

**PROPUESTA DE UN FERMENTADOR DE CAFÉ CON CONTROL  
AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA A ESCALA PILOTO DE LABORATORIO  
PARA LA EMPRESA PENAGOS HERMANOS Y CÍA S.A.S.**

**EDWIN ARLEY LIZARAZO PÉREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

**PROPUESTA DE UN FERMENTADOR DE CAFÉ CON CONTROL  
AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA A ESCALA PILOTO DE LABORATORIO  
PARA LA EMPRESA PENAGOS HERMANOS Y CÍA S.A.S.**

**EDWIN ARLEY LIZARAZO PÉREZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Químico**

**Director:**

**Prof. CARLOS JESÚS MUVDI NOVA**

**Ing. Químico, MSc., PhD.**

**Codirector:**

**ANDREA PINZÓN FRÍAS**

**Ing. Química, MSc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

*A Dios, por estar siempre a mi lado, por bendecirme cada día y por regalarme la alegría de alcanzar un gran logro en mi vida.*

*A mi madre Ana Pérez y a mi padre Henry Lizarazo, por ese amor infinito hacia mí, por sacarme adelante con esfuerzo y valentía y por ser una inspiración constante para seguir adelante. Este logro es por ustedes y para ustedes.*

*A mi novia Anggie Revuelta, por el amor, la compañía, el apoyo, por los momentos felices y por estar presente en las buenas y en las malas. A sus padres y hermano, por el apoyo incondicional durante estos años y a mi fiel amigo "Taco" por llenarme de alegrías.*

*A mis mejores amigos Santiago Gómez, Jose Luis Cavanzo y Juan Guillermo Pérez, por enseñarme y demostrarme el valor de la amistad y la lealtad a lo largo de los años.*

*A mis amigos Camila Barón, Tania García, Oscar Galvis, Jordan Gómez y Juan Carlos López por los inolvidables momentos vividos a lo largo de la carrera.*

*Y a aquellas personas que de una u otra forma aportaron en mi formación personal y académica, para ser quien soy el día de hoy.*

***Edwin Arley Lizarazo Pérez.***

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi alma mater la Universidad Industrial de Santander (UIS), por la formación integral brindada.

A la Escuela de Ingeniería Química y todos sus profesores por aportar en mi formación académica y personal durante mi carrera.

A mi director, el profesor Carlos Jesús Muvdi Nova, por la confianza, por el tiempo, por la gran dedicación, por el apoyo incondicional, por el conocimiento transferido y por el gran ejemplo profesional y personal brindado durante el tiempo de trabajo.

A mi codirectora Andrea Pinzón por brindarme la oportunidad de trabajar en el gran sector cafetero.

A Carlos Gonzales, Henry Ortega, Jose Cavanzo y Carlos Muñoz, por el conocimiento transferido en aspectos complementarios a mi carrera, gracias a su apoyo se pudo concluir con éxito este proyecto.

A Penagos Hermanos por darme la oportunidad de trabajar en el área de Investigación y Desarrollo y por el apoyo continuo para la realización del proyecto.

A los muchachos del taller de prototipos de Penagos Hermanos (Pluto, Alvaros, Jonatan, Martin, Fredy y Ramiro) por e tiempo y el buen trabajo en la fabricación del equipo.

Al CICTA por el apoyo brindado durante la fase de experimentación del proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS .....	18
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. METODOLOGÍA.....	19
2.1. SELECCIÓN DEL CONCEPTO DE DISEÑO PARA EL FERMENTADOR CONTROLADO DE CAFÉ.....	19
2.2. DISEÑO CONCEPTUAL Y FABRICACIÓN DEL FERMENTADOR CONTROLADO DE CAFÉ.....	20
2.3. VALIDACIÓN FUNCIONAL Y DE DESEMPEÑO DEL FERMENTADOR CONTROLADO DE CAFÉ.....	21
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	23
3.1. SELECCIÓN DEL CONCEPTO DE DISEÑO PARA EL FERMENTADOR CONTROLADO DE CAFÉ.....	23
3.2. DISEÑO CONCEPTUAL Y FABRICACIÓN DEL FERMENTADOR CONTROLADO DE CAFÉ.....	25
3.3. VALIDACIÓN FUNCIONAL Y DE DESEMPEÑO DEL FERMENTADOR CONTROLADO DE CAFÉ.....	32
4. CONCLUSIONES.....	39
5. RECOMENDACIONES .....	40

