostradas a continuación estará situado en el numeral 4.3.

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

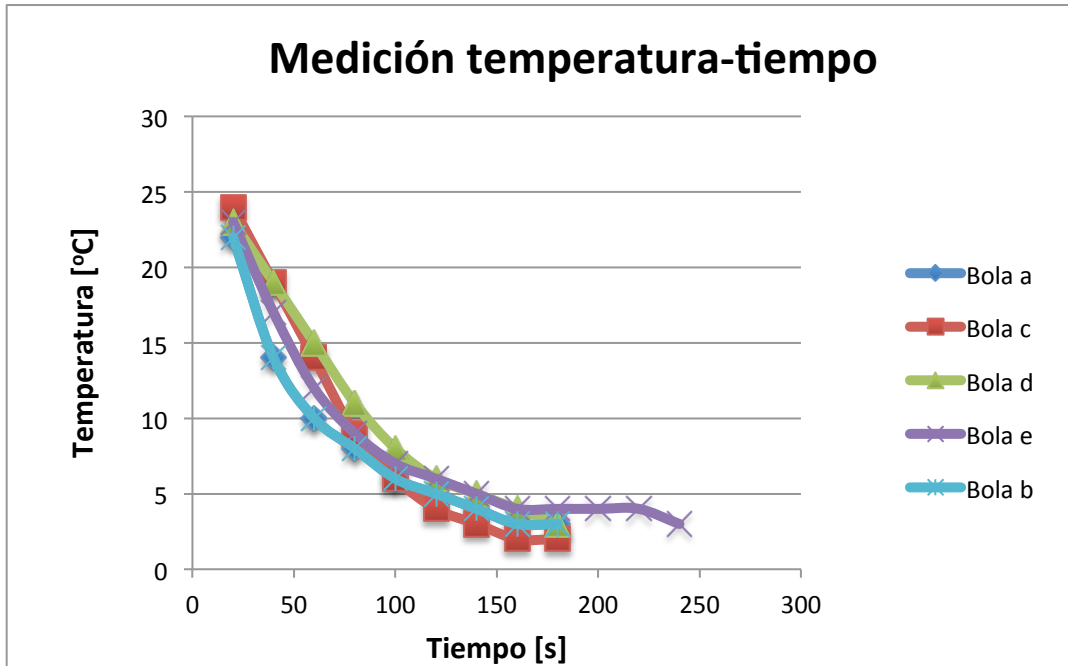


Figura 36. Grafica de los resultados de la prueba 1, 2, 3, 4 y 5. Fuente: Autor.

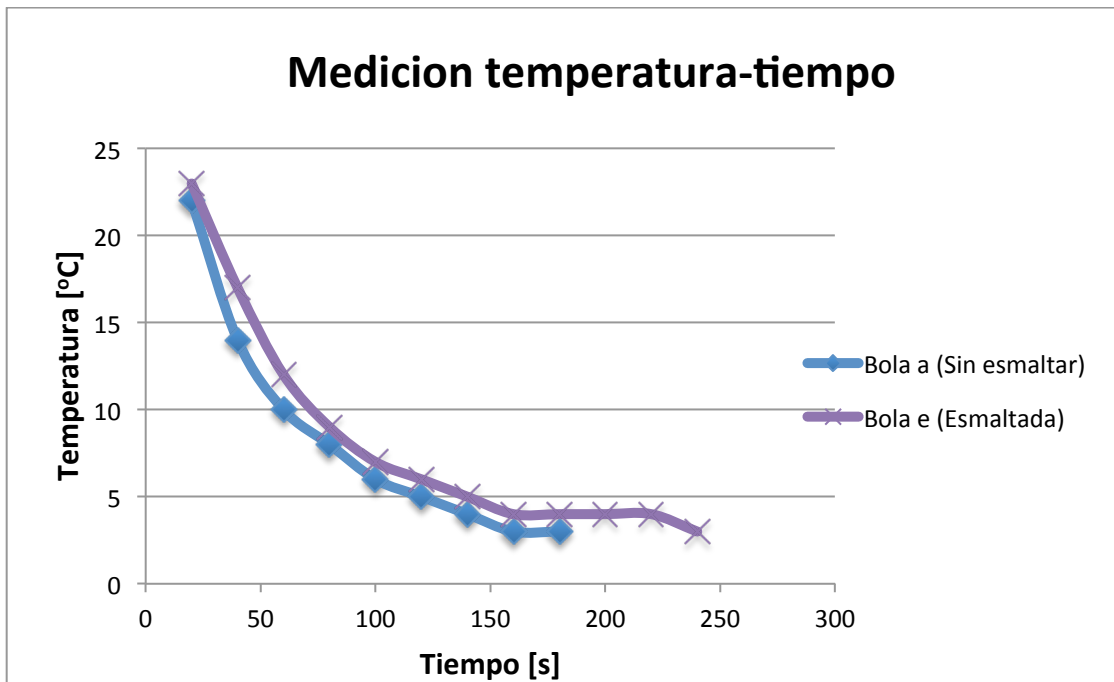



Figura 37. Grafica de los resultados de la prueba 1 y 5. Fuente: Autor.

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

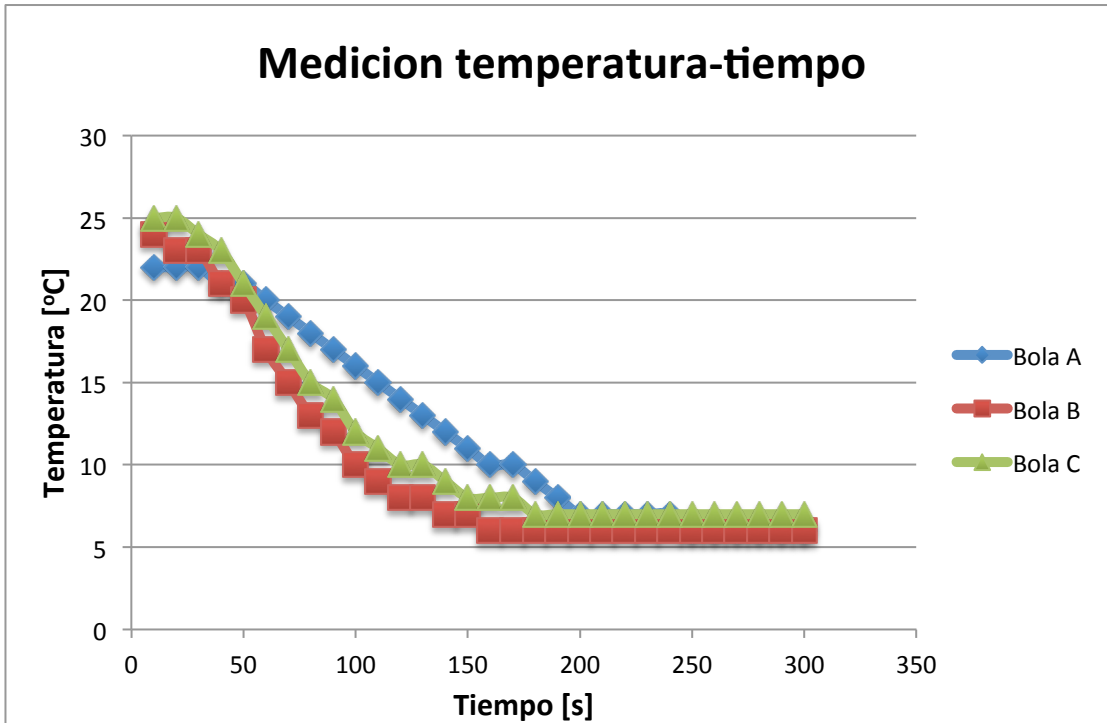


Figura 38. Grafica de los resultados de las pruebas 6,7 y 8. Fuente: Autor.

