

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Diseño de un prototipo experimental para la estimación del poder  
calorífico de muestras biomásicas sólidas”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Zinedine Wilpher Almache Ortega

Axel Alejandro Lainez Liriano

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**Año: 2020**

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedico a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional y consejos para lograr esta meta.

**Zinedine Wilpher Almache Ortega**

## **DEDICATORIA**

El proyecto se lo dedico a mi familia por su apoyo incondicional, además de todos los docentes que hicieron parte de mi formación profesional.

**Axel Alejandro Lainez Liriano**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi familia que me apoyaron incondicionalmente en mi etapa de estudiante universitario, a mis amigos de la universidad por brindarme su amistad y sus consejos a lo largo de esta carrera profesional

**Zinedine Wilpher Almache Ortega**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la salud y la dedicación para permitir alcanzar esta meta, a mis padres quien me han brindado apoyo económico y moral, a mis hermanos por dar ejemplo de lo que es superarse día a día, a mi compañero de tesis Zinedine Almache por el esfuerzo realizado a lo largo de este proyecto y finalmente a mis amigos que he hecho a lo largo de la carrera, especialmente Andrea, Eduardo, Ronald y Zinedine por haberme enseñado que el trabajo en equipo es necesario en la vida diaria.

**Axel Alejandro Lainez Liriano**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Zinedine Almache Ortega y Axel Lainez Liriano* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

Zinedine Almache Ortega



---

Axel Lainez Liriano

## EVALUADORES

EMERITA  
ALEXANDRA  
DELGADO  
PLAZA

Firmado digitalmente por  
EMERITA ALEXANDRA  
DELGADO PLAZA  
Nombre de reconocimiento  
(DN): c=EC, o=SECURITY  
DATA S.A. 1, ou=ENTIDAD  
DE CERTIFICACION DE  
INFORMACION,  
serialNumber=28092019101  
9, cn=EMERITA ALEXANDRA  
DELGADO PLAZA  
Fecha: 2021.05.11 02:45:04  
-05'00'

JUAN  
MANUEL  
PERALTA  
JARAMILLO

Firmado digitalmente por JUAN  
MANUEL PERALTA JARAMILLO  
Nombre de reconocimiento (DN):  
c=EC, o=SECURITY DATA S.A. 1,  
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION  
DE INFORMACION,  
serialNumber=280920183144,  
cn=JUAN MANUEL PERALTA  
JARAMILLO  
Fecha: 2021.05.12 15:17:47 -05'00'

---

**Emérita Delgado Plaza**  
PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Juan Peralta Jaramillo**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

En el Ecuador existen pocos proyectos asociados al uso de bioenergía debido a que existe un déficit de información de las propiedades de la biomasa, con relación a esta problemática se plantea diseñar un dispositivo capaz de estimar el poder calorífico de muestras de biomasa sólidas. Con el objetivo de impulsar el crecimiento de este nuevo mercado energético se planteó el diseño de un calorímetro adiabático con un recipiente de acero inoxidable donde se realiza la combustión de la muestra para la experimentación, un sistema de ignición que brinda la energía necesaria para que la muestra alcance la temperatura de ignición y una camisa de agua estática con un par de agitadores para distribuir la temperatura uniformemente, con el fin de obtener datos de temperaturas se realizó un sistema de control para la toma de datos. La metodología implementada para este proyecto se basó en el uso de la norma IRAM 17016: Carbones, método de determinación del poder calorífico como guía, luego se realizó un análisis matemático en base a la transferencia de calor en el sistema en conjunto con un programa de simulación de fluidos. Como resultado de esta metodología se obtuvo un diseño con una temperatura máxima de 650 K de operación (temperatura que está por debajo de la temperatura de trabajo del material del obús) y una temperatura exterior promedio de 295 K, cercana a la del ambiente. Finalmente, se concluye que el prototipo requiere una inversión construcción y diseño atractivo en el país, lo cual impulsaría en gran medida el mercado bioenergético en el Ecuador.

**Palabras Claves:** Biomasa, Poder calorífico, combustión, Simulación computacional de fluidos.



## **ABSTRACT**

*In Ecuador there are few projects associated with the use of bioenergy because there is a deficit of information on the properties of biomass, in relation to this problem we propose to design a device capable of estimating the calorific value of solid biomass samples. To promote the growth of this new energy market, the design of an adiabatic calorimeter was proposed with a stainless-steel container where the combustion of the sample for experimentation is performed, an ignition system that provides the necessary energy for the sample to reach the ignition temperature and a static water jacket with a pair of agitators to distribute the temperature uniformly, in order to obtain temperature data, a control system for data collection was developed. The methodology implemented for this project was based on the use of IRAM 17016: Coals, method for determining the calorific value as a guide, then a mathematical analysis was performed based on the heat transfer in the system in conjunction with a fluid simulation program. As a result of this methodology, a design with a maximum operating temperature of 650 k (temperature below the working temperature of the core material) and an average outside temperature of 295 k, close to the ambient temperature, was obtained. Finally, the design of the prototype requires an attractive investment for its construction and design in the country, which would greatly boost the bioenergy market in Ecuador.*

**Keywords:** *Biomass, Calorific power, combustion, Computational fluid simulation*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
INDICE DE GRÁFICAS.....	XI
INDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del Problema .....	1
1.2 Justificación del proyecto .....	1
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Biomasa.....	3
1.4.2 Biomasa Sólida.....	5
1.4.3 Poder calorífico.....	5
1.4.4 Calorímetros .....	6
1.4.5 Instrumentación .....	10
1.4.6 Normativas .....	11
CAPÍTULO 2 .....	13
2. Metodología.....	13
2.1 Requisitos del cliente .....	13
2.2 Alternativas de diseño .....	14
2.3 Matriz de decisión .....	14
2.3.1 Variables de selección .....	14
2.4 Factores de diseño.....	17
2.4.1 Diseño de forma .....	18
2.5 Diseño detallado .....	19

2.5.1	Parámetros de diseño .....	20
2.6	Sistema de ignición. ....	20
2.6.1	Resistencia eléctrica .....	21
2.6.2	Esquema del circuito del sistema de ignición .....	22
2.7	Combustión de fuentes biomásicas sólidas. ....	23
2.7.1	Balance estequiométrico de la combustión de biomasa .....	24
2.7.2	Cantidad de oxígeno agregado en la combustión .....	25
2.8	Diseño del obús. ....	26
2.9	Sistema de agitación .....	28
2.10	Diseño de la envoltura adiabática.....	29
CAPÍTULO 3 .....		31
3.	Resultados y Análisis. ....	31
3.1	Resultados teóricos.....	31
3.1.1	Método práctico para obtener el poder calorífico de la biomasa .....	31
3.1.2	Cálculo de temperatura de las superficies .....	33
3.2	Análisis computacional.....	38
3.2.1	Temperatura de combustión .....	38
3.2.2	Parámetros de simulación .....	39
3.2.3	Simulación CFD.....	39
3.3	Validación de resultados .....	42
3.4	Sistema de medición de temperatura .....	43
3.4.1	Placa electrónica .....	43
3.4.2	Medidor de temperatura.....	44
3.4.3	Resistencia eléctrica .....	45
3.4.4	Circuito del sistema de control .....	46
3.5	Costos.....	48
3.5.1	Costo de diseño.....	48
3.5.2	Costos de materiales .....	49
3.5.3	Costos de manufactura.....	49
3.5.4	Costos de complementos .....	50
3.5.5	Costo total .....	50
3.5.6	Análisis de costos .....	51
CAPÍTULO 4 .....		52
4.	Conclusiones y recomendaciones .....	52

4.1	Conclusiones.....	52
4.2	Recomendaciones.....	53

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HWL	High Water Level
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
CFD	Computational Fluid Dynamics
RSME	Error cuadrático medio

## SIMBOLOGÍA

g	Gramos
m	Metro
V	Voltio
Cu	Cobre
C	Carbono
E	Efecto Joule
$V$	Diferencia de potencial
I	Intensidad de corriente
t	Tiempo
$T_{amb}$	Temperatura ambiente
$P_{atm}$	Presión atmosférica
R	Resistencia eléctrica
$L_{Ni}$	Longitud de alambre de nicromo
$\rho_M$	Resistividad del material
$A_{Ni}$	Área del nicromo
P	Potencia Disipada
Q	Cantidad de calor
PC	Poder calorífico
$m$	Masa
R	Constante universal de los gases
$n$	Número de moles
$M_{O_2}$	Masa de oxígeno
$M_u$	Masa molar
$\sigma_2$	Esfuerzo longitudinal
P	Presión
$D_{obús}$	Diámetro del obús
$\sigma_1$	Esfuerzo axial
$V_{requerido}$	Volumen de la camisa
$\dot{Q}$	Flujo de calor
r	Radio de los cilindros
$Q_{absorbido}$	Calor absorbido

$Q_{entregado}$	Calor entregado
$\Delta U$	Energía interna
$C_p$	Calor específico
$\Delta T$	Diferencia de temperatura
$T_b$	Temperatura del exterior
$N_{RE}$	Número de Reynolds en agitación
$D_a$	Diámetro del agitador
$N$	Revoluciones del agitador
$\rho$	Densidad del agua
$\mu$	Viscosidad cinemática del agua
$h_f$	Coefficiente convectivo
$T_{prom}$	Temperatura promedio
$h_{rad}$	Coefficiente de radiación
$R_{rad}$	Resistencia térmica por radiación
$R_{cond}$	Resistencia térmica por conducción
$R_{conv}$	Resistencia térmica por convección
$T_{in\ obus}$	Temperatura interna del obús

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de bomba calorimétrica de Mahler con sus componentes .....	6
Figura 1.2: Bomba calorimétrica con agitador mecánico .....	8
Figura 1.3: Bomba calorimétrica con recirculación de agua en envoltura de camisa .....	9
Figura 2.1: Proceso de diseño (Grech, 2013) .....	13
Figura 2.2: Diseño de forma de bomba calorimétrica con agitador mecánico .....	19
Figura 2.3: Resistividad y coeficiente de temperatura .....	21
Figura 2.4: Diagrama de circuito eléctrico para sistema de ignición .....	22
Figura 2.5: Diagrama de Resistencias de calor .....	29
Figura 3.1: Resistencias térmicas.....	34
Figura 3.2: Análisis del bagazo en atmósfera oxidante.....	38
Figura 3.3: Distribución de temperatura en la camisa.....	40
Figura 3.4: Arduino UNO .....	44
Figura 3.5: Sensor de temperatura DS18B20.....	44
Figura 3.6: Sistema de control de toma de datos .....	46
Figura 3.7: Código del sistema de control .....	47
Figura 3.8: Ejemplo de la ejecución del código del sistema de medición.....	48
Figura A.4.1: Velocidad del fluido en la experimentación .....	57
Figura A.4.2: Simulación de agitadores a diferentes velocidades (600 rpm, 300 rpm) ..	57
Figura A.4.3: Ficha técnica de sensor de temperatura DS18B20 .....	58
Figura A.4.4: Catálogos de planchas de acero inoxidable [DIPAC] .....	58
Figura A.4.5: Propiedades del acero inoxidable [ (Incropera & DeWitt, 1996)] .....	59
Figura A.4.6: Propiedades de la fibra de vidrio [ (Incropera & DeWitt, 1996)] .....	59
Figura A.7: Propiedades del agua [ (Incropera & DeWitt, 1996)] .....	60



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Instrumentos de medición de temperatura.....	11
Tabla 2.1: Método de comparación por pares .....	15
Tabla 2.2: Ponderación de variables de diseño .....	15
Tabla 2.3: Calificación para variables.....	16
Tabla 2.4: Matriz de decisión.....	16
Tabla 2.5: Clasificación de bombas según su capacidad .....	18
Tabla 2.6: Poder calorífico superior de biomosas.....	24
Tabla 2.7: Sistemas de agitación (Geankpolis, 2006).....	28
Tabla 3.1: Propiedades de los materiales.....	33
Tabla 3.2: Dimensiones del sistema.....	35
Tabla 3.3: Resultados teóricos .....	38
Tabla 3.4: Parámetros para la simulación de flujo .....	39
Tabla 3.5: Resultados a temperatura de 800k.....	42
Tabla 3.6: Resultados a temperatura de 900k.....	42
Tabla 3.7: Resultados a temperatura de 1000k.....	42
Tabla 3.8: Resultados de la estimación de error.....	43
Tabla 3.9: Características de sensor DS18B20 .....	45
Tabla 3.10: Resolución del sensor de temperatura .....	45
Tabla 3.11: Resistencia respecto a la distancia del cable.....	46
Tabla 3.12: Costos de diseño .....	48
Tabla 3.13: Costos de materiales del sistema .....	49
Tabla 3.14: Costos de los procesos de manufactura.....	50
Tabla 3.15: Complementos del diseño .....	50
Tabla 3.16: Costo total .....	51

## **INDICE DE GRÁFICAS**

Gráfica 3.1: Temperatura interna en el obús en función del tiempo .....	41
Gráfica 3.2: Temperatura externa en aislamiento.....	41

## **INDICE DE PLANOS**

- PLANO 1 Plano del recipiente de combustión
- PLANO 2 Plano del agitador
- PLANO 3 Plano de la cubeta
- PLANO 4 Plano del recipiente aislante
- PLANO 5 Plano del calorímetro adiabático completo

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Definición del Problema

En el Ecuador existe un gran interés en el uso de la biomasa como fuente energética. Sin embargo, existe muy poca de la información de las características o propiedades de los diferentes tipos de biomasa en el país. Esta situación limita el avance tecnológico en la generación de bioenergía y, además, dificulta el desarrollo de actividades asociadas a la producción, gestión y manejo del recurso bio-másico existente en el Ecuador.

Una de las principales variables para la valoración energética de biomasa es su poder calorífico, esta información a nivel nacional es insuficiente por lo que se utilizan valores referenciales existentes en la biografía o pertenecientes a otros países de la región.

En la atención a la problemática expuesta, queda evidenciado la necesidad de desarrollar equipos de medición dentro del contexto local que nos permita evaluar las propiedades de las fuentes biomásicas, como es el caso del poder calorífico, humedad, grado de cenizas, entre otros.

Finalmente, el proyecto planea solucionar la problemática en impacto económico, social, ambiental y social.

### 1.2 Justificación del proyecto

En el Ecuador se puede considerar como marginal el uso de la bioenergía en comparación a otras fuentes de energía (en especial la energía hídrica); considerando el documento "Balance energético nacional" elaborado por el Ministerio de energía y recursos naturales no renovables, donde se puede apreciar que la oferta de energía eléctrica correspondiente a bioenergía es 1.3%. A partir de este valor queda claro que en el país no se ha desarrollado los proyectos asociados a la generación de energía mediante el uso de biomasa.

Es importante mencionar, aunque existen leyes que incentivan el desarrollo de proyectos asociados al uso de energías renovables, tal como lo indica el

artículo 413 de la constitución ecuatoriana que estipula ‘El estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y el uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas y de bajo impacto’, en la práctica no hay implementación de este tipo de proyectos basados en bioenergía de forma considerable, uno de los puntos más críticos de la falta de iniciativa de inversión en esta área energética es la poca información existente y validada en relación a la disponibilidad y potencial energético de biomasa.

En el Ecuador existen diversos recursos biomásicos en el sector agrícola, tales como la cascarilla de arroz, residuos de cacao, bagazo de caña de azúcar, leña, entre otras. De la misma forma, se pueden utilizar en la generación de energía eléctrica no convencional, por lo cual es conveniente conocer sus características y propiedades físicas químicas.