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....41

BIBLIOGRAFÍA.....45

ANEXOS.....49

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Condiciones de diseño para balance energético. ....	21
<b>Tabla 2.</b> Evaluación del concepto ganador por matriz de criterios ponderados. ...	24
<b>Tabla 3.</b> Valores estimados para los calores metabólico y transferido. ....	29
<b>Tabla 4.</b> Hallazgos y ajustes del prototipo de fermentador controlado. ....	32
<b>Tabla 5.</b> Porcentajes de error entre valores calculados y medidos. ....	33
<b>Tabla 6.</b> Valores de pH en las pruebas experimentales. ....	33
<b>Tabla 7.</b> Fórmulas para determinar los límites de control. ....	35
<b>Tabla 8.</b> Puntajes de la evaluación sensorial de los cafés procesados. ....	37
<b>Tabla 9.</b> Perfiles sensoriales de los cafés procesados. ....	37
<b>Tabla 10.</b> Distribución de costos del prototipo de fermentador controlado. ....	38
<b>Tabla 11.</b> Costo operacional del prototipo de fermentador controlado .....	38

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Partes de una cereza de café. Fuente: Rogers [4].....	14
<b>Figura 2.</b> Equipos de fermentación actuales en Colombia. a) Fermentador tradicional [8] b) Fermentador ECOMILL [12] c) Fermentador Penagos [13].....	17
<b>Figura 3.</b> Diagrama metodológico del proyecto.....	19
<b>Figura 4.</b> Recopilación de evidencias de la actividad creativa. ....	23
<b>Figura 5.</b> Conceptos de diseño obtenidos a partir de matrices DOFA. ....	23
<b>Figura 6.</b> Diseño virtual del prototipo con sus respectivas partes. ....	25
<b>Figura 7.</b> Planos (en mm) e imagen de la cámara de fermentación.....	27
<b>Figura 8.</b> Simulación en SolidWorks de la trayectoria del aire dentro de la chaqueta .....	27
<b>Figura 9.</b> Sistema de agitación a) Planos e imagen del agitador b) imagen del sistema de transmisión. ....	28
<b>Figura 10.</b> Estimación del punto de operación del sistema. ....	30
<b>Figura 11.</b> Ubicación de los sensores en el prototipo.....	30
<b>Figura 12.</b> (a) Imagen del sensor DS18B20 (b) localización de los sensores dentro de la cámara de fermentación (c) Elementos de control.....	31
<b>Figura 13.</b> (a) Interfaz gráfica de usuario (b) prototipo ensamblado y con la interfaz implementada. ....	32
<b>Figura 14.</b> (a) Temperatura del grano en prueba 1 (b) acercamiento de la Figura 15a (c) Temperatura del grano en prueba 2 (d) acercamiento de la Figura 15c. ....	34
<b>Figura 15.</b> (a) Gráfica de control de la prueba 1, (b) Gráfica de control de la prueba 2.....	36

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Ejemplo de matriz DOFA para uno de los 24 conceptos de diseño .....	49
<b>Anexo B.</b> Matriz de criterios ponderados .....	50
<b>Anexo C.</b> Cálculo del caudal de aire requerido .....	52
<b>Anexo D.</b> Código de caída de presión del sistema.....	60

## RESUMEN

**TÍTULO:** PROPUESTA DE UN FERMENTADOR DE CAFÉ CON CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA A ESCALA PILOTO DE LABORATORIO PARA LA EMPRESA PENAGOS HERMANOS Y CÍA S.A.S.\*

**AUTOR:** Edwin Arley Lizarazo Pérez\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Fermentación de café, control de temperatura, Prototipo de laboratorio.

### DESCRIPCIÓN:

La fermentación es una de las etapas del proceso de postcosecha del café. Esta etapa es de gran importancia, ya que si se realiza de forma adecuada puede llegar a potencializar sabores en el café procesado. En este sentido, el control de la temperatura ayudaría en dicho fin. Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió trabajar con Penagos Hermanos en el diseño y la materialización de un prototipo de fermentador controlado de café de 10 kg, capaz de controlar temperaturas entre 15°C y 18°C.

El diseño contó con un sistema de agitación para eliminar perfiles de temperatura, un sistema de aireación encargado de regular la temperatura del grano y una interfaz gráfica, que permite interactuar al usuario de forma sencilla con los datos obtenidos y los valores de *set point*. Durante su implementación se logró mantener la temperatura del grano dentro de la tolerancia especificada ( $\pm 1$  °C), durante las 20 h de fermentación. Así mismo, se mantuvo una temperatura homogénea en toda la masa de café y se observó una rápida respuesta utilizando el sistema de aireación directa, encontrándose una velocidad promedio de  $-0,3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . No obstante, el uso continuo de la agitación ocasionó una trilla del 30%.