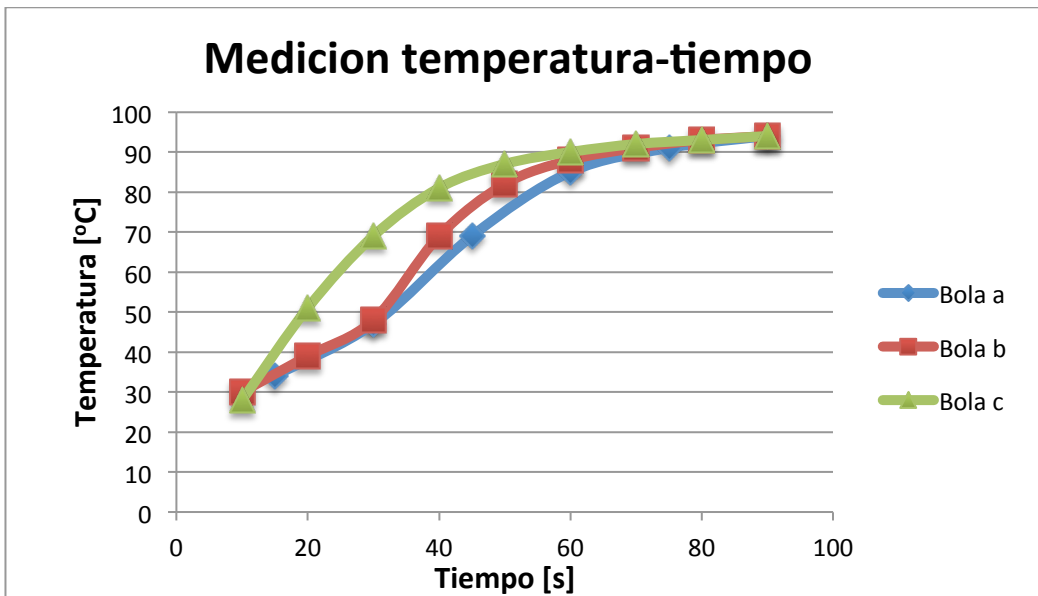



Figura 39. Grafica de los resultados de la pruebas 9,10 y 11. Fuente: Autor.

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

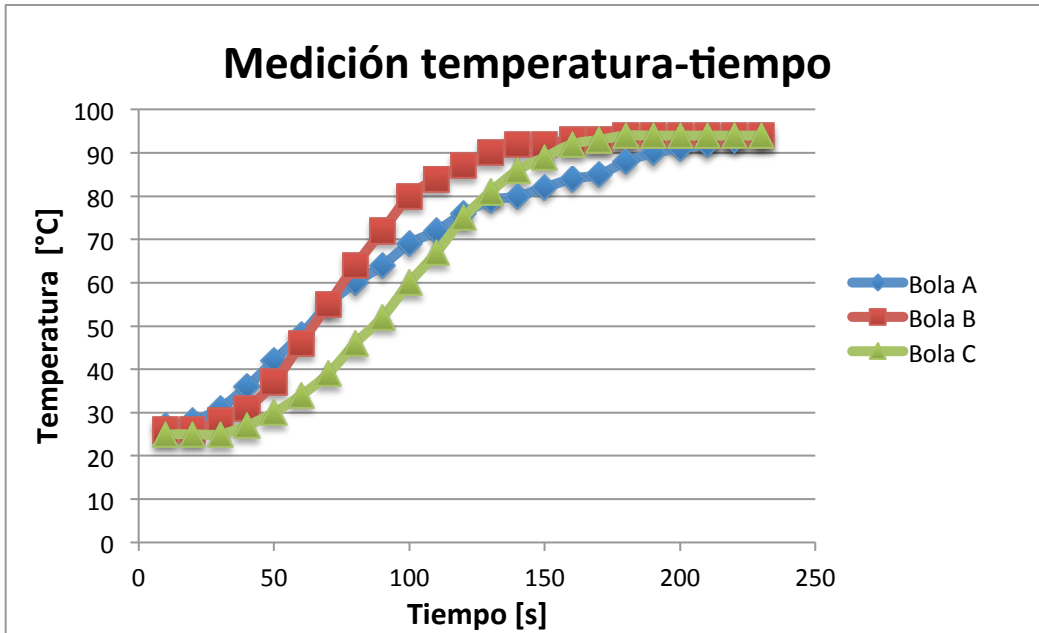


Figura 40. Grafica de los resultados de las pruebas 12,13 y 14. Fuente: Autor

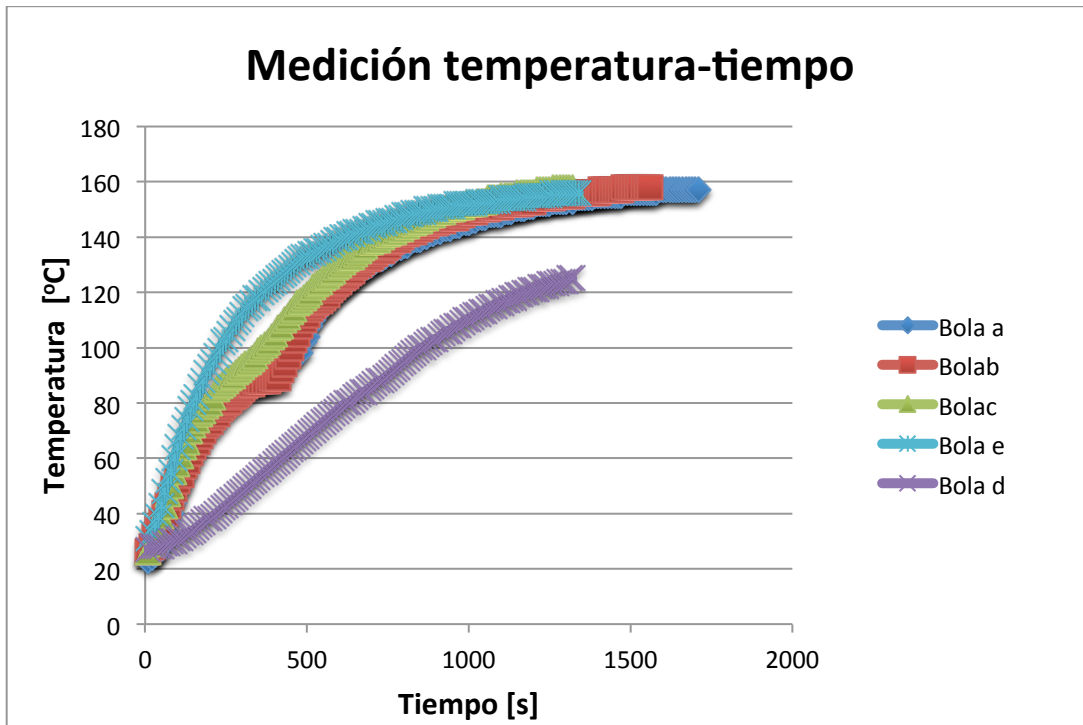



Figura 41. Grafica de los resultados de las pruebas 15 y 16. Fuente: Autor.