De igual manera, la bioenergía puede contribuir a promover los objetivos de desarrollo sostenibles, se tomará considerando los aspectos económicos, social, ambiental y de seguridad.

El objetivo 8 (trabajo decente y crecimiento económico) apunta a estimular el crecimiento económico sostenible mediante el aumento de los niveles de productividad y la innovación tecnológica. De tal manera que la adquisición de dispositivos que ayuden a la valoración de recursos bio-másicos dentro del Ecuador contribuirá al desarrollo de sistemas de cultivos energéticos en el sector agrícola del país principalmente en zonas marginales o económicamente deprimidas lo que conllevará a la generación de nuevas plazas de empleo en el marco del fomento de la bioenergía.

El objetivo 9 (industria, innovación e infraestructura) establece “los avances tecnológicos también son esenciales para encontrar soluciones permanentes a los desafíos económicos y ambientales, al igual que la oferta de nuevos empleos y la promoción de la eficiencia energética”. Por lo tanto, El desarrollo de este dispositivo debe ser económicamente viable, con relación a su costo de manufactura y operación. El desarrollo de estos equipos contribuirá a la reducción de costos de evaluación del recurso bio-másico y además facilitará la identificación de los procesos tecnológicos para su conversión.

El objetivo 7 (energía asequible y no contaminante) se menciona que es necesario mejorar la tecnología para contar con energía limpia. Por el cual, la

valoración de recurso bio-másico en el Ecuador facilitara herramientas que permiten la migración sostenible de la matriz energética, por el uso de fuentes renovables de energía, contribuyendo a la mitigación de gases de efecto invernadero. Además, el promover información para proyectos asociados al uso de energías renovables ayuda a incentivar proyectos energéticos que presente un bajo impacto ambiental.

El objetivo 3 (salud y Bienestar) se habla sobre garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos. Por otra parte, el dispositivo deberá ser de fácil operación y deberá cumplir todos los protocolos y normativas de seguridad ocupacional para el desarrollo de las mediciones.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un prototipo para la estimación del poder calorífico de fuentes biomásicas solidas que contribuyan con información para la realización de estudios de viabilidad asociados a proyectos de generación de bioenergía.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Diseñar el calorímetro y la camisa externa del sistema de prueba aplicando criterios de ingeniería
2. Diseñar el sistema de generación de voltaje para la generación de ignición de la muestra
3. Elaborar el diagrama correspondiente al sistema de control para el registro de las variables de operación del equipo.
4. Desarrollar el análisis de costos por medio de la valoración del diseño construccional y materiales necesarios para la manufactura.

### **1.4 Marco teórico**

#### **1.4.1 Biomasa**

La biomasa al ser utilizada como biocombustible se puede considerar como una fuente de energía renovable, cuya obtención se deriva del proceso de degradación biológica o mecánica de materia orgánica o animal.

El contenido energético de la biomasa procede de la energía solar que es fijada por los vegetales en un proceso fotosintético. Esta energía se libera al romper enlaces de los compuestos orgánicos en un proceso de combustión, dando como producto dióxido de carbono y agua (Fernández, 2012).

La biomasa se puede clasificar según su origen de producción, como:

- **Biomasa natural**

Este tipo de biomasa se caracteriza por ser aplicada de forma directa con fines energéticos, los productos biomásicos pueden ser alimentos, leña, fibra, estiércol seco, plantas. De estos productos se derivan los pellets y carbón de leña vegetal. (Navarro, 2018).

- **Biomasa residual**

Consiste en los residuos generados de diferentes actividades agrícolas, forestales y de industrias derivadas de ambas actividades. Además, se incluyen la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Se clasifican en biomasa residual seca y húmeda. (Carrasco, 2015)

- ✓ **Biomasa residual seca.** – Las actividades agrícolas, forestales y en los procesos de las industrias agroalimentarias y en actividades de transformación de madera producen subproductos sólidos que pueden ser denominados residuos. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

- ✓ **Biomasa residual húmeda.** – En este grupo se incluyen las aguas residuales industriales y urbanas y los residuos ganaderos, estos residuos son denominados vertidos biodegradables. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

- **Cultivos energéticos**

Son aquellos cultivos no alimentarios que son cultivados para la producción de energía. Los agro-energéticos son seleccionados en base a la producción de cantidad de biomasa y no de calidad a diferencias de los cultivos agrícolas alimenticios. (TRANSBIOMA, 2012).

### 1.4.2 Biomasa Sólida

Este tipo de biomasa es el más conocido, y es obtenido principalmente de la madera obtenida de en tratamientos selvícolas forestales, residuos de industrias que trabajan con productos biomásicos, (carpintería, papelera, entre otros.), residuos obtenidos en limpiezas de parque y en podas de jardines, subproductos de naturaleza agrícola, cultivos energéticos, residuos agroindustriales, fracciones orgánicas de residuos urbanos. (TRANSBIOMA, 2012).

### 1.4.3 Poder calorífico

El poder calorífico mide la energía que es desprendida en una reacción de combustión respecto a la unidad de masa de combustible. (Neiva, 2012)

El poder calorífico es la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y una sustancia que oxida al combustible(comburente), y es igual a la energía que mantenía unido a los átomos de combustible menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas (gases). (Neiva, 2012)

De manera general la reacción de combustión se establece de la siguiente manera:



El calor de oxidación es lo que representa la potencia calorífica. Las unidades más utilizadas para medir el poder calorífico son:

$$\left(\frac{Kcal}{Kg}\right); \left(\frac{Kcal}{m^3}\right); \left(\frac{BTU}{lb}\right); \left(\frac{BTU}{pie^3}\right)$$

El poder calorífico se puede definir de dos formas diferentes:

**Poder calorífico superior (PCS):** El Poder Calorífico Superior o PCS, es toda la cantidad de calor liberado en la combustión sumando, además el calor que se liberaría en la condensación del agua contenido en los humos. Esta agua tiene dos orígenes: el agua formada en la reacción de combustión de la biomasa y el agua que contenía el propio combustible. Se



distinguen dos valores de PCS: el PCS en base seca y el PCS en base húmeda.

**Poder calórico inferior (PCI):** cuando el agua en la reacción de combustión se encuentra en forma de vapor. (Cengel Y., 2015)

Existen diferentes métodos para determinar el poder calorífico, siendo el más conocido el procedimiento donde se utiliza un equipo llamado calorímetro.

#### 1.4.4 Calorímetros

Los calorímetros pueden ser clasificados dependiendo del principio de medición que se está efectuando entre la chaqueta y la muestra a analizar, entre ellas se encuentran los: Calorímetros isotérmicos, calorímetros adiabáticos, calorímetros isoperibólicos. (Stefan, Gunther, & Wolfgang, 2009).

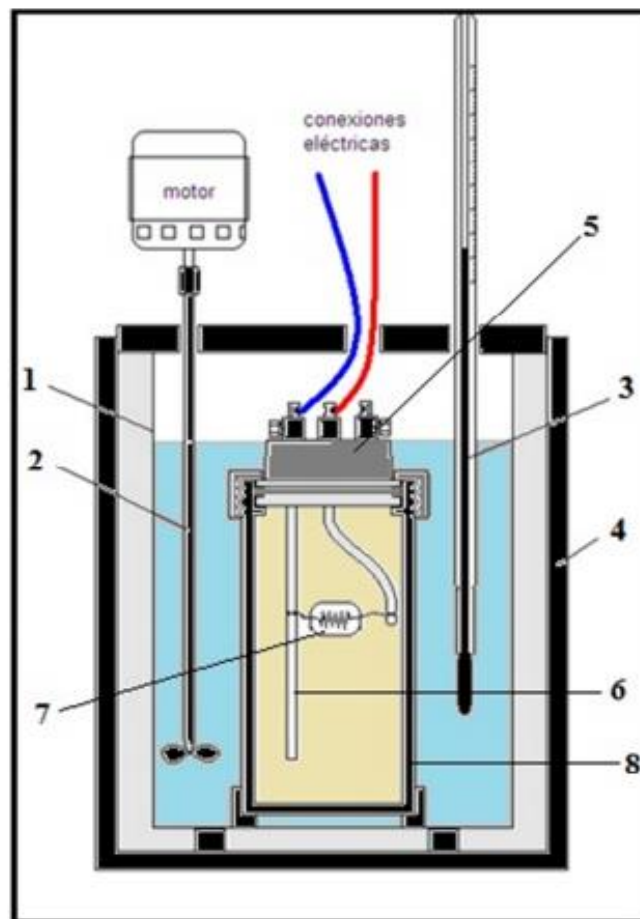


Figura 1.1: Esquema de bomba calorimétrica de Mahler con sus componentes (Corace & Martina, 2013)

En la figura 1.1 se describen los componentes que están involucrados el calorímetro el cual son:

- 1.- Recipiente calorímetro o cubeta.
- 2.- Agitador mecánico
- 3.- Termómetro de alta precisión
- 4.- Chaqueta o envoltorio.
- 5.- Tapa del obús
- 6.- Electrodo
- 7.- Crisol
- 8.- Obús

Los calorímetros más usados en el área investigativa son los Calorímetros adiabático, Calorímetro isotérmico y Calorímetros isoperibólico.

### **Calorímetro adiabático.**

En los calorímetros adiabáticos bajo circunstancia ideales no existe transferencia de calor entre el sistema de medición y lo alrededores, esto puede ocurrir en 3 situaciones: (Stefan, Gunther, & Wolfgang, 2009)

- La muestra está solamente aislada de sus alrededores, eso quiere decir que la resistencia térmica entre la muestra y los alrededores ideal o infinitamente larga.
- La temperatura de los alrededores debe ser igual en cada momento a la temperatura de la muestra deben ser iguales mediante un circuito de control.
- La producción de calor es tan rápida que la tasa de cambio de temperatura cambia a tasas muy grande que la transferencia de calor con sus alrededores es despreciable.

Existen varios tipos de calorímetros adiabáticos, usualmente cambian el diseño de su camisa o la forma de controlar el cambio de temperatura mediante un sistema de control. Estos sistemas que controlan la temperatura contienen un agitador mecánico que hace que la temperatura sea uniforme en la camisa o un sistema de recirculación de agua que controla la temperatura de la envoltura de la camisa, dependerá también de la geometría del agitador debido a la generación de vórtices a diferentes revoluciones.

### Bomba adiabática con agitador mecánico

En el diseño de forma se pueden visualizar parámetros tales como el sistema de regulación de temperatura, además de los componentes involucrados en la bomba calorimétrica los cuales están conformados por una fuente de alimentación que genera una chispa para iniciar la combustión de la muestra a través de un cable que cierra el circuito mediante la conexión de 2 electrodos ubicados dentro del vaso calorimétrico o el obús; El vaso calorimétrico está conformado por una válvula que se encarga de elevar la presión dentro de la misma para iniciar el proceso de combustión con la ayuda de un tanque de oxígeno, este es introducido a una cubeta de agua el cual su temperatura es controlado por medio de un sensor de temperatura; también se conforma de un agitador que ayuda a que la temperatura sea uniforme en todo el volumen de la cubeta que el agua ocupa. La cubeta es ubicada en un envoltorio el cual define el tipo de calorímetro que se va a utilizar.

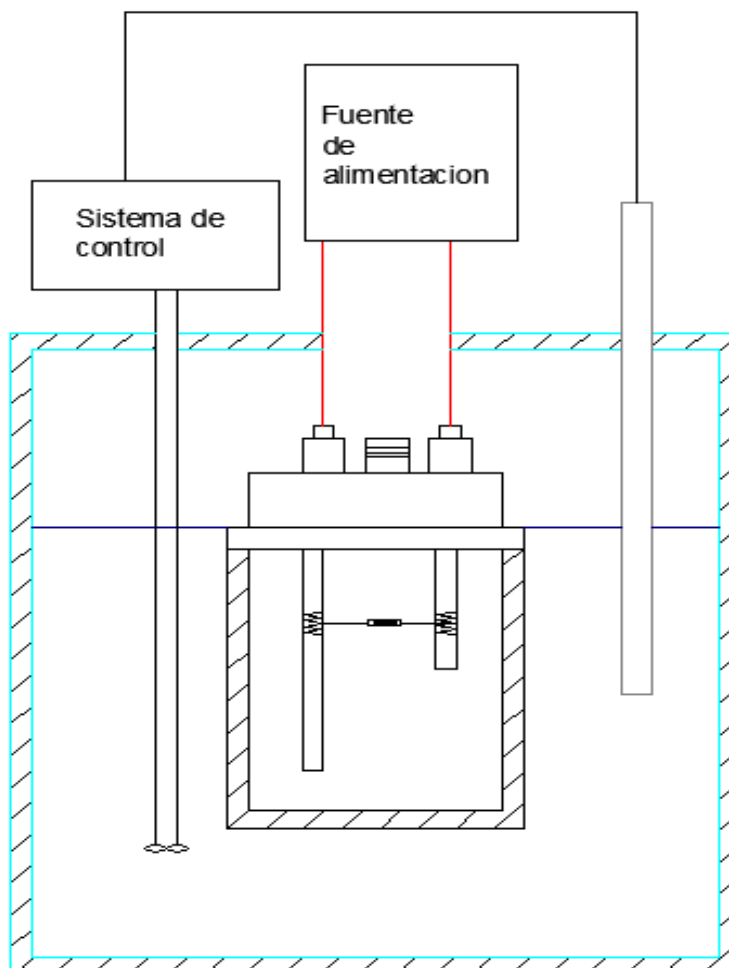


Figura 1.2: Bomba calorimétrica con agitador mecánico

### Bomba calorimétrica con recirculación de agua en envoltura de camisa

Entre las alternativas de diseño para el calorímetro se tiene las paredes con un recinto adiabático el cual consiste en minimizar las pérdidas de calor entre el recinto interior y el exterior, el cual se pueden observar mediante la ubicación del termistor en la figura 1.3. El uso de los termistores es para controlar la diferencia de temperatura que se encuentran entre el recinto interior (cubeta con agua) y el recinto exterior (pared adiabática) el cual en caso de tener una gran variación mediante un sistema de recirculación de agua se logra reducir la diferencia de temperatura entre ambas lo cual proporciona un correcto aislamiento, el recipiente interno es a volumen constante por el cual el recipiente con la muestra necesita una fuente de oxígeno externo para lograr obtener la combustión.