Finalmente, con la evaluación sensorial se apreció que el café fermentado en el equipo tuvo un puntaje igual y un perfil sensorial muy similar, lo cual representaría un avance en busca de mantener un puntaje y un perfil característico del café durante la época de cosecha, donde las condiciones ambientales pueden cambiar significativamente.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova. Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D. Codirector. Andrea Pinzón. Ingeniera Química, M.Sc.

## ABSTRACT

**TITLE:** PROPOSAL OF A COFFEE FERMENTATOR WITH AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL AT PILOT LABORATORY SCALE FOR THE COMPANY PENAGOS HERMANOS Y CÍA S.A.S.\*

**AUTHOR:** Edwin Arley Lizarazo Pérez \*\*

**KEYWORDS:** Coffee fermentation, temperature control, laboratory prototype.

### DESCRIPTION:

Fermentation is one of the stages in the coffee post-harvest process. This stage is of great importance, because carried out in an appropriate way, it can reach the potential of flavors in the processed coffee. In this sense, temperature control would help to get to this end. Taking this into account, it was decided to work with Penagos Hermanos in the design and materialization of a prototype of a 10 kg coffee controlled fermentor, capable of controlling temperatures between 15°C and 18°C.

The design included a stirring system to eliminate temperature profiles, an aeration system in charge of regulating the grain temperature and a graphical interface, which allows the user to interact easily with the data obtained and the set point values. During its implementation it was possible to maintain the temperature of the grain within the specified tolerance ( $\pm 1$  ° C), during the 20 h of fermentation. Likewise, a homogenous temperature was maintained throughout the coffee mass and a rapid response was observed using the direct aeration system, with an average speed of  $-0,3^{\circ}$  C / min. However, the continuous use of agitation caused a 30% threshing.

Finally, with the sensory evaluation it was appreciated that the coffee fermented in the team had an equal score and a very similar sensory profile, which would represent an advance in search of maintaining a score and a characteristic profile of the coffee during the harvest season, in which the environmental conditions can change significantly.

---

\* Undergraduate Project

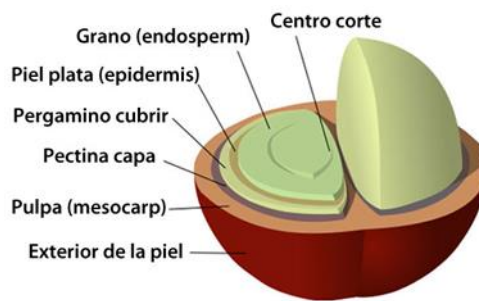
\*\* Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Food Science and Technology Research Center. Advisor: Carlos Jesús Muvdi Nova. Chemical Engineer, M.Sc., Ph.D. Co-director Andrea Pinzón Chemical Engineer, M.Sc.

## INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos más importantes a nivel mundial y Colombia se destaca en su producción, siendo el tercer país productor en el mundo según la *International Coffee Organization* [1], con una producción de 14,2 millones de sacos de café pergamino en el año [2], provenientes de la labor de cerca de 550 mil familias de diez departamentos [3].

Este producto agrícola se encuentra dentro del fruto maduro de la planta *Coffea* y está rodeado de diversas capas como se observa en la Figura 1. Debido a esto, para obtener el grano de café es necesario realizar un proceso de postcosecha denominado beneficio de café, en el cual se logra remover y separar del grano las diversas capas. Dicho beneficio se puede realizar por vía seca o por vía húmeda.

**Figura 1. Partes de una cereza de café.** Fuente: Rogers [4].



El beneficio por vía seca consiste en un secado del café cereza y un retiro de forma mecánica de la pulpa y el mucílago [5]. Por otra parte, el beneficio por vía húmeda comienza por un proceso de despulpado, luego una remoción del mucílago a través de fermentación natural o mecánicamente, seguido de un lavado, con el cual se elimina el mucílago no degradado, y se finaliza con un secado solar o se utilizan secadoras mecánicas para obtener un grano con humedad entre 10% y 12% [6]. La presencia de una etapa de fermentación y una de lavado en el proceso por vía húmeda, diferencia los dos tipos de beneficio.