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

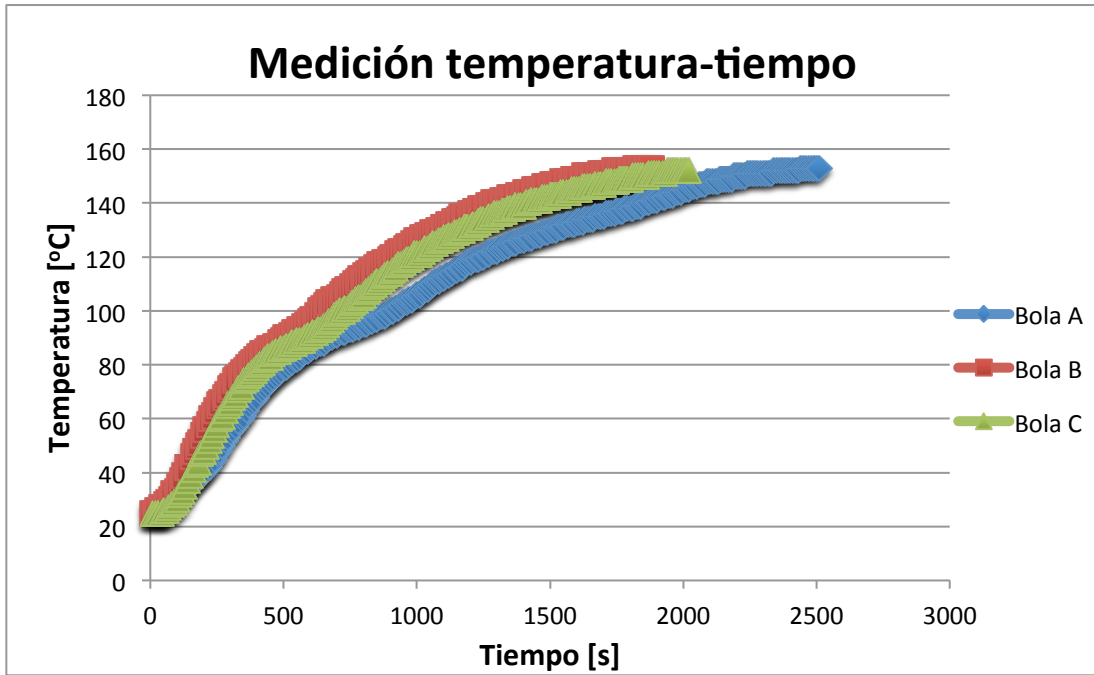


Figura 42. Grafica de los resultados de la prueba 17. Fuente: Autor.

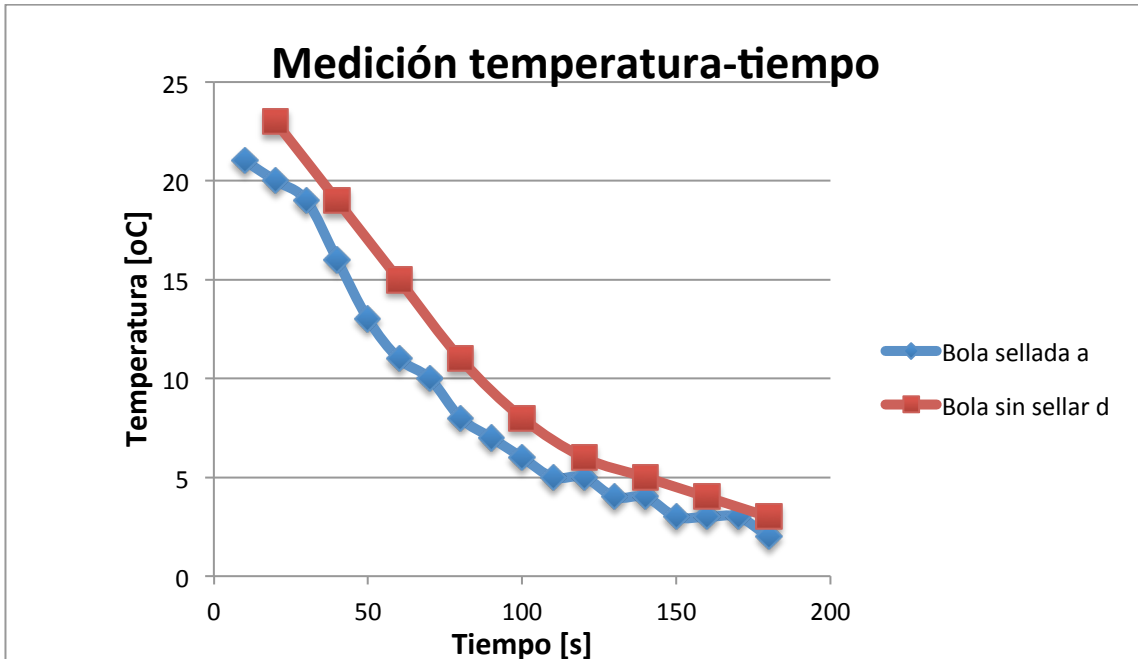


Figura 43. Grafica de los resultados de las pruebas 4 y 18. Fuente: Autor.

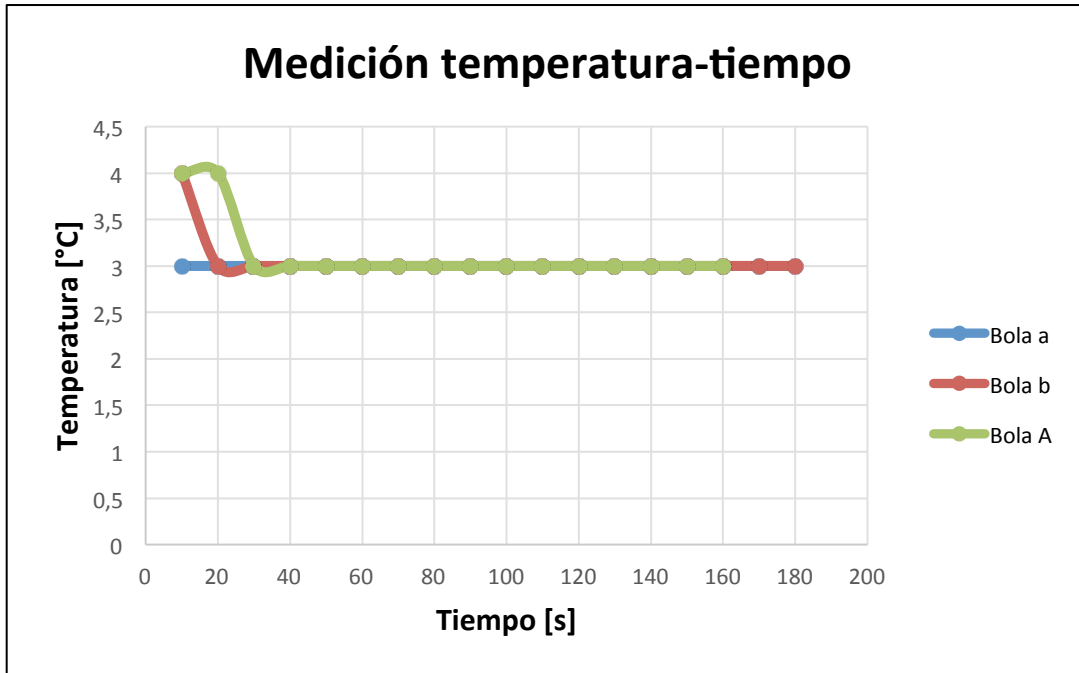


Figura 44. Grafica de los resultados de las pruebas 21, 22 y 23. Fuente: Autor.