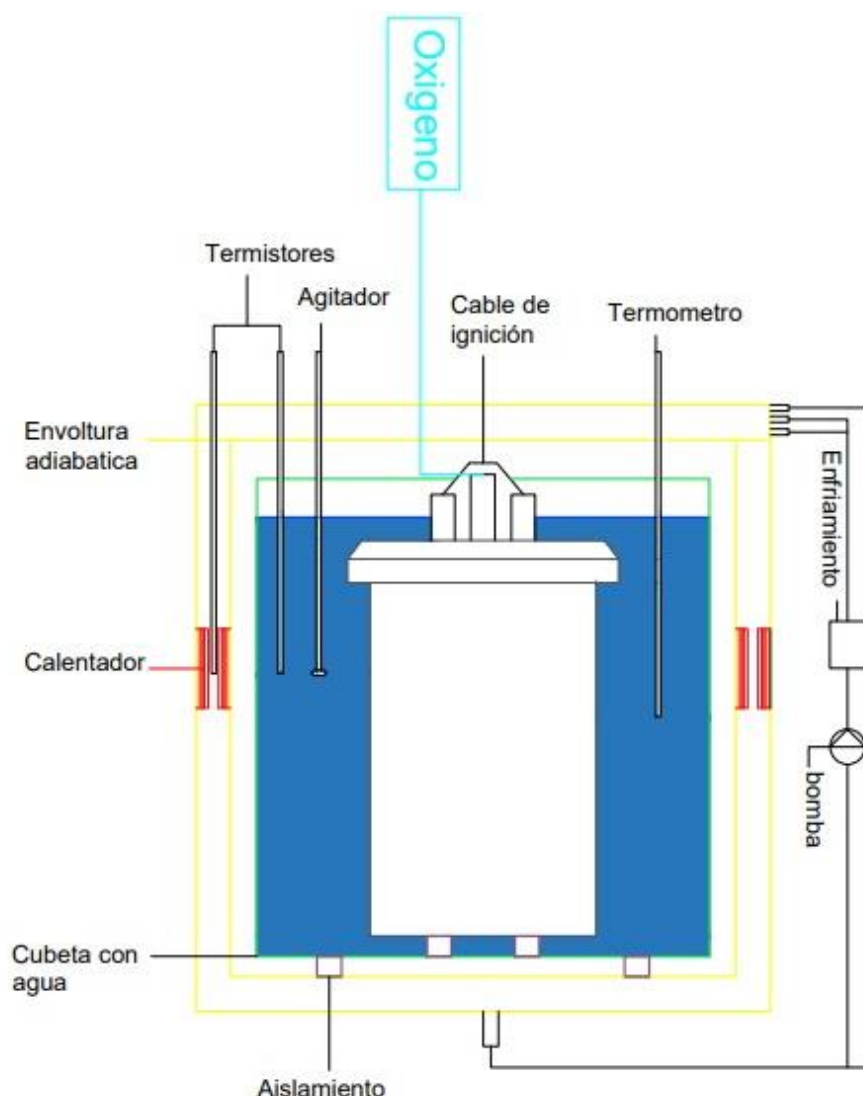


Figura 1.3: Bomba calorimétrica con recirculación de agua en envoltura de camisa

### **Calorímetro isotérmico.**

Son calorímetros que operan de manera isotérmica, los alrededores y el sistema de medición se mantienen a la misma temperatura. El estado isotérmico idealmente se establece cuando el sistema intercambie calor mediante una resistencia térmica infinitamente baja hacia un entorno de capacidad calorífica infinita, en calorimetría esta situación no es posible. Sin embargo, es posible llegar a realizar aproximaciones utilizando cierta compensación en el intercambio de calor mediante efectos termoeléctricos entre la muestra y el sensor de medición. De igual forma, para estos sistemas la chaqueta mostrada en la figura 1.1 está constituida por agua y durante la reacción la diferencia de temperatura del líquido calorimétrico y la muestra debe ser aproximadamente 1°C (Stefan M. Sarge, Gunther W. y Wolfgang Hemminger)

### **Calorímetros isoperibólicos.**

Son aquellos donde la chaqueta se mantiene a una temperatura constante mientras que la temperatura de la bomba y la cubeta varía a medida que ocurre la combustión. Es decir, la temperatura de la bomba calorimétrica va a estar en función del tiempo, por lo cual el flujo de calor entre el sistema y sus alrededores dependerá de la diferencia de temperatura como de la resistencia térmica establecida. (Stefan M. Sarge, Gunther W. y Wolfgang Hemminger)

## **1.4.5 Instrumentación**

Para el proceso de estimación del poder calorífico de una muestra de biomasa sólida por medio de un calorímetro es necesario la medición de las siguientes variables.

### **Medición de variables eléctricas**

El sistema de ignición está conformado por un par de electrodos, por medio de los cuales se produce un flujo de corriente, que pasa por el alambre de ignición de la muestra. Para determinar el calor liberado, es necesario medir ciertas variables como la potencia y el voltaje, además de la resistencia que

está constituido los electrodos, esto se lo puede realizar mediante un multímetro, una vez conocida dichas variables se procede a calcular la potencia eléctrica mediante la ecuación 1.1 (Stefan M. Sarge, Gunther W. y Wolfgang Hemminger).

$$E = V * I * t \quad (1.1)$$

### Medición de temperatura.

Entre los principales instrumentos para medir la temperatura en un calorímetro se encuentran las siguientes presentadas en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1: Instrumentos de medición de temperatura  
(Stefan, Gunther, & Wolfgang, 2009)**

Tipo	Rango	Condiciones	Características
Termómetros (liquido en vidrio)	200-500 [K]	Isobárico, isotérmico	Gran capacidad calorífica.
Termómetros a gas	2-700 [K]	Isobárico	Volumen relativamente alto.
Presión de vapor (termómetros)	1-100[K]	manómetros	Aplicables en solo ciertos rangos de temperaturas
Termistores	15-1300[K] 0-600[K]	Fuente de alimentación constante	Sensores de temperatura estandarizados, pequeña medición de incertidumbre con los metales, tienen a desgastarse con el tiempo
Termopar	1-3300[K]	Termostatos	No se pueden fabricar de manera estricta, al ser no homogéneo genera voltajes adicionales, rápido funcionamiento

### 1.4.6 Normativas

A partir de los requerimientos de las aplicaciones de bioenergía, la estimación del poder calorífico de la biomasa es fundamental para la

determinación del potencial y disponibilidad energética de este recurso, por tal razón a nivel internacional el proceso de medición debe cumplir protocolos establecidos en cada país por medio de normas técnicas, en función del sistema de medición seleccionado.

Dentro de este contexto, en la región sudamericana una de las normas más representativas es la IRAM 17016: *Carbones, Método de determinación del poder Calorífico*, elaborado en Argentina; establece la forma de determinación del poder calorífico de muestras de biomásas, empleando bombas calorimétricas. Además, la norma hace la descripción de los elementos que conforman los calorímetros a utilizar (Corace & Martina, 2013).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

En este proyecto se desarrolló el diseño de una bomba calorimétrica para la medición del poder calorífico de muestras de biomasa sólida, el cual se definió las siguientes variables como requerimientos de diseño, tales como mecánicos de transferencia de calor entre la chaqueta y los alrededores, el sistema de ignición para la combustión de la muestra, diagrama de sistema de control y costos de manufactura, considerando la complejidad del sistema y materiales existentes en el país.

Se utilizó el proceso de diseño por el cual detalla una serie de pasos con la finalidad de detallar el problema y obtener los mejores resultados tal como se muestra en la Figura 2.1

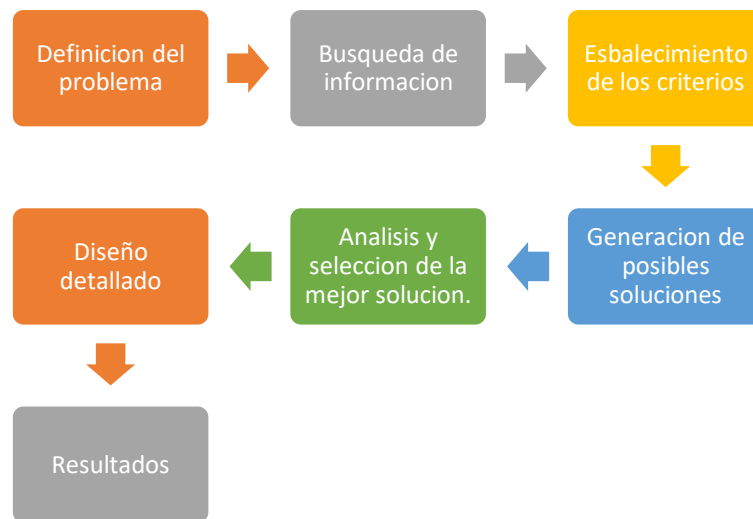


Figura 2.1: Proceso de diseño (Grech, 2013)

Con el objetivo de realizar un diseño acorde a los requerimientos del cliente, se definió 3 requisitos fundamentales para este proyecto.

### 2.1 Requisitos del cliente

- El dispositivo debe medir el poder calorífico solo de muestras de biomasa sólida.
- Para el proceso de combustión se admite una cantidad de muestra máximo de 1 gramo.



- El diseño, funcionamiento y experimentación del dispositivo debe cumplir al menos con los parámetros de la norma IRAM 17016: *Carbones, Método de determinación del poder Calorífico*, elaborado en Argentina.

A partir de estos requerimientos del cliente se definieron alternativas para la elaboración del diseño de la bomba calorimétrica.

## **2.2 Alternativas de diseño**

Se presentó tres diseños como alternativas para poder escoger la opción más viable para la solución de este proyecto.

- Bomba adiabática con agitador mecánico.
- Bomba adiabática con recirculación en envoltura de camisa.
- Bomba isotérmica con recirculación en la envoltura de camisa y en la cubeta.

Con la finalidad de escoger la mejor alternativa, se planteó una matriz de decisión que nos permite analizar cuáles son las variables de mayor importancia y por ende elegir la mejor opción en base a los factores planteados.

## **2.3 Matriz de decisión**

Para realizar la metodología correcta de la matriz de selección primero se definió las variables de decisión.

### **2.3.1 Variables de selección**

A continuación, se presenta las variables más importantes para el diseño de la bomba calorimétrica.

- Camisa de la bomba calorimétrica
- Mecanismo de transferencia de calor
- Costo de materiales y manufactura
- Complejidad del sistema de control

Una vez establecidas las variables, es necesario establecer una ponderación, se realizó el método de comparación por pares para visualizar el peso de una variable con la otra.

**Tabla 2.1.1 Método de comparación por pares**

<b>Variables</b>	<b>Camisa o envoltura de la bomba calorimétrica</b>	<b>Mecanismo de transferencia de calor</b>	<b>Costo de materiales y manufactura</b>	<b>Complejidad del sistema de control</b>	<b>Total</b>
Camisa o envoltura de la bomba calorimétrica		+	+	+	3
Mecanismo de transferencia de calor	+		-	+	2
Costo de materiales y manufactura	+	-		+	2
Complejidad del sistema de control	-	-	+		1
<b>Total</b>					<b>8</b>

En relación con la alternativa de diseño y las variables para realizar matriz, a la variable de selección se les dio una ponderación detallada en la tabla 2.1, la camisa de la bomba calorimétrica tiene mayor peso en relación con las otras, con la finalidad de escoger la mejor solución se estableció valores de importancia a cada variable, tomando el valor de cada variable dividiéndolo para el total para adquirir un valor cuantitativo.

**Tabla 2.2: Ponderación de variables de diseño**

<b>Principales variables de diseño</b>	<b>Ponderación.</b>
Camisa de la bomba calorimétrica	37.5%
Mecanismo de transferencia de calor	25%
Costo de materiales y manufactura	25%
Complejidad del sistema de control	12.5%

Una vez realizado la ponderación de cada una de las variables, procedemos a dar una calificación de las variables con respecto a las alternativas, las calificaciones se la pueden observar en la tabla.

**Tabla 2.3: Calificación para variables**

Buena	Regular	Mala
5	3	1

Con las variables seleccionadas se coloca una calificación a las alternativas de diseño previamente planteadas, consecuentemente se multiplica ese valor con la debida ponderación por el cual se selecciona la mejor alternativa de diseño.

**Tabla 2.4: Matriz de decisión**

Alternativas Variables	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Camisa de la bomba calorimétrica	$4 \cdot 0.375$	$5 \cdot 0.375$	$5 \cdot 0.375$
Mecanismo de transferencia de calor	$5 \cdot 0.25$	$3 \cdot 0.25$	$3 \cdot 0.25$
Costo de materiales y manufactura	$5 \cdot 0.25$	$3 \cdot 0.25$	$3 \cdot 0.25$
Complejidad del sistema de control	$5 \cdot 0.125$	$3 \cdot 0.125$	$2 \cdot 0.125$
<b>Total</b>	<b>4.625</b>	3.75	3.625

Tal como se muestra en la tabla 2.3, la mejor alternativa es el *diseño de bomba calorimétrica con agitador mecánico*.

A partir del resultado de la matriz de decisión, se realizó un diseño de forma de la bomba calorimétrica con agitar mecánico y se definió sus criterios de diseño.

## 2.4 Factores de diseño

Con el fin de realizar un diseño de forma adecuado, se definió ciertas variables o criterios que son importantes al momento de diseñar cualquier sistema o dispositivo.

A continuación, se estableció los criterios para el diseño de la bomba calorimétrica.

- **Mecanismos de transferencia de calor:** La realización de la prueba dentro del calorímetro dependerá del sistema de intercambio de calor entre la chaqueta y los alrededores (el cual deberá disminuir la pérdida de calor hacia el entorno), con la ayuda de un agitador o con recirculación de agua en la camisa para controlar la temperatura.
- **Sistema de Ignición:** está conformado mediante de un cable el cual está conectado a una fuente de voltaje que proporcionará energía necesaria para formar una chispa iniciando el proceso de combustión de la biomasa.
- **Complejidad de sistema de control:** La instrumentación utilizada dependerá del tipo de calorímetro que se desee utilizar, considerando las variables de medición y operación durante la prueba en particular las temperaturas que se generen en todo el sistema.
- **Humedad de biomasa sólida:** Para sistemas de combustión de biomasa sólida es importante conocer el porcentaje de humedad debido a que un gran porcentaje produce una reducción significativa de la eficiencia, al momento de utilizar equipos que utilicen su poder calorífico, además de reducir la temperatura de combustión consecuentemente produciendo una combustión incompleta a altos contenidos de humedad. (Hidalgo, 2012).
- **Capacidad del obús:** El tamaño del obús determina si una bomba es grande, media o pequeña, A continuación, se muestra una tabla una tabla clasificando las bombas según su capacidad.

**Tabla 2.5: Clasificación de bombas según su capacidad (IRAM, 1960)**

<b>Clasificación</b>	<b>Capacidad del obús(ml)</b>
Bombas grandes	500-400
Bombas medianas	400 – 300
Bombas pequeñas	Menor a 300

- **Capacidad de presión en el obús:** para bombas pequeñas que tienen un volumen cercano a 300 ml, la Norma IRAM 17016 establece que se debe trabajar con presiones de entre 5 a 10 kg/cm<sup>2</sup> (IRAM, 1960).
- **Camisa de la bomba calorimétrica:** el recipiente calorimétrico debe estar equipado por una camisa de agua, y el volumen de agua no debe ser menor de 5 la capacidad en litros del obús se debe procurar que la temperatura del agua no difiera de 3°C de la temperatura ambiente (IRAM, 1960).
- **Costos de materiales y manufactura:** el prototipo que se propone debe tener un costo asequible que permita su manufactura en territorio nacional, para su estimación se debe tomar en cuenta las variables de diseño previamente definidas.
- **Tipo de fuente de alimentación de energía:** La fuente de poder debe ser de corriente continua no mayor a 12 volteos (IRAM, 1960).

Con la finalidad de tener una idea más clara del sistema en cuestión y teniendo en cuenta los factores de influencia; se realiza el diseño el diseño de forma general de la bomba calorimétrica.

#### **2.4.1 Diseño de forma**

El diseño de forma de la bomba calorimétrica con agitador mecánico se presenta en la figura 2.2, tiene un corte donde se puede apreciar todos los elementos que contiene el sistema, se compone por una fuente reguladora de voltaje directo conectado a un pulsador, luego se conectan los cables hacia los electrodos para cerrar el circuito y accionar el cable de ignición, además se muestra un tanque de oxígeno que proporciona el gas al obús

con la finalidad de ingresar un exceso de oxígeno para una vez accionado la chispa exista la combustión completa, se busca realizar un diseño cilíndrico debido a que existe mejor transferencia de calor entre la combustión y la cubeta de agua y finalmente se colocara dentro de un aislante para mantener el calor dentro del sistema.