En Colombia todo el café producido es de la especie Arábica y cerca del 95% es procesado mediante vía húmeda. En este tipo de beneficio se destaca la etapa de fermentación, debido a la influencia de sus variables sobre la calidad final del grano. Entre estas variables se puede encontrar algunas externas como el tipo de café o la maduración del grano, e internas como pH (de 5,2 a 3,7), tiempo de fermentación (de 18 a 30 h) y temperatura (ambiente) [7]. Cabe resaltar que, aunque exista la posibilidad de remover el mucílago de forma mecánica, si se quiere aumentar la probabilidad de obtener un café especial que represente una mayor retribución económica, es recomendado realizar el proceso de fermentación para dicha remoción [8].

La fermentación del café despulpado (denominado café en baba) es un proceso natural que puede llevarse a cabo de forma sólida o sumergida (agregando agua) [9]. En dicho proceso los microorganismos presentes en el mucílago oxidan parcialmente los azúcares del medio a través de sus enzimas naturales para producir energía (ATP), etanol, ácido láctico, ácido acético y dióxido de carbono; siendo estos compuestos precursores de algunas de las propiedades organolépticas del grano de café. Los microorganismos presentes son de carácter mesófilo y la mayoría suelen ser levaduras y bacterias lácticas. También se encuentran en el medio bacterias anaerobias, anaerobias facultativas y aerobias, así como algunos hongos [7].

Por otra parte, la temperatura es considerada como la variable crítica dentro del proceso de fermentación, ya que el carácter exotérmico de las reacciones presentes ocasiona un aumento de ésta, acelerando la acidificación del medio. Lo anterior acompañado de un deficiente seguimiento del tiempo del proceso, puede llegar a ocasionar problemas de sobre fermentación, generando así, defectos sensoriales en la bebida tales como, sabor a fermento, cebolla, rancio y nauseabundo [9, 10].

Sin embargo, no todos los efectos de la temperatura sobre el grano del café son negativos, ya que en investigaciones realizadas por Cenicafé [8] y por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín [11], se demostró que con fermentaciones a

temperatura controlada de 15°C y 17°C, se evitaron problemas de sobre fermentación y se percibieron perfiles sensoriales más complejos y con mejores atributos. Dichos perfiles ubicaron a este café dentro de la categoría especial, dándoles un mayor precio de comercialización.

Pero a pesar de evidenciarse que un control de temperatura en la etapa de fermentación podría traer beneficios a la calidad del café, en la actualidad no se cuenta comercialmente con un equipo que proporcione dicho control durante el proceso. En gran parte de las fincas cafeteras colombianas se utilizan tanques tradicionales, como el observado en la Figura 2a, el cual puede ser construido en diferente material (baldosa, cemento, plástico), tiene forma rectangular, es abierto al entorno y no posee ningún tipo de control o seguimiento de variables [8]. Así mismo, otra parte de los caficultores han optado por llevar a cabo la etapa de fermentación en tanques ECOMILL (Figura 2b), estos equipos son de acero inoxidable, tienen una forma cilíndrica vertical con una finalización en cono truncado invertido y al igual que los tradicionales son abiertos al entorno y sin ningún tipo de seguimiento o control de variables [12].

Es importante mencionar que Penagos Hermanos intentó en el año 2015 proponer un equipo incorporando instrumentos de medición y control. Para ello, adaptó una chaqueta de agua de enfriamiento a un equipo con forma similar al ECOMILL con 350 kg de capacidad como se observa en la Figura 2c. En el análisis técnico de este fermentador, realizado por Agámez [13], se reportaron perfiles de temperatura del orden de 6°C en la masa de café y tiempos muy lentos de respuesta, cerca del 50% del tiempo total de la fermentación para alcanzar por primera vez el *set point*, razones por la cual el equipo nunca llegó a publicarse ni a comercializarse. Sin embargo, los resultados experimentales obtenidos con este prototipo sirvieron como antecedente para la toma de algunas decisiones en el actual proyecto.

**Figura 2. Equipos de fermentación actuales en Colombia. a) Fermentador tradicional [8] b) Fermentador ECOMILL [12] c) Fermentador Penagos [13].**



**(a)**



**(b)**



**(c)**

Teniendo en cuenta el carácter innovador en el sector y unido a la importancia del control de la temperatura durante el proceso de fermentación, se estableció como objetivo trabajar con Penagos Hermanos y Cía. S.A.S (empresa metalmeccánica reconocida ampliamente por la fabricación de maquinaria para el beneficio del café), en el diseño y la materialización de un prototipo de fermentador controlado de café, capaz de controlar temperaturas entre 15°C y 18°C [8, 11]. De esta forma, se pretende evitar la dependencia del proceso al cambio de las condiciones ambientales, las cuales como se mencionó, pueden afectar negativamente la calidad del café. Lo anterior permitiría obtener un café libre de defectos propios de la fermentación y con un perfil sensorial definido.