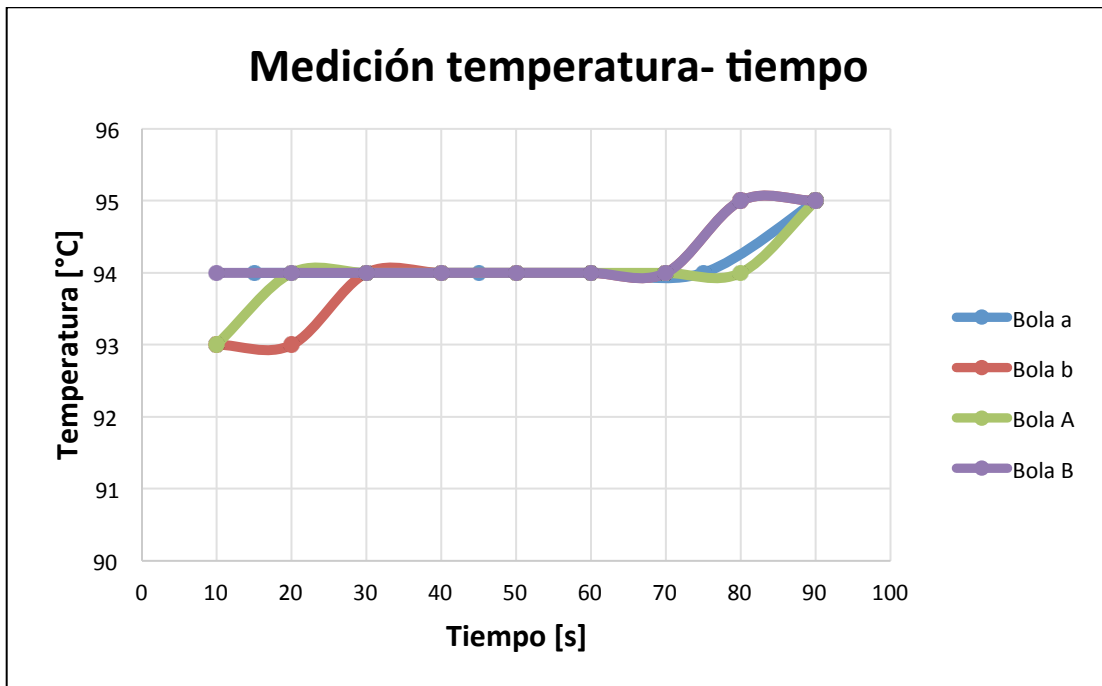



Figura 45. Grafica de los resultados de la prueba 24, 25, 26 y 27. Fuente: Autor.

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

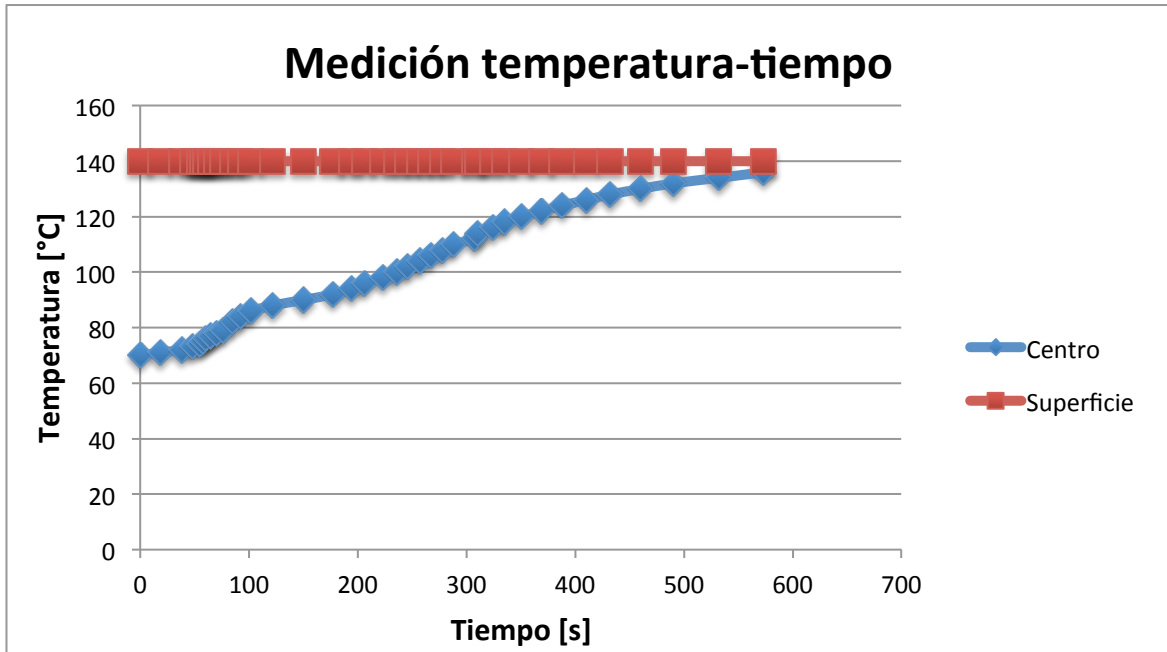


Figura 46. Grafica de los resultados de la prueba 28. Fuente: Autor

4.3 Análisis de resultados


Las gráficas realizadas con base en los resultados nos dan un aporte muy importante para poder analizar concretamente y correctamente el comportamiento del medidor de temperatura diseñado y construido en este trabajo. En general se observa que las gráficas tienen un comportamiento no lineal a excepción de las figuras 44 y 45 en donde tienden a ser lineales. Estas se realizaron con base a los resultados obtenidos en las mediciones que fueron tomadas en las superficies de las esferas en sistemas de fluidos líquidos y de aire caliente; las cinco graficas tienen un comportamiento lineal definido, esto se debe a que hay una incertidumbre en la medida puesto que en el momento de hacer la prueba, que consiste en acercar la punta del termopar en la superficie para medir la temperatura de la esfera que está dentro del fluido, lo que realmente se está midiendo no es la superficie de la bola como debería ocurrir, por el contrario se está midiendo el fluido alrededor de ésta.

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

En las pruebas 1, 2, 3, y 4 las cuales se utilizaron esferas de igual tamaño con el termopar embebido y en un fluido líquido se observa una gráfica con tendencias decrecientes puesto que este sistema es de agua a una temperatura cercana a los 0 °C; las cuatro pruebas tienden a ser iguales, no obstante, debido a factores de exactitud en la fabricación tanto del molde de las esferas como en su composición pueden alterar minimamente el comportamiento de las medidas. Estas tendencias en comparación con las figuras 44 y 45 son reales puesto que no hay incertidumbre de saber si lo que se está midiendo es la esfera o el fluido, en este caso las temperaturas tomadas con el termopar embebido en las esferas son asertivas y estables en comparación con las tomadas en la superficie.