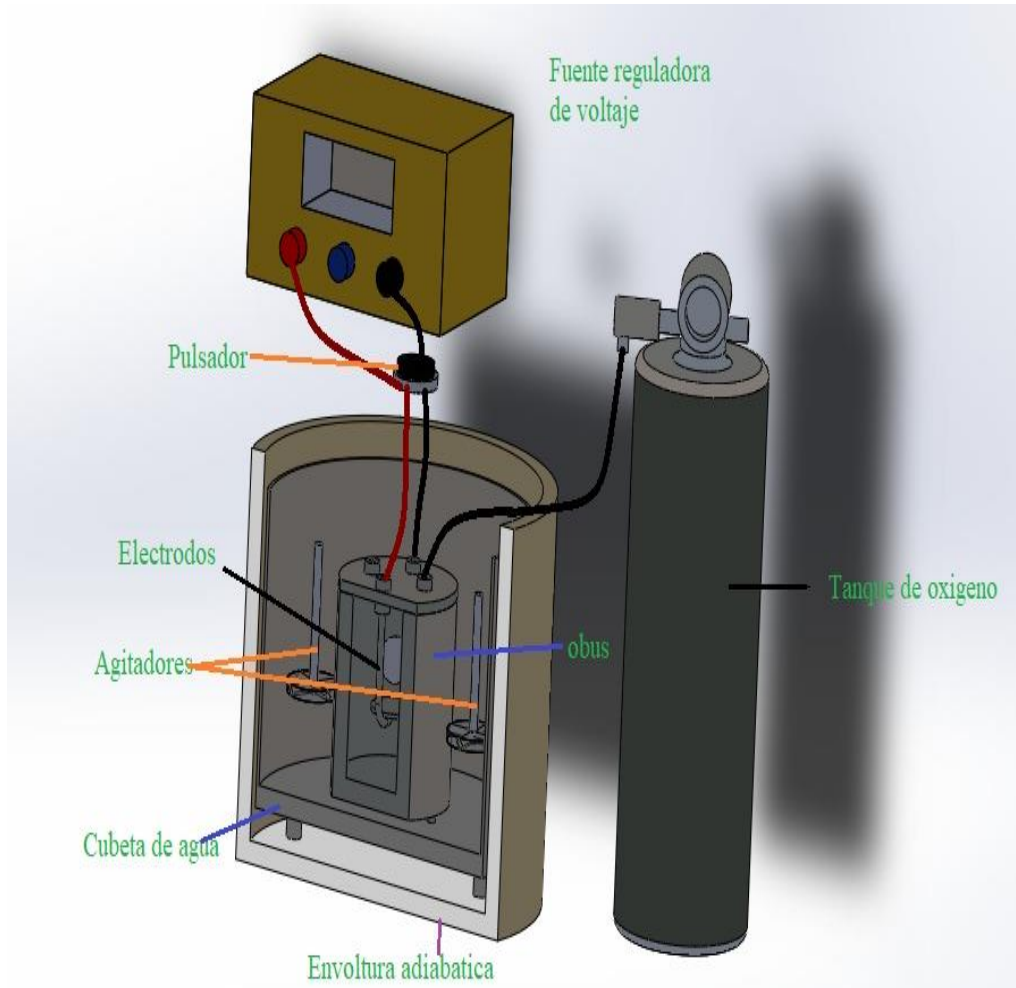


Figura 2.2: Diseño de forma de bomba calorimétrica con agitador mecánico

## 2.5 Diseño detallado

Debe señalarse que, se consideró los siguientes aspectos para el diseño detallado

- Diseño de vaso calorimétrico
- Dimensionamiento de la cubeta y envoltura externa
- Sistema de ignición
- Combustión de la biomasa

Asimismo, se definen parámetros para realizar el diseño, además de las respectivas asunciones para realizar el modelamiento matemático.

### 2.5.1 Parámetros de diseño

- Obús de 250 ml de acero inoxidable
  - Condiciones ambientales al momento de realizar la experimentación.  
 $T_{amb} = 25 [^{\circ}C]$ ,  $P_{atm} = 1 [atm]$ . (IRAM, 1960)
  - Sistema de ignición simple con regulador de voltaje de corriente continua, compuesto de un pulsador y un alambre de nicromo que hace la función de resistencia en el circuito.
  - El alambre de nicromo tendrá un diámetro 0.15 [mm] y 100 [mm] de largo
  - Se mantiene el pulsador 1,5 segundos para generar el efecto joule necesario para realizar la combustión.
  - Exceso de oxígeno para garantizar una combustión completa
  - La muestra de biomasa solida no debe exceder de 1 gramo (IRAM, 1960)
  - La camisa de agua debe tener su equivalente de volumen no menor a 5 veces la capacidad del obús, su temperatura no debe diferir de 3 grados centígrados respecto a la temperatura ambiental
  - Se considera un promedio de las muestras sólidas más utilizadas en el país para los cálculos de diseño de obús.
  - Para que la combustión sea completa la biomasa debe tener una humedad inferior al 15% (Ortega Rodriguez, 2000)
  - Se considera que la transferencia de calor de combustión viaja en dirección radial al cilindro para encontrar las temperaturas de fronteras.
- En relación con los parámetros de diseño, se modela el sistema de ignición para la combustión de las biomásas sólidas.

### 2.6 Sistema de ignición.

El sistema de ignición está formado por un regulador de voltaje de corriente continua, el cual, está conectado a un pulsador que permite el paso de corriente a través de dos electrodos, además se utiliza un alambre de níquel-cromo que tiene un 80% de níquel y 20% cromo; su resistencia a la corrosión es favorable ya que no produce impurezas en la práctica de combustión. De

la ilustración 2.3 se pudo obtener la resistividad y coeficiente de temperatura del material.

### 2.6.1 Resistencia eléctrica

Los cuatro factores importantes de la resistencia de cualquier material son:

- Material
- Longitud
- Área de sección transversal
- Temperatura del material

Material	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Coficiente de temperatura $\alpha [ (^{\circ}C)^{-1} ]$
Plata	$1.59 \times 10^{-8}$	$3.8 \times 10^{-3}$
Cobre	$1.7 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Oro	$2.44 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-3}$
Aluminio	$2.82 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Tungsteno	$5.6 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-3}$
Hierro	$10 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-3}$
Platino	$11 \times 10^{-8}$	$3.92 \times 10^{-3}$
Plomo	$22 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Nicromo <sup>b</sup>	$150 \times 10^{-8}$	$0.4 \times 10^{-3}$
Carbón	$3.5 \times 10^{-5}$	$-0.5 \times 10^{-3}$
Germanio	0.46	$-48 \times 10^{-3}$
Silicio	640	$-75 \times 10^{-3}$
Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$	
Caucho duro	$\approx 10^{13}$	
Azufre	$10^{15}$	
Cuarzo (fundido)	$75 \times 10^{16}$	

Figura 2.3: Resistividad y coeficiente de temperatura (Nilsson & Riedel, 2006)

La resistencia de un alambre depende de los tres primeros factores en la ecuación 2.1: (Nilsson & Riedel, 2006).

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (2.1)$$



$$R = 150 * 10^{-8}[\Omega * m] * \frac{0.1[m]}{\frac{\pi}{4} * (0.15 * 10^{-3}[m])^2}$$

$$R = 6.67[\Omega]$$

Con el fin de presentar un sistema que permita el adecuado funcionamiento del sistema de ignición, se define un sistema de voltaje.

### 2.6.2 Esquema del circuito del sistema de ignición

A continuación, se muestra el esquema eléctrico en la ilustración 2.4 para tener una idea más apropiada de cómo se diseñó el sistema de voltaje.

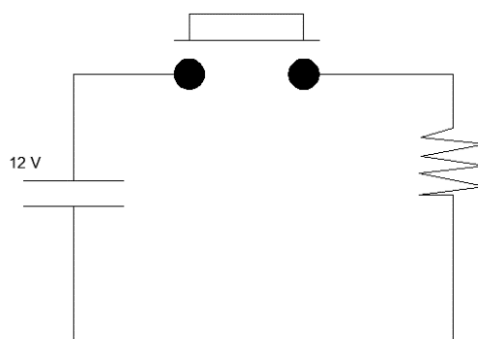


Figura 2.4: Diagrama de circuito eléctrico para sistema de ignición

Se determinó la potencia disipada por el alambre de nicromo, asumiendo como parámetro de diseño que el sistema trabajara con 15 V, mediante la siguiente ecuación:

$$I = V * R \quad (2.2)$$

$$I = 15[v] * 6.67[\Omega] = 2.24 [A]$$

Dado que se está utilizando el efecto joule, la potencia disipada por el resistor se calcula con la siguiente ecuación.

$$P = I * V \quad (2.3)$$

$$P = 2.24[A] * 15[V] = 33.3[W]$$

En relación con el sistema de ignición, se debe conocer el poder calorífico que se genera en la combustión.

## 2.7 Combustión de fuentes biomásicas sólidas.

El poder calorífico de muestras biomásicas difieren debido a su composición química, además otro factor importante que cambia el valor del poder calorífico en una determinada biomasa es la humedad de manera que parte de la energía es utilizada para evaporar el agua encontrado en la muestra.

En la tabla 2.1 se observan valores del poder calorífico superior de diferentes muestras de biomasa sólida más comunes en el país, de tal manera se procedió a utilizar un rango de valores para el diseño del calorímetro, con datos del poder calorífico de muestras de biomasa en el Ecuador.

Para determinar el calor producido por la combustión se utiliza la siguiente ecuación, tomando como referencia una media de los valores obtenidos en la tabla.

$$Q = PC * m \quad (2.4)$$

El tiempo en que el calor sea uniforme en todo el sistema del calorímetro (obús y camisa) es generalmente 5 min, aunque el tiempo en que alcanza su temperatura máxima es un minuto en muchos calorímetros de este tipo.

La transferencia de calor se modela como la cantidad de calor que genera la combustión en un minuto.

$$Q = 18.99 \left[ \frac{MJ}{Kg} \right] * 1 * 10^{-3} [Kg]$$

$$Q = 18.99 [KJ]$$

Dividiendo para un minuto que es donde alcanza la máxima temperatura, tenemos:

$$Q = \frac{18.99}{60} = 317 [W]$$

**Tabla 2.6: Poder calorífico superior de biomásas (Pelaéz Samaniego & Espinoza Abad, 2015)**

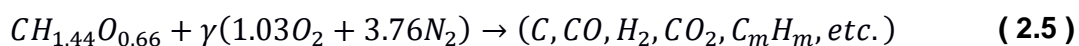
Muestras	Poder calorífico superior [MJ/Kg]
Paja de la caña de azúcar	17.74
Bagazo de la caña de azúcar	18.99
Cascara de café	17-18
Madera	14
Cascarilla de arroz	15.64

La combustión de biomasa se la puede representar empíricamente por balance estequiométrico que representa los reactivos y los productos después de la reacción.

### 2.7.1 Balance estequiométrico de la combustión de biomasa

La ecuación estequiométrica de una combustión de biomasa puede ser una expresión aproximada que simula los productos derivados de la combustión (Jenkins, Baxter, & Miles Jr, 1998).

La siguiente ecuación es típica de la biomasa, tomando en cuenta el constituyente primario de la biomasa que son los elementos de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N). Los componentes secundarios del combustible como sodio (Na), potasio (K), cloro (Cl), entre otros; no son considerados (Nussbaumer, 2003).

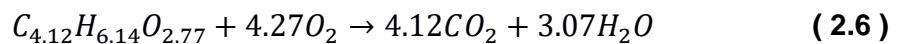


En la ecuación estequiométrica se puede observar los productos más comunes para la combustión de la biomasa. El término  $CH_{1.44}O_{0.66}$  describe

la composición promedio de algunos tipos de biomasa que usa en combustión, por ejemplo, madera, paja, entre otros similares.

La expresión lambda “ $\gamma$ ” expresa la cantidad de exceso de oxidante que tiene la combustión, ya que para para obtener una combustión completa debe estar balanceada o debe tener un exceso de oxígeno, o en el caso de la ecuación anterior aire en exceso.

Por otro lado, tenemos el bagazo de caña de azúcar, un recurso energético muy común en el país, el cual el bagazo seco tiene una composición de 50% de celulosa, 30% de hemicelulosas y 20% de lignina (Mesa & González, 2003). De esta composición elemental se obtiene la siguiente la siguiente fórmula empírica:



En definitiva, se debe procurar que la cantidad de oxígeno sea la necesaria, en términos estequiométricos, o que en el mejor de los casos tenga un exceso. La cantidad de oxígeno que se debe agregar respecto a la cantidad de biomasa a combustionar se puede obtener a partir de la presión y temperatura a la que está el Obús.

### 2.7.2 Cantidad de oxígeno agregado en la combustión

En los parámetros de diseño se estableció de se debe suministrar de 5 a 10 kg/cm<sup>2</sup>, además de que se debe realizar la experimentación a temperatura ambiental, que se definió como 25 ° C.

Para realizar este cálculo se toma el oxígeno como un gas ideal, el cual debe cumplir la relación de la ecuación del gas ideal (Cengel Y., 2015).

$$PV = nRT \quad (2.7)$$

Donde P es la presión absoluta, T es la temperatura absoluta, R es la constante de los gases ideales y n es el número de moles del gas.

Tomamos la presión de 10 kg/cm<sup>2</sup> para este cálculo, además debe aumentar la presión atmosférica ya que esta presión es manométrica. El volumen del recipiente de combustión es de 250 ml.

El número de moles se define como la masa de la muestra respecto a la masa molecular del gas.

$$n = M/M_u \quad (2.8)$$

Donde la masa molecular del oxígeno molecular es 32 u. uniendo las ecuaciones tenemos la siguiente ecuación:

$$PV = \left(\frac{M}{M_u}\right) RT \quad (2.9)$$

Para un gramo de muestra tenemos el siguiente resultado.

$$\left(1.082 * 10^6 \left[\frac{Kg}{cm^2}\right]\right) (0.00025[m^3]) = \left(\frac{M_{O_2}}{16 \left[\frac{g}{mol}\right]}\right) \left(8.31 \left[\frac{J}{mol * K}\right]\right) (298[K])$$

$$M_{O_2} = 1.74[g]$$

En resumen, con la presión suministrada se está aplicando 1.74 gramos de oxígeno, el cual excede estequiométricamente las ecuaciones de combustión escrita anteriormente, entonces se puede establecer que se tiene combustión completa.

## 2.8 Diseño del obús.

Como se había dicho, se toma en consideración la bomba pequeña que tiene un volumen menor a 300 ml tal como lo indica la norma IRAM, así mismo se tiene una sugerencia de presión en el obús relacionado con la combustión de la madera, el cual se debe ingresar oxígeno hasta llegar a una presión de 5 a 10 [kg/cm<sup>2</sup>], aunque la norma IRAM 17016 indica que se debe tener una

presión de 30 atm para bombas con un volumen inferior a 300 ml además, es importante usar un material adecuado como acero inoxidable debido a que al momento de realizar la reacción afectará la vida útil del obús utilizado debido a que un alto porcentaje de ceniza involucra efectos corrosivos en los materiales, por lo tanto, el contenido de cenizas en la biomasa se utiliza como parámetro de diseño en las cámaras de combustión.

La principal función del obús es transmitir la mayor cantidad de calor posible a la camisa, por eso el alto valor de conducción del material, además debe soportar los esfuerzos internos presentes dentro del mismo, se realiza el análisis modelándolo como un cilindro de pared delgada.