En la prueba 5 se utilizó la esfera (e) que tiene un proceso de esmaltado; el comportamiento que se observa en la comparación de las tendencias de dos esferas, una esmaltada y otra sin esmaltar mostradas en la figura 37 es consistente con el proceso de fabricación, puesto que la esfera (a) al no tener el proceso de esmaltado su porosidad es más alta y el fluido ingresa en el material acelerando la temperatura interna, en cambio la esfera (e) tiene la tendencia a estar más por encima puesto que el fluido no es absorbido por la superficie de la esfera dando una medida más lenta y consistente. Cuando las esferas son porosas, en su interior contienen aire con una conductividad de 0.03 W/(mK) aproximadamente a 90°C (tabla A-15 del apéndice 1 de (Cengel, 2011)), por eso al tener contacto con el agua que tiene una conductividad térmica de 0.677 W/(mK) aprox. a 95°C (tabla A-9 del apéndice 1 (Cengel, 2011)), el aire se libera causando que la conductividad de la esfera aumente y por esto el enfriamiento o el calentamiento se da más rápido. Ésta conclusión está apoyada en la ecuación (9) del marco teórico la cual muestra que existe una transferencia de calor más alta ya que la conductividad es directamente proporcional a la transferencia.

En la figura 38 están las tendencias que obedecen al enfriamiento del termopar embebido en las esferas A, B y C sin esmaltar; se da un comportamiento que no es viable para la

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


fabricación del termopar, pues la temperatura tomada en el centro no baja de 5 °C y se demora más tiempo en estabilizarse, como si ocurre en la figura 36 con las esferas de menor tamaño.

En la figura 39 se encuentran las pruebas 9, 10 y 11 en donde se observa el comportamiento del termopar embebido en las esferas a, b, c; el comportamiento de estas pruebas es ascendente puesto que el fluido es agua caliente a una temperatura de ebullición de 94 °C. En este caso el tiempo de estabilidad para el punto de ebullición fue de 90 segundos, pasa todo lo contrario en la figura 40 que para llegar a esta temperatura se demoró 200 segundos, esto quiere decir que al igual que pasa con las pruebas 6, 7 y 8 de la figura 38 el tiempo de respuesta es mucho mayor en las esferas grandes A, B y C que con las de bajo tamaño a, b y c.

Las pruebas 15 y 16 de la figura 41 son realizadas con el termopar embebido en las esferas cerámicas a, b, c, d y e; el tiempo de estabilidad que es 1280 segundos es mucho mejor con este tipo de esferas que con las descritas en la figura 42 por su tamaño que se demoran 1870 segundos.

En la figura 43 se muestran las tendencias de dos esferas pequeñas, una sellada y la otra sin sellar; al realizar una comparación no muestra una gran diferencia, aunque cabe anotar que el tiempo de respuesta es más lenta la que está sin sellar. Esto puede ser debido a que el material del sellante tiene una conductividad mas alta que el material de la esfera y que el material del cable conector del termopar.

En la prueba 28, la última realizada, con todas las esferas colocadas en un lecho empacado, se debió formar un collar donde pasaba el cable de termopar para evitar daños y cambios en el patrón de flujo. Se observó que el comportamiento del termopar colocado en la superficie de esta misma esfera, mostraba deficiencia en su estabilidad de la medida de temperatura y como en pruebas anteriores se apreciaba una incertidumbre de no saber en realidad que era lo que se medía si la superficie de la bola o el flujo de aire

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


caliente. Con el termopar en el centro de la esfera se logró encontrar estabilidad como lo muestra la prueba 28 de 70 °C a 140 °C.

	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 realizó satisfactoriamente la evaluación del sensor de temperatura embebido en un material cerámico con varias pruebas realizadas tanto en el sistema de esferas empacadas como también en flujo líquido y seco; se concluye que los resultados en la etapa de prueba se comportan más estables sin cambiar el patrón de flujo, por lo tanto son más confiables que mediciones superficiales.
- Se realizó el diseño y construcción del medidor de temperatura utilizando materiales cerámicos permitiendo tomar la temperatura desde adentro, no obstante, la realización de pruebas con esferas de alúmina de alta densidad no se pudo desarrollar puesto que su perforación tiene limitaciones por su alta dureza, por eso se debieron fabricar con menos porcentaje de alúmina y con la perforación previamente realizada en el molde. En esta etapa se concluye la viabilidad de la construcción del sensor con dos tamaños de esferas, no obstante es más conveniente realizarlo con esferas de poco tamaño y esmaltadas para mitigar la porosidad de éstas. El sellado no mostro mucha diferencia en la medida puesto que la perforación previamente hecha fue exacta para que quedara sin filtraciones hacia el centro y asegurar una buena lectura de la temperatura.
- En la medición de temperaturas superficiales se tiene una gran incertidumbre porque no se tiene claridad de puntualmente que se está midiendo, si la

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


temperatura de la esfera o del fluido. Se concluye que es más confiable obtener mediciones de temperatura con un termopar desde el centro de la esfera que en la superficie de ésta.

- El tiempo de respuesta del termopar embebido es más lento que el convencional, no obstante, las medidas registradas muestran que la estabilidad y confiabilidad son mejores en el termopar embebido que el convencional.

5.2 Recomendaciones


La perforación en las esferas cerámicas de alúmina con alta densidad no se pudo concluir debido a su alta dureza, lo cual se debe buscar una herramienta más especial para este propósito y poder realizar las perforaciones, y así medir la temperatura con alúmina de alta densidad. Otra opción es fabricar las esferas con más porcentaje de alúmina con la perforación previamente ya realizada.

Otra recomendación es utilizar el proceso de esmaltado en todas las esferas, asimismo utilizar otra mezcla de elementos para creación de cerámica de más alta calidad.

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

REFERENCIAS

- Cengel, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa. En A. J. Cengel, *Transferencia de calor y masa* (págs. 2-133). Mexico: Mc Graw Hill.
- Creus, A. (2010). *Instrumentación industrial* (8va ed.). Mexico: Alfaomega grupo editor S.A.
- Cengel, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa. En A. J. Cengel, *Transferencia de calor y masa* (págs. 2-133). Mexico: Mc Graw Hill.
- Creus, A. (2010). *Instrumentación industrial* (8va ed.). Mexico: Alfaomega grupo editor S.A.
- Galan, E., & Aparicio, P. (s.f.). <http://www.ehu.es>. Recuperado el 3 de Junio de 2016, de http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_031.pdf
- Herrera, B., Cacia, K., & Olmos-Villalba, L. (2015). Combustion stability and thermal efficiency in a porous media burner for LPG cooking in the food industry using Al₂O₃ particles coming from grinding wastes . *Applied Thermal Engineering* , 1127-1133 .
- Rua, I. B. (2015). *Construcción y evaluación de un prototipo de un recuperador de calor residual de lecho empacado de caliza y carbon*. Instituto Tecnológico Metropolitano, Antioquia. Medellín: Facultad de Ingenierías.
- Singh, R., Saini, R., & Saini, J. (2006). Nusselt number and friction factor correlations for packed bed solar energy storage system having large sized elements of different shapes. *Solar Energy*, 760–771.
- Smith, F., & Hashemi, J. (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales. En F. Smith, J. Hashemi, & G. M. Hill (Ed.), *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales* (Cuarta ed., págs. 657-746). D.F., Mexico.
- Soisson, H. (2007). Instrumentación Industrial. En H. Soisson, *Instrumentación Industrial* (págs. 151-162). Mexico: Limusa Noriega.
- Wu, D., Liu, H., Xie, M., Liu, H., & Sun, W. (2012). Experimental investigation on low velocity filtration combustion in porous packed bed using gaseous and liquid fuels . *Experimental Thermal and Fluid Science* , 169–177 .