En el diseño de cilindros de pared delgada se tiene dos esfuerzos principales provocadas por la presión en el interior del recipiente, está el esfuerzo tangencial al cilindro y el esfuerzo longitudinal del mismo.

Para considerar un cilindro de pared delgada la relación D/t debe ser mayor a 10.

$$\sigma_2 = \frac{PD}{2t} \quad (2.10)$$

$$\sigma_2 = \frac{980[KPa]}{2} * 10 = 4900[Kpa]$$

$$\sigma_1 = \frac{PD}{t} \quad (2.11)$$

$$\sigma_1 = 980[KPa] * 10 = 9800[Kpa]$$

El esfuerzo de fluencia para el acero inoxidable es de 250[MPa] por tanto el material soportara la presión ingresada dentro del obús.

Tomando como espesor 7[mm] y un diámetro de 80[mm] se cumple la relación dando como valor:

$$r = \frac{D_{obús}}{t} \quad (2.12)$$

$$r = \frac{80}{7} = 11.43$$

Realizando el recalcu de los esfuerzos se obtiene.

$$\sigma_2 = \frac{980[KPa]}{2} * 11.43 = 5600[KPa]$$

$$\sigma_1 = 980[KPa] * 11.43 = 11201.4[KPa]$$

## 2.9 Sistema de agitación

La agitación del fluido dentro del calorímetro tiene como función promocionar la transferencia de calor del fluido y el obús, se estableció el volumen de agua requerido tomando como sugerencia la norma IRAM 17016 que indica que debe ser al menos 5 veces la capacidad del obús por ende se obtiene:

$$V_{requerido} = 5 * V_{obús} \tag{2.13}$$

$$V_{requerido} = 5 * 250[ml] = 1250[ml]$$

Entre uno de los factores más importantes a la hora de seleccionar el equipo de agitación es necesario visualizar el rango de viscosidad en el que se está operando tal como se visualiza en la siguiente tabla.

**Tabla 2.7: Sistemas de agitación (Geankpolis, 2006)**

Agitador	Velocidad de rotación [rpm]	Viscosidad [Pa*s]	Flujo
Hélice 3 aspas	400-1750	< 3	Axial
paletas	20-200	50-500	Radial
Compuerta	50-500	50-1000	radial
Turbina de aspas planas	30-100	< 100	
Turbina de aspas inclinadas	30-500		Axial y radial
Helicoidal		500-1000	

El fluido a utilizar es agua, por lo cual el sistema de agitación a utilizar será la opción de hélice con 3 aspas o la turbina de aspas planas, debido a que se requiere un flujo radial se puede optar por la turbina de aspas planas a 45 grados debido a que se aprovecharía el movimiento del fluido para contar con mayor transferencia de calor entre el obús y la cubeta de agua.

### 2.10 Diseño de la envoltura adiabática.

En la figura 2.5 se observa la geometría cilíndrica de la bomba calorimétrica que se está realizando, es decir la transferencia de calor en este se asemeja de manera radial, debido a que el obús es un recipiente cilíndrico.

Las siguientes ecuaciones representa la conducción de calor en un cilindro, con sus respectivas resistencias térmicas en conducción el cual representa la transferencia de calor del obús y la envoltura adiabática y la convección representada por la transferencia de calor del fluido en este caso el agua con el obús y el aire con el ambiente.

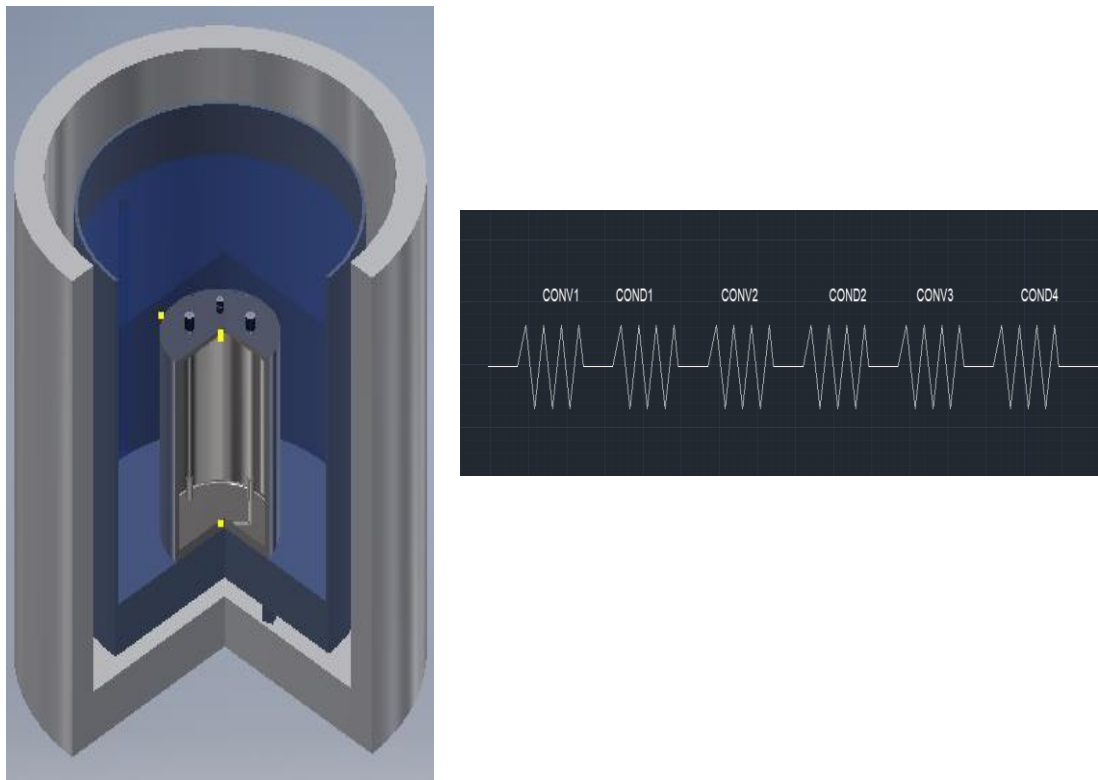


Figura 2.5: Diagrama de Resistencias de calor

$$\dot{Q} = -K(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.14)$$



$$R_{t,cond1} = \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} \quad (2.15)$$

$$R_{t,conv} = \frac{1}{2\pi r_3 h_{1L}} \quad (2.16)$$

Con respecto al volumen escogido para el obús, siguiendo las indicaciones de la norma IRAM 17016, se realizó el dimensionamiento del obús y de los demás componentes del sistema, de esta manera se puede obtener el flujo de calor que pasa a través de todo el circuito para luego encontrar el radio crítico donde el sistema alcanza la condición adiabática tomando como referencia la temperatura máxima en la que se encuentra el recipiente de combustión en el momento de la experimentación, los cálculos respectivos se mostrarán en la sección de cálculos.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

El objetivo principal de este apartado es presentar los resultados obtenidos del diseño del dispositivo de medición de poder calorífico de biomasa sólida. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la metodología propuesta en el capítulo 2, además de la selección de los materiales, el sistema de medición de temperatura y los costos de diseño y de los componentes que necesitará el sistema.

### 3.1 Resultados teóricos

El análisis de diseño del calorímetro predomina en la primera ley de la termodinámica, acorde con esta ley se realiza el análisis de la experimentación de la medición de poder calorífico superior de la muestra.

#### 3.1.1 Método práctico para obtener el poder calorífico de la biomasa

Con respecto al diseño de forma mostrado en el capítulo 2, tanto el recipiente de combustión y la camisa de agua constituyen su sistema adiabático. Por lo tanto, es posible establecer el siguiente balance de energía.

$$Q_{\text{absorbido}} = Q_{\text{desarrollado}} \quad (3.1)$$

Donde el  $Q_{\text{desarrollado}}$  está formado por el calor de combustión de la muestra de biomasa, y el calor generado por el alambre de nicromo para llegar a la temperatura de ignición de la muestra, mientras que el  $Q_{\text{absorbido}}$  consideran los componentes del calorímetro que reciben la energía calorífica en el sistema, como lo son el agitador, sensor de temperatura, obús, y el balde; se presenta

$$\begin{aligned} m_{\text{muestra}}\Delta U_{\text{muestra}} + m_{\text{nicromo}}\Delta U_{\text{nicromo}} \\ = Q_{\text{agua}} + Q_{\text{agitador}} + Q_{\text{termometro}} + Q_{\text{bomba}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

El calor absorbido de los diferentes componentes se puede calcular con la ecuación 3.3:

$$Q = m * Cp * \Delta T \quad (3.3)$$

Donde se puede calcular para los diferentes componentes que componen el dispositivo, reemplazando la ecuación 3.3 en la 3.2 tenemos el siguiente balance energético.

$$m_{muest} \Delta U_{muest} + m_{nicro} \Delta U_{nicro} = \Delta T [(m * Cp)_{H_2O} + (m * Cp)_{agi} + (m * Cp)_{termo} + (m * CP)_{bomba}] \quad (3.4)$$

La variación de temperatura en el sistema indicará cuanto calor fue transferido en los componentes del dispositivo desde el inicio de la experimentación hasta llegar al equilibrio térmico, para así encontrar el poder calorífico de la muestra.

$$\Delta T = \frac{m_{muest} \Delta U_{muest} + m_{nicro} \Delta U_{nicro}}{(m * Cp)_{H_2O} + (m * Cp)_{agi} + (m * Cp)_{termo} + (m * CP)_{bomba}} \quad (3.5)$$

Con el fin de validar los resultados teóricos, se realizó un análisis computacional de la combustión realizada en el obús y la transferencia de calor hacia sus otros componentes.

Para el desarrollo de la ecuación 3.5 se necesitó el dato de cuanto calor generado para la ignición de la biomasa, con el resultado de la ecuación 2.2 y con un tiempo de 2.10 segundos para permitir el paso de la corriente tenemos.

$$E = m_{nicro} \Delta U_{nicro}$$

$$E = I * V * t$$

$$E = 33.3 * 2.10$$

$$E = 69.9 [J]$$

Con esta cantidad de energía el alambre de nicromo trabajará a su punto máximo, provocando que esté al rojo vivo

Los datos para la resolución de la ecuación 3.5 se encuentra en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1: Propiedades de los materiales**

Dato	Valor
<b>Aguaw</b>	
Calor específico del agua	4.18 $\left[ \frac{KJ}{Kg * k} \right]$
Volumen de agua	200 [ml]
<b>Sensor</b>	
Diámetro	$0.6 * 10^{-2} [m]$
Longitud	$3.5 * 10^{-2} [m]$
Material	Acero inoxidable
Calor específico del acero	510 $\left[ \frac{J}{Kg * K} \right]$
<b>Alambre de nicromo</b>	
Densidad	$8.4 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$
Temperatura máxima de operación	1200 °C

Reemplazando y encontrando las masas de los diferentes componentes en la ecuación 3.5 se obtiene:

$$\Delta T = \frac{m_{muest} \Delta U_{muest} + m_{nicro} \Delta U_{nicro}}{(m * Cp)_{H_2O} + (m * Cp)_{agi} + (m * Cp)_{termo} + (m * CP)_{bomba}} \quad (3.6)$$

$$\Delta T = 2.04$$

El cambio de temperatura en equilibrio térmico es el dato con el cual se pone la restricción al momento de realizar la simulación, pues se procurará de llegar a este cambio en la camisa de agua.

### 3.1.2 Cálculo de temperatura de las superficies

Se realiza un análisis de resistencias para visualizar la distribución de temperaturas del sistema para luego determinar los puntos de estudio importantes.

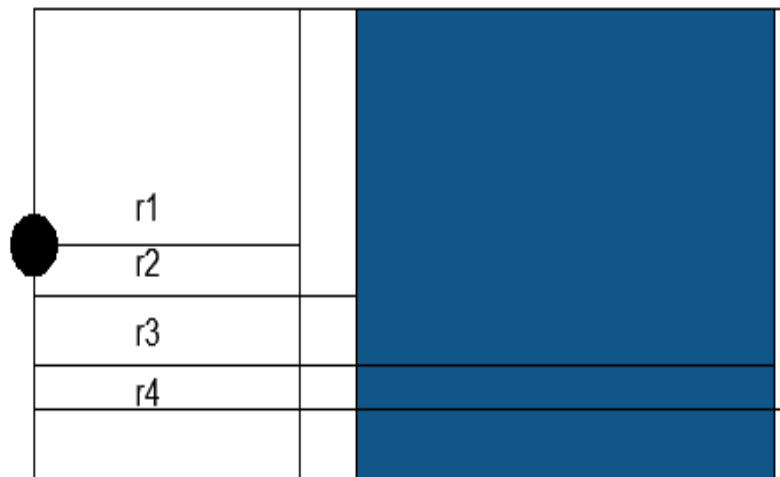


Figura 3.1: Resistencias térmicas

Se establece la siguiente ecuación donde se determinará la transferencia de calor alrededor del sistema sin aislamiento.

$$Q = \frac{T - T_b}{\frac{1}{2\pi * r_1 * L * h_{rad}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * K_{ob} * L_1} + \frac{1}{2\pi * r_3 * L * h_{conv}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_4}\right)}{2 * \pi * k_{cubeta} * L_3}} \quad (3.7)$$

### Recipientes de agitación.

En sistemas con agitación para determinar la presencia de turbulencia se relaciona con el número de Reynolds del impulsor.

$$N_{RE} = \frac{D_a^2 * N * \rho}{\mu} \quad (3.8)$$

Donde  $D_a$  es el diámetro del agitador,  $N$  la velocidad de rotación en rev/s,  $\rho$  es la densidad del fluido en  $\text{kg/m}^3$  y  $\mu$  es la viscosidad en  $\text{kg/m}$ .

Se definió el dimensionamiento de cada uno de los componentes del calorímetro en base a la norma por el cual se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 3.2: Dimensiones del sistema**

Componente	Diámetro interno [mm]	Diámetro externo [mm]	K [W/m²K]
Obús	66	80	18
cubeta	180	184	18
aislamiento	190	210	0.121

Es necesario conocer el valor del coeficiente convectivo para un sistema con agitador encamisado de tal manera que se utiliza la siguiente correlación.

$$h_f = \frac{k_{agua}}{D_e} * \left[ 0.027 * (N_{Re})^{0.66} * \left( \frac{C_p \mu}{k_{ag}} \right)^{0.33} * \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \right] \quad (3.9)$$

Se realiza una estimación de la temperatura del agua a 460K tomando un promedio la temperatura externa y la interna, para luego realizar las iteraciones correspondientes en Excel, tomando una velocidad de reacción de 0.02 [m/s] se obtiene.

$$h_f = \frac{0.613}{0.104} * \left[ 0.027 * \left( \frac{0.02 * 0.104 * 997}{855 * 10^{-6}} \right)^{0.66} * \left( \frac{4190 * 855 * 10^{-6}}{0.613} \right)^{0.33} * \left( \frac{855}{135} \right)^{0.14} \right]$$

$$h_f = 62.8 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Se determina el valor del  $h_{rad}$ , realizando una estimación de la temperatura al interior del obús tomando un promedio de la temperatura de auto ignición y la ambiente, luego se realizará un recalcu para determinar las temperaturas reales.

$$h_{rad} = \sigma * \varepsilon * (T_{autoignicion} - T_{prom}) \quad (3.10)$$

$$h_{rad} = 5.67x10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right] x 0.9x(800[K] + 500[K])(800^2[K] + 500^2[K])$$

$$h_{rad} = 59.04 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

Se determina el valor de las resistencias:

$$R_{rad} = \frac{1}{2\pi * 0.033[m] * 0.09[m] * 59.04 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]} = 0.91 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{80}{66}\right)}{2\pi * 18 \left[ \frac{W}{m * K} \right] * 0.09[m]} = 0.028 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi * 0.104[m] * 0.1[m] * 62.4 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]} = 0.49 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{184}{180}\right)}{2\pi * 18 \left[ \frac{W}{m * K} \right] * 0.160[m]} = 1.21 \times 10^{-3} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Se determina el valor del  $h_{rad}$ , realizando una estimación de la temperatura al interior del obús tomando un promedio de la temperatura de auto ignición y la ambiente, luego se realizará un recalcu para determinar las temperaturas reales.

$$h_{rad} = \sigma * \varepsilon * (T_{autoignicion} - T_{prom}) \quad (3.11)$$

$$h_{rad} = 5.67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right] \times 0.9 \times (800[K] + 500[K]) (800^2[K] + 500^2[K])$$

$$h_{rad} = 59.04 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

Se determina el valor de las resistencias:

$$R_{rad} = \frac{1}{2\pi * 0.033[m] * 0.09[m] * 59.04 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]} = 0.91 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{80}{66}\right)}{2\pi * 18 \left[ \frac{W}{m * K} \right] * 0.09[m]} = 0.028 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi * 0.104[m] * 0.1[m] * 62.4 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]} = 0.49 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{184}{180}\right)}{2\pi * 18 \left[ \frac{W}{m * K} \right] * 0.160[m]} = 1.21 \times 10^{-3} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Reemplazando:

$$Q = \frac{(800 - 293)[K]}{0.91 + 0.028 + 0.49 + 1.21 \times 10^{-3} \left[ \frac{W}{K} \right]} = 351.24[W]$$

Se determina la temperatura de cada punto realizando un balance entre las resistencias.

$$351.24 = \frac{800 - T_1}{R_{rad}}$$

$$351.24 * 0.91 = \frac{800 - T_1}{1}$$

$$T_{in\ obus} = 478.04[K]$$

Siguiendo la misma metodología se obtuvo los resultados que se muestran en la tabla.



**Tabla 3.3: Resultados teóricos**

Puntos de análisis	Temperatura [K]
Externo del obús	525
Agua	300
Externo de la cubeta	298

### 3.2 Análisis computacional

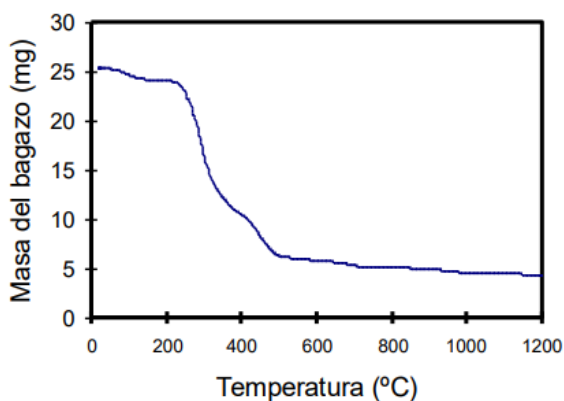
Se usó un recurso computacional que analiza procesos o sistemas de manera muy precisa por métodos de elementos finitos, con el fin de obtener soluciones muy aproximadas optimizando tiempo de diseño y costos.

Se define los parámetros iniciales que se utilizó para realizar la simulación en el programa SolidWorks en el complemento de simulación de flujos.

Uno de los parámetros más importantes para la simulación de fluidos en el programa computacional es definir que temperatura tendrá la biomasa en la simulación de combustión.

#### 3.2.1 Temperatura de combustión

En el capítulo 2 se usó el bagazo de caña de azúcar como ejemplo para realizar el dimensionamiento del diseño, así que se tiene la temperatura la que estará el recipiente en la simulación depende de esta biomasa, en la figura 3.1 podemos observar la variación de la temperatura del bagazo al someterlo a una atmósfera oxidante.



**Figura 3.2: Análisis del bagazo en atmósfera oxidante (Antolín & Oliva, 2002)**

Con el objetivo de realizar un diseño que no tenga fallas en su obús, se escogió una temperatura promedio desde la ignición hasta el final de la experimentación de 612 grados centígrados.

Se realizó los cálculos para encontrar las temperaturas teóricas en la parte interna del obús donde ocurre el caso crítico y afuera de la cubeta donde se espera que la temperatura sea la del ambiente.

### 3.2.2 Parámetros de simulación

Para esta simulación se realizó ciertas asunciones y parámetros para asemejar la combustión de biomasa en el programa computacional, en la tabla 3.1 se muestra los parámetros para este diseño.

**Tabla 3.4: Parámetros para la simulación de flujo**

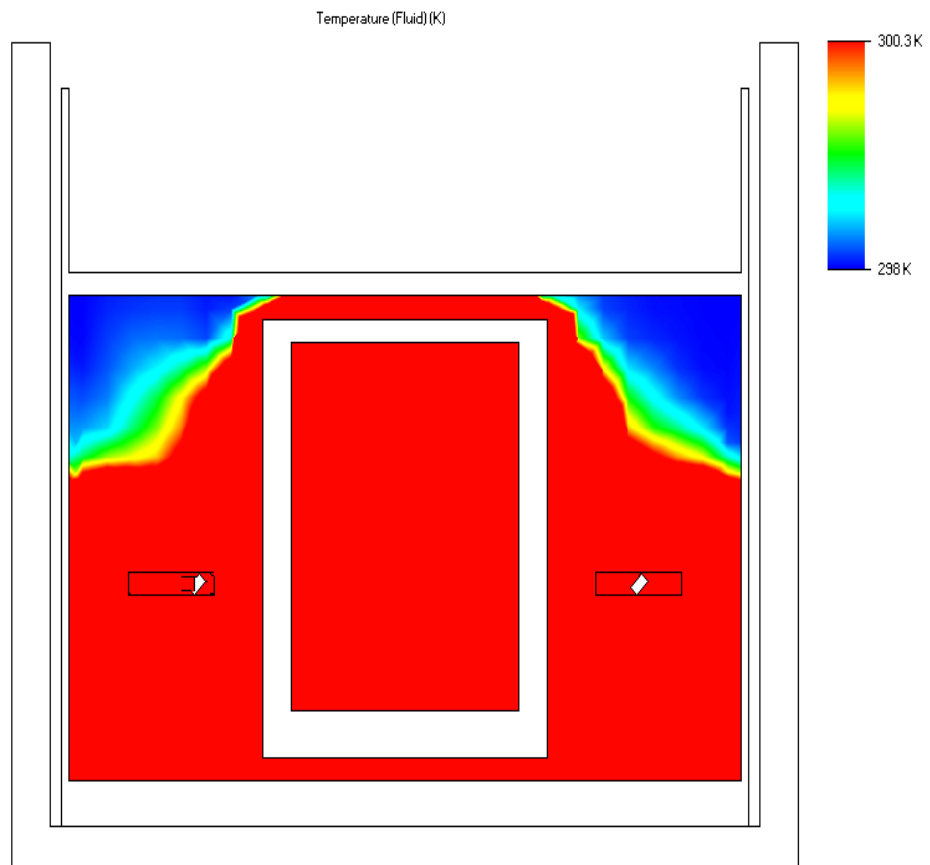
Parámetros	Valores
Temperatura de la biomasa en la combustión	800 k
Fluido a utilizar en el recipiente del obús	Mezcla de aire con dióxido de carbono
Velocidad del fluido en el obús	0.01 [m/s]
Emisividad	0.9
Material de la esfera	Carbón
Volumen de camisa	1900 ml
Velocidad de los agitadores	600 rpm
Material del obús	Acero inoxidable
Material de la cubeta	Acero inoxidable

### 3.2.3 Simulación CFD

Con relación a los parámetros enunciados en la tabla 3.4, se tiene los resultados de la simulación en base a la distribución de la energía en la camisa de agua, la figura 3.3 muestra el esquema del resultado de la simulación.

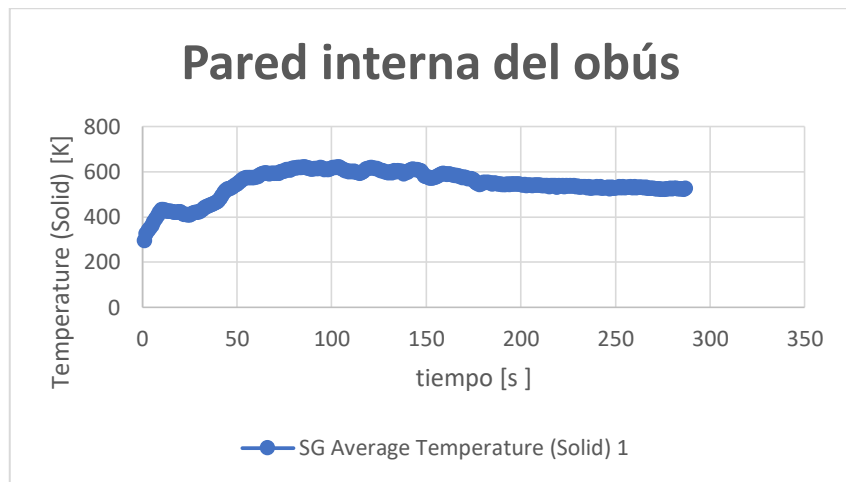
Con la ayuda de los dos agitadores que cumplen la función de distribuir la temperatura uniformemente, se obtuvo un resultado de una diferencia de temperatura de 3.35 °C promedio en el fluido de la cubeta, con una diferencia aceptable comparado con el resultado de la ecuación 3.5. Cabe recalcar que en la simulación de fluido se está trabajando con una temperatura constante desde donde se realiza la combustión de biomasa, por lo tanto, el programa arroja resultados en estado estable.

Por esta razón es complicado distribuir la temperatura uniformemente en la camisa, aunque se puede obtener una aproximación muy buena. Con el objetivo de diseñar el dispositivo de tal manera que soporte las altas temperatura de operación se analiza la pared interior del obús, ya que es la superficie que está expuesta a la temperatura más crítica, así mismo es importante recalcar que la simulación se realizó en un tiempo físico de 300 segundos, que es equivalente a 5 minutos.



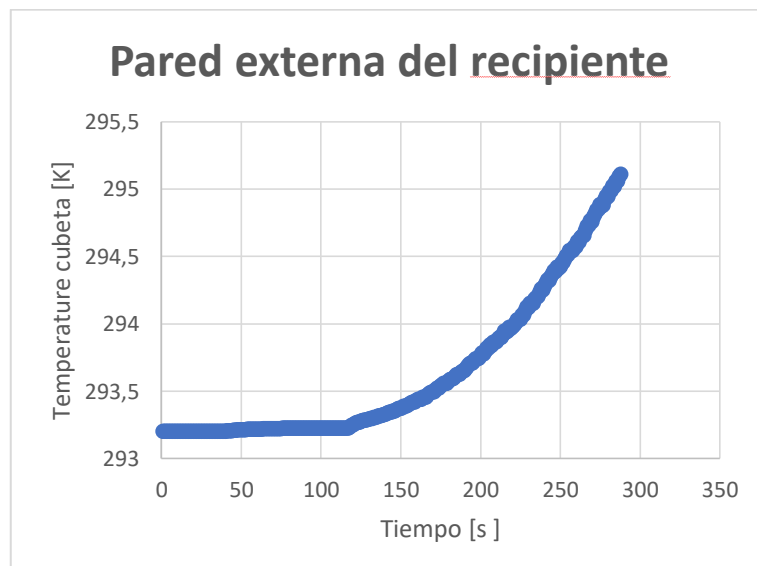
**Figura 3.3: Distribución de temperatura en la camisa**

Uno de los objetivos de este proyecto es diseñar el obús de tal manera que no falle por una elevada temperatura que degrade el recipiente en el momento de la experimentación, se presenta una gráfica donde la temperatura del obús no llega a más de 650 k que es permitido en el rango de trabajo para este material. En la gráfica 3.1 se muestra la temperatura en función del tiempo.



Gráfica 3.1: Temperatura interna en el obús en función del tiempo

Con el fin de que se mantenga un sistema adiabático se coloca un recipiente aislante en el exterior, ya que el objetivo es que el calor no se transfiera con el exterior. La gráfica 3.2 muestra la temperatura al exterior del recipiente en función del tiempo.



Gráfica 3.2: Temperatura externa en aislamiento

La temperatura promedio que alcanza el aislamiento es de 295 k, lo cual es aceptable debido a que se está analizando el caso más crítico en el proceso de combustión de la biomasa.

### 3.3 Validación de resultados

Se realizaron las simulaciones respectivas para valores de 800, 900 y 1000[K], además de realizar iteraciones en el programa de Excel mostrando los valores reales con los simulados de diferentes puntos mostrados en las siguientes tablas:

**Tabla 3.5: Resultados a temperatura de 800k**

Simulación [K]	Calculado [K]	Punto de inspección
530	525	Obús interno
300	300	Agua
298	298	Cubeta externa

**Tabla 3.6: Resultados a temperatura de 900k**

Simulación [K]	Calculado [K]	Punto de inspección
576.88	578	Obús interno
300	299	Agua
299	297	Cubeta externa

**Tabla 3.7: Resultados a temperatura de 1000k**

Simulación [K]	Calculado [K]	Punto de inspección
617	616.92	Obús interno
300	305	Agua
298	298	Cubeta externa

#### Cálculo del BIAS y el RSME

Se realizó el cálculo del BIAS y el RSME para los valores a 800K determinar la diferencia entre el valor esperado y el valor simulado además de determinar

si se sobrestimo o se subestimo los datos encontrados de manera experimental bajo las asunciones realizadas.

$$\sum \frac{v_T - v_E}{n} = \frac{(525 - 530) + (300 - 298) + (298 - 298)}{3} = 1.6$$

$$\sum \sqrt{\frac{(v_T - v_E)^2}{n}} = \sqrt{\frac{(3)^2}{3}} = 1.5$$

Luego se realizó la siguiente tabla mostrando los valores de cada punto a las diferentes temperaturas.

**Tabla 3.8: Resultados de la estimación de error**

BIAS	RMSE	Temperatura de análisis
1.6	2.8	800K
1.7	1.08	900K
2.02	1.6	1000K

### 3.4 Sistema de medición de temperatura

El sistema de medición de temperatura en la camisa del calorímetro conforma los siguientes componentes:

- Placa electrónica
- Resistencia
- Medidor de temperatura en ambiente hostiles
- Placa de pruebas
- Cables
- Computador

#### 3.4.1 Placa electrónica

Para este proyecto se recomienda la placa Arduino UNO, que es una plataforma de desarrollo basado en una placa electrónica de hardware libre que contiene un microcontrolador y una serie de pines hembras, los cuales

permiten las conexiones entre el microcontrolador con los actuadores y sensores. (Arduino, 2018).

En la figura 3.4 se muestra el tipo de Arduino UNO que se va a utilizar.

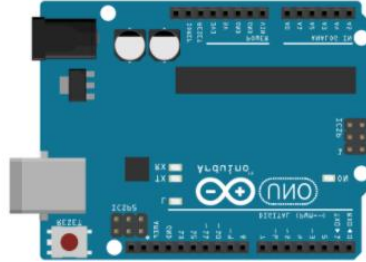


Figura 3.4: Arduino UNO

Con el objetivo de realización una correcta medición de la temperatura en la camisa se recomienda que el sensor de temperatura sea DS18B20.

### 3.4.2 Medidor de temperatura

A continuación, se detalla el tipo de sensor que se utilizó dentro del diseño sistema, se definió que este dispositivo debe tomar datos con una resolución de no más de 0.08 grados centígrados, además debe medir temperaturas por lo menos en el rango de 0 a 50 °C.