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

APÉNDICE

Apéndice A


Termopar tipo K - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-270	-6.458										
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457	-6.458
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438	-6.441
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.370	-6.377	-6.382	-6.388	-6.393	-6.399	-6.404
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337	-6.344
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.252	-6.262
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147	-6.158
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.983	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612

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

Termopar tipo K - f.e.m. en mV (ITS-90)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941

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

Apéndice B

Tabla 8. Prueba 1 de esfera pequeña (a) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor


Tiempo (Segundos)	Temperatura (°C)
60	16
120	6
180	2

Tabla 9. Prueba 2 de esfera pequeña (b) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor

Tiempo (Segundos)	Temperatura (°C)
20	22
40	14
60	10
80	8
100	6
120	5
140	4
160	3
180	3

Tabla 10. Prueba 3 de esfera pequeña (c) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor

Tiempo	Temperatura
--------	-------------

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


(segundos)	(°C)
20	24
40	19
60	14
80	9
100	6
120	4
140	3
160	2
180	2

Tabla 11. Prueba 4 de esfera pequeña (d) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
20	23
40	19
60	15
80	11
100	8
120	6
140	5
160	4
180	3

Tabla 12. Prueba 5 de esfera pequeña (e) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor.


Tiempo	Temperatura
--------	-------------

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

(segundos)	(°C)
20	23
40	17
60	12
80	9
100	7
120	6
140	5
160	4
180	4
200	4
220	4
240	3

Tabla 13. Prueba 6 de esfera grande (A) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor


Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	22
20	22
30	22
40	21
50	21
60	20
70	19
80	18
90	17
100	16
110	15
120	14
130	13
140	12
150	11
160	10
170	10
180	9

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

190	8
200	7
210	7
220	7
230	7
240	7
250	6
260	6
270	6
280	6
290	6
300	6

Tabla 14. Prueba 7 de esfera grande (B) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor.


Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	24
20	23
30	23
40	21
50	20
60	17
70	15
80	13
90	12
100	10
110	9
120	8
130	8
140	7
150	7
160	6
170	6
180	6
190	6

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

200	6
210	6
220	6
230	6
240	6
250	6
260	6
270	6
280	6
290	6
300	6

Tabla 15. Prueba 8 de esfera grande (C) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor.

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	25
20	25
30	24
40	23
50	21
60	19
70	17
80	15
90	14
100	12
110	11
120	10
130	10
140	9
150	8
160	8
170	8
180	7
190	7
200	7

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


210	7
220	7
230	7
240	7
250	7
260	7
270	7
280	7
290	7
300	7

**Tabla 16. Prueba 9 de esfera pequeña (a) con temperatura-tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor.**

Tiempo (Segundos)	Temperatura (°C)
15	34
30	47
45	69
60	85
75	91
90	94

**Tabla 17. Prueba 10 de esfera pequeña (b) con temperatura-tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor.**

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	30
20	39
30	48
40	69
50	82
60	88
70	91
80	93

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


90	94
----	----

**Tabla 18. Prueba 11 de esfera pequeña (c) con temperatura-tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor.**

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	28
20	51
30	69
40	81
50	87
60	90
70	92
80	93
90	94

**Tabla 19. Prueba 12 de esfera grande (A) con temperatura- tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor.**

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	27
20	28
30	31
40	36
50	42
60	48
70	55
80	60
90	64
100	69
110	72
120	76

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

130	79
140	80
150	82
160	84
170	85
180	88
190	90
200	91
210	92
220	93
230	94

Tabla 20. Prueba 13 de esfera grande (B) con temperatura-tiempo en agua caliente.
Fuente: Autor.

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	26
20	26
30	28
40	31
50	37
60	46
70	55
80	64
90	72
100	80
110	84
120	87
130	90
140	92
150	92
160	93
170	93
180	94


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

Tabla 21. Prueba 14 de esfera grande (C) con temperatura-tiempo en agua caliente.


Fuente: Autor.

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	25
20	25
30	25
40	27
50	30
60	34
70	39
80	46
90	52
100	60
110	67
120	75
130	81
140	86
150	89
160	92
170	93
180	94


Tabla 22. Prueba 15 de esferas pequeñas (a) y (b) con temperatura-tiempo en horno.

Fuente: Autor.


Tiempo (segundos) en (a)	Temperatura (°C)	Tiempo (segundos) en (b)	Temperatura (°C)
10	23	10	26
20	24	20	28
30	25	30	32
40	27	40	34

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


50	30	50	37
60	33	60	40
70	37	70	43
80	40	80	46
90	44	90	49
100	48	100	52
110	51	110	54
120	54	120	57
130	58	130	59
140	61	140	62
150	64	150	64
160	67	160	66
170	69	170	68
180	72	180	70
190	74	190	72
200	76	200	73
210	78	210	75
220	80	220	76
230	82	230	78
240	84	240	79
250	85	250	80
260	87	260	81
270	88	270	82
280	89	280	83
290	91	290	84
300	92	300	85
310	93	310	86
320	93	320	87
330	94	330	87
340	95	340	88
350	95	350	88
360	96	360	88
370	96	370	88
380	97	380	88
390	97	390	89
400	98	400	89
410	98	410	89
420	98	420	92
430	98	430	94

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

440	98	440	97
450	98	450	100
460	98	460	103
470	98	470	105
480	98	480	108
490	102	490	110
500	104	500	112
510	108	510	114
520	110	520	115
530	112	530	116
540	114	540	117
550	115	550	118
560	117	560	119
570	118	570	121
580	119	580	122
590	120	590	123
600	121	600	124
610	122	610	125
620	123	620	126
630	124	630	127
640	125	640	128
650	126	650	129
660	127	660	130
670	128	670	131
680	129	680	132
690	129	690	132
700	130	700	133
710	131	710	134
720	132	720	135
730	132	730	135
740	133	740	136
750	134	750	137
760	134	760	138
770	135	770	139
780	136	780	139
790	136	790	140
800	137	800	141
810	137	810	141
820	138	820	142

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

830	139	830	142
840	139	840	143
850	139	850	143
860	140	860	144
870	140	870	144
880	141	880	145
890	141	890	145
900	142	900	145
910	142	910	146
920	143	920	146
930	143	930	147
940	143	940	147
950	144	950	147
960	144	960	147
970	144	970	148
980	145	980	148
990	145	990	149
1000	145	1000	149
1010	146	1010	149
1020	146	1020	149
1030	147	1030	150
1040	147	1040	150
1050	147	1050	150
1060	148	1060	150
1070	148	1070	151
1080	148	1080	151
1090	148	1090	151
1100	148	1100	151
1110	149	1110	152
1120	149	1120	152
1130	149	1130	152
1140	150	1140	152
1150	150	1150	152
1160	150	1160	152
1170	150	1170	153
1180	151	1180	153
1190	151	1190	153
1200	151	1200	153
1210	152	1210	154

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

1220	152	1220	154
1230	152	1230	154
1240	152	1240	154
1250	152	1250	154
1260	153	1260	154
1270	153	1270	155
1280	153	1280	155
1290	153	1290	155
1300	153	1300	155
1310	154	1310	155
1320	153	1320	155
1330	154	1330	156
1340	154	1340	156
1350	154	1350	156
1360	154	1360	156
1370	154	1370	156
1380	154	1380	156
1390	155	1390	156
1400	155	1400	156
1410	155	1410	157
1420	155	1420	157
1430	155	1430	157
1440	155	1440	157
1450	155	1450	157
1460	155	1460	157
1470	155	1470	157
1480	156	1480	158
1490	156	1490	158
1500	156	1500	158
1510	156	1510	158
1520	156	1520	158
1530	156	1530	158
1540	156	1540	158
1550	156	1550	158
1560	156	1560	158




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

Tabla 23. Prueba 16 de esferas pequeñas (c), (d) y (e) con temperatura-tiempo en horno. Fuente: Autor


Tiempo (segundos) en (c)	Temperatura (°C)	Tiempo (segundos) en (d)	Temperatura (°C)	Tiempo (segundos) en (e)	Temperatura (°C)
10	26	10	27	10	31
20	29	20	28	20	33
30	31	30	28	30	36
40	34	40	28	40	39
50	39	50	28	50	43
60	43	60	29	60	48
70	47	70	29	70	52
80	50	80	30	80	55
90	55	90	30	90	60
100	58	100	31	100	64
110	61	110	31	110	68
120	64	120	32	120	71
130	66	130	33	130	74
140	70	140	33	140	78
150	72	150	34	150	80
160	74	160	35	160	82
170	76	170	36	170	86
180	77	180	37	180	88
190	79	190	38	190	91
200	80	200	38	200	93
210	82	210	39	210	95
220	85	220	40	220	97
230	86	230	41	230	99
240	87	240	42	240	102
250	88	250	43	250	103
260	89	260	44	260	105
270	90	270	45	270	107
280	91	280	46	280	109
290	92	290	47	290	110
300	93	300	48	300	112
310	94	310	49	310	114
320	95	320	50	320	115
330	96	330	51	330	116

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

340	97	340	52	340	118
350	99	350	53	350	118
360	100	360	54	360	120
370	101	370	55	370	121
380	102	380	56	380	122
390	104	390	57	390	123
400	105	400	58	400	124
410	107	410	59	410	125
420	108	420	60	420	126
430	110	430	61	430	127
440	111	440	62	440	128
450	113	450	63	450	129
460	114	460	64	460	130
470	116	470	65	470	131
480	117	480	66	480	132
490	118	490	67	490	133
500	119	500	68	500	133
510	120	510	69	510	134
520	122	520	70	520	134
530	123	530	71	530	135
540	124	540	72	540	135
550	125	550	73	550	136
560	126	560	74	560	137
570	127	570	75	570	137
580	128	580	76	580	138
590	129	590	77	590	139
600	130	600	78	600	139
610	131	610	79	610	140
620	132	620	80	620	140
630	133	630	80	630	141
640	133	640	81	640	141
650	134	650	82	650	142
660	135	660	83	660	142
670	136	670	84	670	142
680	137	680	84	680	143
690	138	690	85	690	143
700	138	700	86	700	144
710	139	710	87	710	144
720	139	720	88	720	145

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


730	140	730	88	730	145
740	141	740	89	740	145
750	141	750	90	750	146
760	142	760	91	760	146
770	142	770	92	770	146
780	143	780	93	780	147
790	143	790	94	790	147
800	144	800	95	800	148
810	144	810	96	810	148
820	145	820	97	820	148
830	145	830	98	830	149
840	146	840	99	840	149
850	146	850	100	850	149
860	147	860	100	860	149
870	147	870	101	870	150
880	148	880	102	880	150
890	148	890	103	890	150
900	149	900	103	900	150
910	149	910	104	910	151
920	149	920	105	920	151
930	150	930	106	930	151
940	150	940	106	940	151
950	150	950	107	950	151
960	151	960	108	960	152
970	151	970	108	970	152
980	151	980	109	980	152
990	152	990	110	990	152
1000	152	1000	110	1000	152
1010	152	1010	111	1010	152
1020	152	1020	112	1020	152
1030	153	1030	112	1030	153
1040	153	1040	113	1040	153
1050	153	1050	113	1050	153
1060	154	1060	114	1060	153
1070	154	1070	115	1070	153
1080	154	1080	115	1080	153
1090	154	1090	116	1090	153
1100	155	1100	116	1100	154
1110	155	1110	117	1110	154

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


1120	155	1120	117	1120	154
1130	155	1130	118	1130	154
1140	155	1140	118	1140	154
1150	156	1150	119	1150	154
1160	156	1160	119	1160	154
1170	156	1170	120	1170	154
1180	156	1180	120	1180	155
1190	156	1190	121	1190	155
1200	156	1200	121	1200	155
1210	157	1210	121	1210	155
1220	157	1220	122	1220	155
1230	157	1230	122	1230	155
1240	157	1240	122	1240	155
1250	157	1250	123	1250	155
1260	158	1260	123	1260	156
1270	158	1270	123	1270	156
1280	158	1280	124	1280	156
1290	158	1290	124	1290	156
1300	158	1300	124	1300	156
1310	158	1310	125	1310	156
1320	158	1320	125	1320	156

Tabla 24. Prueba 17 de esferas grandes (A), (B) y (C) con temperatura-tiempo en horno.
Fuente: Autor


Tiempo (segundos) en (A)	Temperatura (°C) en (A)	Tiempo (segundos) en (B)	Temperatura (°C) en (B)	Tiempo (segundos) en (C)	Temperatura (°C) en (C)
10	26	10	25	10	25
20	27	20	25	20	25
30	27	30	26	30	25
40	27	40	27	40	25
50	27	50	27	50	26
60	28	60	28	60	26
70	28	70	29	70	27
80	29	80	30	80	28
90	29	90	32	90	29
100	30	100	33	100	30

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


110	31	110	35	110	32
120	32	120	37	120	33
130	33	130	39	130	35
140	34	140	42	140	37
150	35	150	42	150	39
160	36	160	46	160	41
170	37	170	48	170	43
180	38	180	50	180	44
190	39	190	51	190	47
200	40	200	54	200	48
210	41	210	56	210	50
220	42	220	58	220	52
230	44	230	60	230	54
240	45	240	61	240	56
250	47	250	63	250	58
260	48	260	65	260	60
270	50	270	66	270	61
280	52	280	68	280	63
290	53	290	69	290	65
300	55	300	71	300	66
310	56	310	72	310	68
320	57	320	74	320	69
330	59	330	75	330	71
340	60	340	76	340	72
350	61	350	77	350	74
360	63	360	78	360	75
370	65	370	79	370	76
380	66	380	80	380	77
390	67	390	81	390	78
400	68	400	82	400	79
410	70	410	83	410	80
420	71	420	84	420	81
430	72	430	84	430	82
440	73	440	85	440	83
450	74	450	86	450	83
460	75	460	86	460	84
470	76	470	87	470	85
480	77	480	87	480	85
490	78	490	88	490	86

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


500	79	500	89	500	86
510	79	510	90	510	87
520	80	520	90	520	87
530	81	530	91	530	88
540	82	540	92	540	88
550	82	550	92	550	89
560	83	560	93	560	89
570	84	570	93	570	89
580	85	580	94	580	90
590	85	590	95	590	91
600	86	600	96	600	91
610	87	610	97	610	92
620	87	620	97	620	92
630	88	630	98	630	93
640	88	640	100	640	93
650	88	650	101	650	94
660	89	660	102	660	95
670	90	670	103	670	96
680	90	680	103	680	97
690	91	690	104	690	98
700	91	700	104	700	99
710	92	710	105	710	100
720	92	720	106	720	100
730	92	730	107	730	101
740	93	740	108	740	101
750	93	750	108	750	102
760	93	760	109	760	103
770	94	770	110	770	104
780	94	780	111	780	105
790	95	790	112	790	105
800	95	800	112	800	106
810	95	810	113	810	107
820	96	820	114	820	108
830	96	830	115	830	109
840	97	840	115	840	110
850	97	850	116	850	111
860	98	860	117	860	111
870	98	870	117	870	112
880	98	880	118	880	113