En definitiva, se escogió un dispositivo que por lo menos cumpla con las restricciones anteriormente planteadas. El sensor de temperatura DS18B20 es ideal para medir temperatura en ambientes hostiles como líquidos, se detalla en la figura 3.5, además cumple con el rango específica y tiene un error bajo.



Figura 3.5: Sensor de temperatura DS18B20

En la tabla 3.9 se presenta las características técnicas principales del sensor de temperatura para líquidos, más detalle se presenta en el anexo.

**Tabla 3.9: Características de sensor DS18B20  
(Product, 2019)**

Características	Valor
Voltaje de alimentación	3V a 5.5V
Rango de temperaturas	-55 °C a 125 °C
Error (-10 °C a 85°C)	± 0.5 °C
Resolución programable	9-bit, 10-bit, 11-bit, 12-bit (default)

Con el fin de obtener una resolución no mayor a 0.08 °C, se selecciona la resolución de 12-bit, esta resolución está programado por defecto en el sensor, que tiene una resolución de 0.0625 °C. Como se muestra en la tabla 3.10.

**Tabla 3.10: Resolución del sensor de temperatura  
(Product, 2019)**

Resolución	Temperatura
9-bit	0.5 °C
10-bit	0.25 °C
11-bit	0.125 °C
12-bit	0.0625 °C

Este dispositivo tiene un impermeable que protege el sensor, además de tener un largo alcance debido a que el cable tiene una longitud de un metro. Para seleccionar la resistencia que va en el circuito del sistema se tiene que tomar en consideración el largo del cable del sensor.

### 3.4.3 Resistencia eléctrica

En la tabla 3.11 se presenta el valor de las resistencias que se debe usar según la distancia del cable que tiene el sensor.



**Tabla 3.11: Resistencia respecto a la distancia del cable**

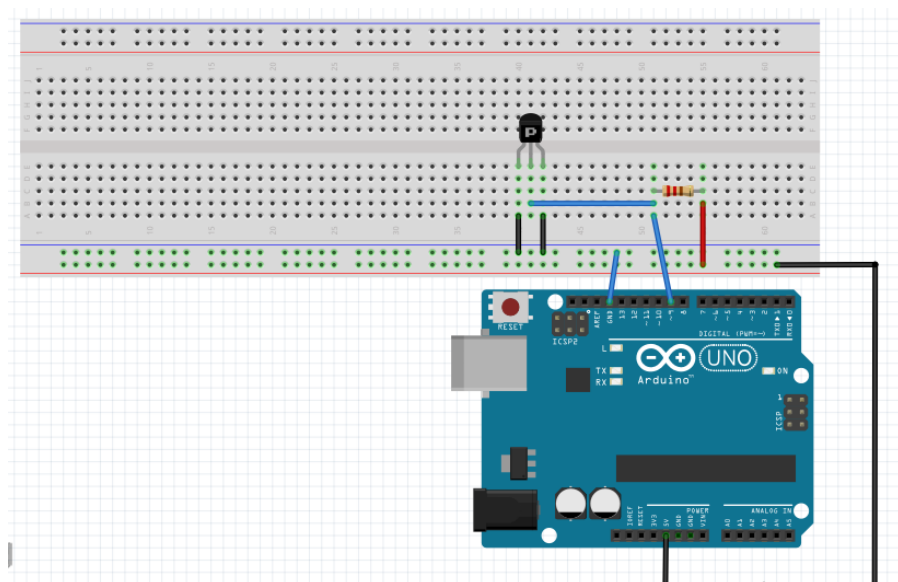
Resistencia	Distancia del cable (m)
4,7 k $\Omega$	De 0 m a 5 m
3,3 k $\Omega$	De 5 m a 10 m
2,2 k $\Omega$	De 10 m a 20 m
1,2 k $\Omega$	De 20 m a 50 m

En conclusión, la resistencia seleccionada será de 4.7 kilo-ohmios. Dado que se ha detallado los componentes principales para el sistema de control, se desarrolló el circuito completo para realizar la toma de datos de temperatura.

### 3.4.4 Circuito del sistema de control

Es importante mencionar, que dentro de la implementación será necesario una placa de pruebas y cables (jumpers) para realizar las conexiones. A continuación, en la figura 3.6 se presenta el circuito final.

Conforme con el sistema planteado anteriormente, se realizó una simulación gráfica digital del circuito terminado, este proyecto se realizó en el programa Fritzing que es un software que nos permite simular circuitos eléctricos y electrónicos.



**Figura 3.6: Sistema de control de toma de datos**

Además, de la realización del circuito se realizó un código de programación para la toma de datos de temperatura, esto se realizó en el programa Arduino que se muestra en la figura 3.7.



```
sketch_jan05a Arduino 1.8.9
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_jan05a $
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
const int pinDatosDQ = 9;

// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);

void setup() {
  // Iniciamos la comunicación serie
  Serial.begin(9600);
  // Iniciamos el bus 1-Wire
  sensorDS18B20.begin();
}

void loop() {
  // Mandamos comandos para toma de temperatura a los sensores
  Serial.println("Mandando comandos a los sensores");
  sensorDS18B20.requestTemperatures();

  // Leemos y mostramos los datos de los sensores DS18B20
  Serial.print("Temperatura sensor : ");
  Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
  Serial.println(" C");

  delay(1000);
}
```

Figura 3.7: Código del sistema de control

Para la verificación del código es necesario, previo a su ejecución, la revisión de todos sus componentes y conexiones del sistema, con el fin de evitar un daño por corto circuito en los cualquiera de los componentes electricos. Si todo funciona de manera correcta en el computador deberá aparecer una ventana con las temperaturas tomadas con un intervalo de un segundo, como se muestra en la figura 3.8.

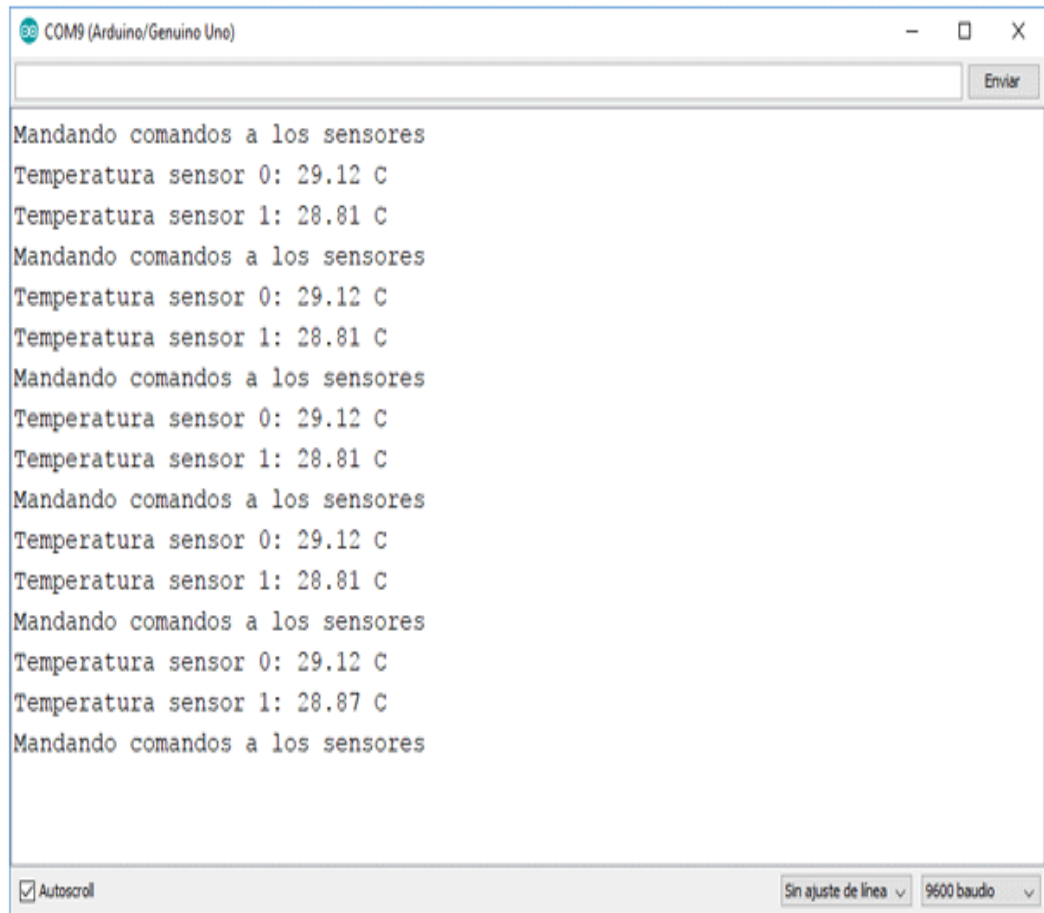


Figura 3.8: Ejemplo de la ejecución del código del sistema de medición

### 3.5 Costos

La inversión que tiene el equipo se divide en tres componentes en los costos de materiales, costos de manufactura, costos de diseño del equipo y por último costos de complementos para el correcto funcionamiento del equipo y para establecer parámetros de seguridad.

#### 3.5.1 Costo de diseño

Los costos de diseño se presentan a continuación en la tabla 3.12.

Tabla 3.12: Costos de diseño

Diseñador	Costo
Zinedine Almache	\$ 150,00
Axel Laínez	\$ 150,00
<b>Total</b>	<b>\$ 300,00</b>

### 3.5.2 Costos de materiales

Los costos de materiales y manufactura se presentan en la tabla 3.8.

**Tabla 3.13: Costos de materiales del sistema**

Denominación	Unidad	Cantidad	Precio U	Precio T.
Lámina de hacer inoxidable pulida 3 mm, 1.22 m x 2.44 m	U	1	\$ 170.40	\$ 170.40
Válvula de purga	U	1	\$ 5	\$ 5
O-ring	U	5	\$ 3	\$ 15
Fibra de vidrio	Kg	3	\$ 1.5	\$ 4.5
Agitadores de acero inoxidable	U	2	\$ 250	\$ 500
Fuente regulable 0 – 30v	U	1	\$ 120	\$ 120
Cables de 15V	U	2	\$ 7.5	\$ 15
Alambre de Nicromo	U	1	\$ 2	\$ 2
Varillas de bronce como electrodos	U	2	\$ 1.5	\$ 3
Tarjeta Arduino UNO	U	1	\$ 13	\$ 13
Paquete de Jumpers	U	1	\$ 1.8	\$ 1.8
Resistencia de 4.7 Kilo-Ohmios	U	1	\$ 0.70	\$ 0.70
Sensor de temperatura	U	1	\$ 5	\$ 5
Placa de pruebas (Protoboard)	U	1	\$ 5	\$ 5
<b>Total</b>				<b>\$ 860.4</b>

### 3.5.3 Costos de manufactura

En esta sección se detalla los costos del proceso de manufactura que intervienen en la construcción del equipo.

**Tabla 3.14: Costos de los procesos de manufactura**

Denominación	Unidad	Cantidad	Precio U	Precio T.
Proceso de roscado en acero inoxidable	U	2	\$30	\$60
Proceso de Moleteado en acero inoxidable	U	1	\$30	\$30
Proceso de prensado en acero inoxidable	U	2	\$30	\$60
<b>Total</b>				<b>\$150</b>

### 3.5.4 Costos de complementos

El sistema requiere un establecimiento que brinda la seguridad del operador, así como los implementos necesarios para la experimentación, estos costos adicionales se detallan.

**Tabla 3.15: Complementos del diseño**

Denominación	Unidad	Cantidad	Precio U	Precio T.
Tanque de oxígeno (kit completo)	U	1	\$ 329	\$ 329
Agua destilada	Gal	1	\$ 2.35	\$ 2.35
Balanza de alta precisión 0.01 g	U	1	\$ 300	\$ 300
Computadora	U	1	\$ 300	\$ 300
<b>Total</b>				<b>\$ 931</b>

### 3.5.5 Costo total

El costo total se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 3.16: Costo total**

<b>Denominación</b>	<b>Costos</b>
Costos de diseño	\$ 300
Costos de materiales	\$ 860.4
Costos de proceso de manufactura	\$150
Costos de complementos	\$ 931
<b>Total</b>	<b>\$ 2241.4</b>

### **3.5.6 Análisis de costos**

Al comparar el dispositivo diseñado con el Calorímetro sencillo de camisa estática – 131, que ofrece la empresa Instrumentalia, se observa que tienen un diseño similar y componentes muy similares, el precio de nuestro prototipo es de \$1030.40 y el precio del Calorímetro sencillo es de \$1500. A pesar de su diferencia de precio se debe retacar que el Calorímetro de Instrumentalia ofrece un poco más de beneficios.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- En los resultados se puede observar que la temperatura máxima a la que está sometido el obús en la pared interna es de 650 K, el acero inoxidable 304 es un material que tiene una temperatura de trabajo máximo de 1250 K grados centígrados. Por lo tanto, el obús está sometido a una temperatura de trabajo por debajo del rango máximo permitido.
- El obús por sus propiedades mecánicas no fallará debido a que la presión en las paredes y tapas está por debajo de la presión máxima de trabajo, el recipiente de combustión diseñado tiene la capacidad de soportar presiones de hasta 200 [Mpa], es importante recalcar que se eligió acero inoxidable como material porque este puede soportar temperaturas muy altas que es lo óptimo para este diseño.
- Se realizó el cálculo del BIAS y se observó valores aproximadamente de 1 a 2°C, es decir cual representa que la simulación tiene un valor sobrestimado de 2.02°C, en cambio el RMSE tiene un valor de 1.5 es decir que a pesar de que el BIAS resultó ser entre 1,6 a 2 grados, no se obtuvo la precisión deseada debido a ciertos factores como el mallado de la simulación o el modelo matemático utilizado.
- Se realizó la validación de resultados con algunos datos de entrada, estos son 800 [K], 900 [K], 1000 [K], y se pudo observar que la temperatura afuera del recipiente de aislamiento era la temperatura ambiente en todos los casos. Por lo tanto, se cumple el papel del recipiente exterior de aislar completamente el sistema, incluso a temperaturas más altas.
- El análisis de costo dependió de 3 factores que son los materiales a utilizar, el diseño de equipos, tales como procesos de soldadura, roscado, entre otros, los equipos auxiliares para realizar una correcta práctica tales como tanque de oxígeno auxiliar, mangueras, válvulas y agua destilada. Para la implementación de todo el equipo necesario en el laboratorio se necesita una inversión de \$2241.40, es importante recalcar que, lo más

probable que en un laboratorio convencional se encuentre el computador y la balanza reduciendo los costos de implementación del equipo a \$1641.40.

- El costo del producto sin los complementos está valorado en \$1410.10, siendo un precio competitivo en el mercado, ya que empresas argentinas como Instrumentalia ofrecen este equipo a un costo estimado de \$1600; los diseños son muy similares, aunque el diseño de Instrumentalia ofrece más beneficios en su dispositivo.