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

890	99	890	118	890	114
900	100	900	119	900	114
910	100	910	120	910	115
920	101	920	120	920	116
930	101	930	121	930	117
940	102	940	122	940	117
950	103	950	122	950	118
960	103	960	123	960	119
970	104	970	124	970	119
980	104	980	124	980	120
990	105	990	125	990	121
1000	106	1000	126	1000	121
1010	106	1010	126	1010	121
1020	107	1020	127	1020	122
1030	108	1030	127	1030	123
1040	108	1040	128	1040	123
1050	109	1050	128	1050	124
1060	110	1060	129	1060	125
1070	111	1070	129	1070	125
1080	111	1080	130	1080	126
1090	112	1090	130	1090	126
1100	112	1100	131	1100	127
1110	113	1110	131	1110	127
1120	113	1120	132	1120	128
1130	114	1130	132	1130	128
1140	115	1140	133	1140	129
1150	115	1150	133	1150	129
1160	116	1160	134	1160	130
1170	116	1170	135	1170	130
1180	117	1180	135	1180	131
1190	118	1190	135	1190	131
1200	118	1200	136	1200	131
1210	119	1210	136	1210	132
1220	119	1220	137	1220	132
1230	119	1230	137	1230	133
1240	120	1240	138	1240	134
1250	120	1250	138	1250	134
1260	121	1260	138	1260	134
1270	121	1270	139	1270	135

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

1280	122	1280	139	1280	135
1290	122	1290	140	1290	136
1300	122	1300	140	1300	136
1310	123	1310	140	1310	136
1320	123	1320	141	1320	137
1330	124	1330	141	1330	137
1340	124	1340	141	1340	138
1350	125	1350	142	1350	138
1360	125	1360	142	1360	138
1370	125	1370	142	1370	139
1380	126	1380	143	1380	139
1390	126	1390	143	1390	139
1400	126	1400	143	1400	139
1410	127	1410	144	1410	140
1420	127	1420	144	1420	140
1430	127	1430	144	1430	141
1440	128	1440	145	1440	141
1450	128	1450	145	1450	141
1460	128	1460	145	1460	141
1470	129	1470	145	1470	142
1480	129	1480	146	1480	142
1490	129	1490	146	1490	142
1500	130	1500	146	1500	143
1510	130	1510	147	1510	143
1520	130	1520	147	1520	143
1530	131	1530	147	1530	143
1540	131	1540	147	1540	144
1550	131	1550	148	1550	144
1560	132	1560	148	1560	144
1570	132	1570	148	1570	144
1580	132	1580	148	1580	145
1590	132	1590	149	1590	145
1600	133	1600	149	1600	145
1610	133	1610	149	1610	145
1620	133	1620	149	1620	146
1630	134	1630	150	1630	146
1640	134	1640	150	1640	146
1650	134	1650	150	1650	146
1660	134	1660	150	1660	146


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

1670	135	1670	150	1670	147
1680	135	1680	150	1680	147
1690	135	1690	151	1690	147
1700	135	1700	151	1700	147
1710	136	1710	151	1710	148
1720	136	1720	151	1720	148
1730	136	1730	151	1730	148
1740	136	1740	152	1740	148
1750	137	1750	152	1750	148
1760	137	1760	152	1760	149
1770	137	1770	152	1770	149
1780	138	1780	152	1780	149
1790	138	1790	152	1790	149
1800	138	1800	152	1800	149
1810	138	1810	152	1810	150
1820	139	1820	153	1820	150
1830	139	1830	153	1830	150
1840	139	1840	153	1840	150
1850	140	1850	153	1850	150
1860	140	1860	153	1860	150
1870	140	1870	153	1870	151
1880	141	1880	153	1880	151

Tabla 25. Prueba 18 de esfera pequeña sellada (a) con temperatura-tiempo en agua fría.

Fuente: Autor

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	21
20	20
30	19
40	16
50	13
60	11
70	10
80	8

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


90	7
100	6
110	5
120	5
130	4
140	4
150	3
160	3
170	3
180	2

Tabla 26. Prueba 19 de esfera pequeña sellada (a) con temperatura-tiempo en agua caliente. Fuente: Autor

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
15	25
30	40
45	63
60	80
75	88
90	91
105	93
120	94

Tabla 27. Prueba 20 de esfera grande sellada (C) con temperatura-tiempo en agua fría. Fuente: Autor

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	25
20	24
30	23

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

40	23
50	21
60	20
70	19
80	18
90	17
100	16
110	15
120	14
130	13
140	13
150	12
160	11
170	11
180	10
190	10
200	10
210	9
220	9
230	8
240	8
250	8
260	8
270	8
280	8
290	8
300	7

Tabla 28. Prueba 21 de esfera pequeña (a) con temperatura-tiempo medida en la superficie en agua fría. Fuente: Autor


Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	3
20	3
30	3

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

40	3
50	3
60	3
70	3
80	3
90	3
100	3
110	3
120	3
130	3
140	3
150	3
160	3
170	3
180	3

Tabla 29. Prueba 22 de esfera pequeña (b) con temperatura-tiempo medida en la superficie en agua fría. Fuente: Autor

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	4
20	3
30	3
40	3
50	3
60	3
70	3
80	3
90	3
100	3
110	3
120	3
130	3
140	3
150	3

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


160	3
170	3
180	3

Tabla 30 Prueba 23 de esfera grande (A) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua fría. Fuente: Autor

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	4
20	4
30	3
40	3
50	3
60	3
70	3
80	3
90	3
100	3
110	3
120	3
130	3
140	3
150	3
160	3

Tabla 31 Prueba 24 de esfera pequeña (a) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua caliente. Fuente: Autor.

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
15	94
30	94
45	94
60	94
75	94

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

90	95
----	----


Tabla 32 Prueba 25 de esfera pequeña (b) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua caliente. Fuente: Autor.

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	93
20	93
30	94
40	94
50	94
60	94
70	94
80	95
90	95

Tabla 33 Prueba 26 de esfera grande (A) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua caliente. Fuente: Autor.

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	93
20	94
30	94
40	94
50	94
60	94
70	94
80	94
90	95


Tabla 34. Prueba 27 de esfera grande (B) con temperatura-tiempo medida en la superficie con agua caliente. Fuente: Autor.

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


Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)
10	94
20	94
30	94
40	94
50	94
60	94
70	94
80	95
90	95

Tabla 35. Prueba 28 de esferas empacadas con temperatura-tiempo medida en el centro y superficie de la bola. Fuente: Autor

Tiempo (s)	Temperatura en el centro (oC)	Temperatura en la superficie (oC)
0	70	140
18	71	140
38	72	140
48	73	140
54	74	140
58	75	140
60	76	140
65	77	140
70	78	140
76	79	140
85	82	140
92	84	140
102	86	140
122	88	140
150	90	140
177	92	140
194	94	140

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

206	96	140
223	98	140
236	100	140
246	102	140
257	104	140
267	106	140
278	108	140
288	110	140
307	112	140
310	114	140
324	116	140
335	118	140
351	120	140
369	122	140
388	124	140
410	126	140
432	128	140
460	130	140
490	132	140
532	134	140
573	136	140
642	138	140
743	140	140

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

FIRMA ESTUDIANTES _____
Santiago José Cortina C.

FIRMA ASESOR _____
[Signature]

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO__ ACEPTADO__ ACEPTADO CON
 MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____