## **4.2 Recomendaciones**

- Al realizar el modelamiento del sistema de agitación se recomienda realizar un estudio detallado del agitador tal como la potencia, el diámetro del agitador, el número de aspas para optimizar el uso de la agitación en la distribución uniforme de la temperatura del agua.
- Debido al alto costo de estos agitadores, se propone realizarlo de otros materiales que sean resistentes en ambientes húmedos, además de realizar un estudio de factibilidad económica y técnica para el diseño del sistema de agitación con el propósito de optimizar los costos de producción
- Es importante realizar un balance estequiométrico a la muestra biomásica ya que de esta manera se puede aumentar la precisión de la experimentación porque nos permite saber con más exactitud la cantidad de oxígeno, o el exceso que se debe agregar para una combustión completa. Cabe recalcar que tener un exceso de oxidante demasiado elevado en la combustión puede afectar la eficiencia del proceso.
- Aunque el programa computacional para la simulación es muy bueno y con una estimación de errores aceptable, se recomienda usar programas que tengan parámetros para simular combustión a volumen constante, de esta manera se tendrá un diseño mucho más preciso y se podrá observar parámetros que nos ayuden a realizar un diseño óptimo.



## BIBLIOGRAFÍA

- Antolín, G., & Oliva, D. (2002). CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR MEDIANTE ANÁLISIS TÉRMICO.
- Arduino. (2018). Obtenido de <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Carrasco, J. E. (2015). *Gestión de las energías renovables: Perspectiva de futuro*.
- Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. A. (2009). *Central de energías renovables*. Madrid: PEARSON EDUCATION.
- Cengel Y., B. M. (2015). *Termodinámica*. México: McGraw-hill/Interamericana.
- Corace, P., & Martina, V. (29 de Septiembre de 2013). APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS BIOMASICOS DE LA REGION NORDESTE. Argentina.
- Fernández, J. (2012). BIOMASA. *Energías renovables para todos, 2*.
- Geankpolis, C. J. (2006). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Mexico.
- Grech, P. (2013). *Introducción a la Ingeniería*. Colombia: Pearson.
- Hidalgo, X. I. (2012). La humedad en la biomasa: herramientas de medida y control. *energética XXI*.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1996). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. MÉXICO.
- IRAM. (1960). Carbones, método de determinación del poder calorífico. *Norma IRAM 17016*.
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., & Miles Jr, T. R. (1998). Jenkins, B., Baxter, L., Miles, T., & Miles, T. (1998). Combustion properties of biomass. *FUEL PROCESSING TECHNOLOGY*.
- Mesa, O. J., & González, P. L. (2003). Balance de CO<sub>2</sub> en la obtención de energía renovable a partir de la caña de azúcar.
- Navarro. (2018). *Potencial energético de los residuos de la cadena de valor del cacao en la región Madre de Dios*. Universidad Agraria La Molina.
- Neiva, H. (2012). Poder calorífico. *Estequiometría*.
- Nilsson, J. W., & Riedel, S. A. (2006). *Circuitos electricos*. Madrid: Pearson.
- Nussbaumer, T. (2003). Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Verenum*.
- Ortega Rodriguez, M. (2000). *Energías Renovables*. MADrid: Paraninfo.

Pelaéz Samaniego, M. R., & Espinoza Abad, J. L. (2015). *Energías Renovables del Ecuador*. Cuenca: Cuenca.

Product, M. I. (2019). Programmable Resolution. *Wire Digital Thermometer*.

Stefan, M. S., Gunther, W. H., & Wolfgang, H. (2009). *Calorimetry*. Germany.

TRANSBIOMA. (2012). *BIOMASA.COMBUSTIBLE Y SOSTENIBILIDAD*. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario.

# APÉNDICES

# APÉNDICES

## Figuras

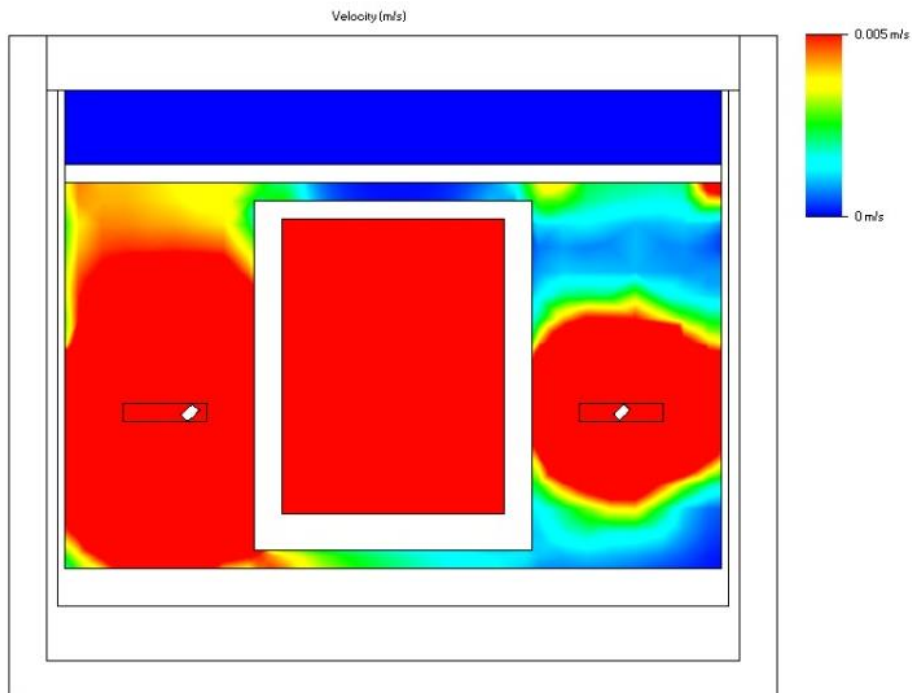


Figura A.4.1: Velocidad del fluido en la experimentación

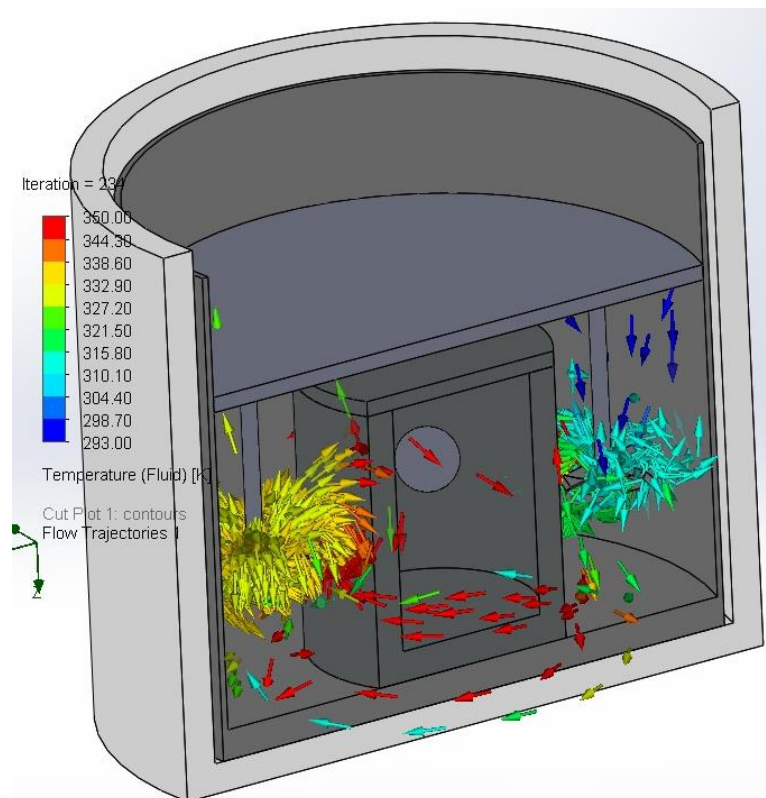


Figura A.4.2: Simulación de agitadores a diferentes velocidades (600 rpm, 300 rpm)

**Absolute Maximum Ratings**

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground.....-0.5V to +6.0V  
 Operating Temperature Range.....-55°C to +125°C  
 Storage Temperature Range.....-55°C to +125°C  
 Solder Temperature.....Refer to the IPC/JEDEC J-STD-020 Specification.

These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

**DC Electrical Characteristics**


(-55°C to +125°C; V<sub>DD</sub> = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V <sub>DD</sub>	Local power (Note 1)	+3.0		+5.5	V
Pullup Supply Voltage	V <sub>PU</sub>	Parasite power	+3.0		+5.5	V
		Local power	+3.0		V <sub>DD</sub>	
Thermometer Error	t <sub>ERR</sub>	-10°C to +85°C			±0.5	°C
		-30°C to +100°C			±1	
		-55°C to +125°C			±2	
Input Logic-Low	V <sub>IL</sub>	(Notes 1, 4, 5)	-0.3		+0.8	V
Input Logic-High	V <sub>IH</sub>	Local power	+2.2		The lower of 5.5 or V <sub>DD</sub> + 0.3	V
		Parasite power	+3.0			
Sink Current	I <sub>L</sub>	V <sub>IO</sub> = 0.4V	4.0			mA
Standby Current	I <sub>DDS</sub>	(Notes 7, 8)		750	1000	nA
Active Current	I <sub>DD</sub>	V <sub>DD</sub> = 5V (Note 9)		1	1.5	mA
DQ Input Current	I <sub>DQ</sub>	(Note 10)		5		µA
Drift		(Note 11)			±0.2	°C

- Note 1:** All voltages are referenced to ground.
- Note 2:** The Pullup Supply Voltage specification assumes that the pullup device is ideal, and therefore the high level of the pullup is equal to V<sub>PU</sub>. In order to meet the V<sub>IH</sub> spec of the DS18B20, the actual supply rail for the strong pullup transistor must include margin for the voltage drop across the transistor when it is turned on; thus: V<sub>PU\_ACTUAL</sub> = V<sub>PU\_IDEAL</sub> + V<sub>TRANSISTOR</sub>.
- Note 3:** See typical performance curve in Figure 1. Thermometer Error limits are 3-sigma values.
- Note 4:** Logic-low voltages are specified at a sink current of 4mA.
- Note 5:** To guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V<sub>ILMAX</sub> may have to be reduced to as low as 0.5V.
- Note 6:** Logic-high voltages are specified at a source current of 1mA.
- Note 7:** Standby current specified up to +70°C. Standby current typically is 3µA at +125°C.
- Note 8:** To minimize I<sub>DD</sub>, DQ should be within the following ranges: GND ≤ DQ ≤ GND + 0.3V or V<sub>DD</sub> - 0.3V ≤ DQ ≤ V<sub>DD</sub>.
- Note 9:** Active current refers to supply current during active temperature conversions or EEPROM writes.
- Note 10:** DQ line is high ("high-Z" state).
- Note 11:** Drift data is based on a 1000-hour stress test at +125°C with V<sub>DD</sub> = 5.5V.

Figura A.4.3: Ficha técnica de sensor de temperatura DS18B20

**PLANCHA**  
**ACERO INOXIDABLE**



Tipo de estructura	Tipo de Composición	Descripción de acuerdo a JIS*	Descripción de acuerdo a AISI**	Descripción de acuerdo a DIN***	COMPOSICIÓN QUÍMICA %					
					C	Si max	Mn	P max	S max	Ni
Austenítico	17 Cr-5Ni-7Mn	SUS 201	201		0,15 max	1,00	5,50 ~ 7,50	0,06	0,030	3,50 ~ 5,5
	18 Cr-6Ni-10Mn	SUS 202	202		0,15 max	1,00	7,50 ~ 10,00	0,06	0,030	4,00 ~ 6,00
	17Cr-7Ni	SUS 301	301	4310	0,15 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	6,00 ~ 8,00
	18Cr-8Ni-highC	SUS 302	302	4300	0,15 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	8,00 ~ 10,00
	18Cr-8Ni	SUS 304	304	4301	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	8,00 ~ 10,50
	18Cr-8Ni-extra-low-C	SUS 304 L	304L	4306	0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00
	18Cr-12Ni	SUS 305	305	3955	0,12 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,50 ~ 13,00
	23Cr-12Ni	SUS 309 S	309 S	4845	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	12,00 ~ 15,00
	25Cr-20Ni	SUS 310 S	310 S		0,08 max	1,50	2,00 - max	0,04	0,030	19,00 ~ 22,00
	18Cr-12Ni-2,5Mo	SUS 316	316	4401	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,00 ~ 14,00
	18Cr-12Ni-7,5Mo-extra-low-C	SUS 316 L	316 L	4404	0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	12,00 ~ 15,00
	18Cr-12Ni-2Mo-2Cu	SUS 316 J1		4505	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,00 ~ 14,00
	18Cr-13Ni-3,5Mo	SUS 317	317	4402	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	18,00 ~ 15,00
	18Cr-13Ni-1,5Mo-extra-low-C	SUS 317 L	317 L		0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	11,00 ~ 15,00
	18Cr-8Ni-Ti	SUS 321	321	4541	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00
	18Cr-9Ni-Nb	SUS 347	347	4550	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00

Figura A.4.4: Catálogos de planchas de acero inoxidable [DIPAC]

Aceros inoxidables

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR

AISI 302	8055	480	15.1	3.91			17.3	20.0	22.8	25.4		
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	9.2	12.6	512	559	585	606	
AISI 316		8238	468	13.4	3.48	272	402	515	557	582	611	28.0 31.7
AISI 347		7978	480	14.2	3.71			504	550	576	602	640 682
								513	559	585	606	

Figura A.4.5: Propiedades del acero inoxidable [ (Incropera & DeWitt, 1996)]

TABLA A.3 Continuación

**Materiales y sistemas de aislamiento**

Descripción/composición	Propiedades típicas a 300 K		
	Densidad, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica, $k$ (W/m · K)	Calor específico, $c_p$ (J/kg · K)
Manta y fibra			
Fibra de vidrio, revestida de papel	16	0.046	—
	28	0.038	—
	40	0.035	—
Fibra de vidrio, recubierta; forro de tubo	32	0.038	835
Tablero y losa			
Vidrio celular	145	0.058	1000
Fibra de vidrio, unión orgánica	105	0.036	795
Poliestireno, expandido			
Estirado (R-12)	55	0.027	1210
Lechos moldeados	16	0.040	1210
Lámina de fibra mineral; material de techado	265	0.049	—
Madera, triturada/encementada	350	0.087	1590
Corcho	120	0.039	1800

Figura A.4.6: Propiedades de la fibra de vidrio [ (Incropera & DeWitt, 1996)]

TABLA A.6 Propiedades termofísicas de agua saturada\*

Temperatura, T (K)	Presión, P (bar)	Volumen específico (m <sup>3</sup> /kg)		Entalpía de vaporización, h <sub>fg</sub> (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m <sup>2</sup> )		Conductividad térmica (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )		Número de Prandtl		Tensión superficial, σ <sub>s</sub> · 10 <sup>3</sup> (N/m)	Coeficiente de expansión térmica, β <sub>f</sub> · 10 <sup>5</sup> (K <sup>-1</sup> )	Temperatura (°K)
		v <sub>f</sub> · 10 <sup>3</sup>	v <sub>g</sub>		c <sub>p,f</sub>	c <sub>p,g</sub>	μ <sub>f</sub> · 10 <sup>6</sup>	μ <sub>g</sub> · 10 <sup>6</sup>	k <sub>f</sub> · 10 <sup>3</sup>	k <sub>g</sub> · 10 <sup>3</sup>	Pr <sub>f</sub>	Pr <sub>g</sub>			
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1.750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1.652	8.09	574	18.3	13.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.195	1.858	1.422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1.225	8.49	590	18.0	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1.080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	73.7	227.5	295
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	615	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	760	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	685	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.3372	1.024	4.653	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.4163	1.027	3.866	2317	4.195	1.954	365	11.09	678	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	679.9	360
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
375	1.0815	1.044	1.679	2252	4.217	2.029	270	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	375
380	1.2869	1.048	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	380
385	1.5233	1.053	1.442	2225	4.232	2.081	248	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	385
390								12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	390

Figura A.7: Propiedades del agua [ (Incropera & DeWitt, 1996)]