Finalmente, se espera que el prototipo sea el punto de partida hacia un avance en el sector cafetero, en busca de la tecnificación de los procesos que hasta ahora son manejados de forma artesanal. Así mismo, se proyecta a futuro el escalado gradual del equipo hasta un dimensionamiento comercial que cumpla con la necesidad de producción de los caficultores y mejore el acceso en el mercado de cafés especiales.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. Objetivo general**

Proponer un fermentador de café con control automático de temperatura a escala piloto de laboratorio.

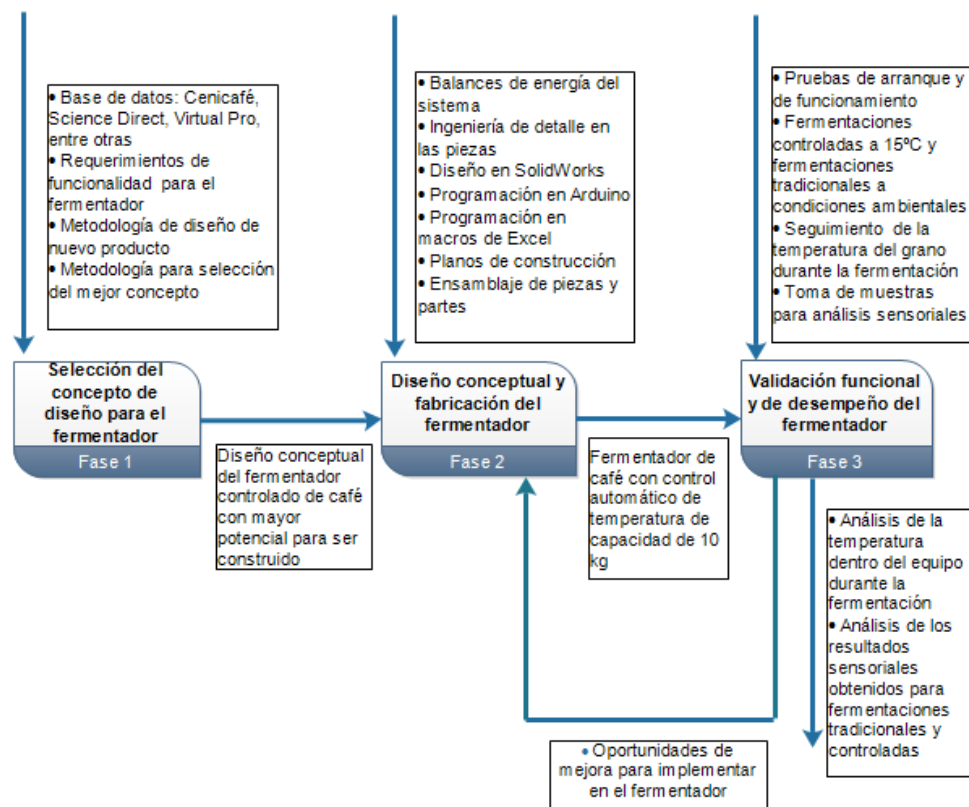
### **1.2. Objetivos específicos**

- Establecer un concepto de diseño innovador para un prototipo de fermentador controlado de café que cumpla con los requerimientos funcionales del proceso.
- Realizar el diseño conceptual de las partes y piezas del prototipo de fermentador controlado de café a través de cálculos generales y energéticos del sistema.
- Validar el funcionamiento y desempeño del prototipo de fermentador controlado de café mediante la implementación de pruebas funcionales y experimentales.

## 2. METODOLOGÍA

En la Figura 3 se presenta el cuadro metodológico implementado para el cumplimiento de los objetivos planteados en el actual proyecto.

**Figura 3. Diagrama metodológico del proyecto.**



### 2.1. Selección del concepto de diseño para el fermentador controlado de café.

La primera parte de esta fase se desarrolló de acuerdo con la metodología para el diseño de un nuevo producto [14]. Por ello, se realizó en primera instancia una actividad creativa, la cual tenía como objetivo generar conceptos de diseño a partir de propuestas individuales y consensos grupales.

Una vez obtenida las propuestas de diseño, se realizó un primer filtro utilizando matrices DOFA (Debilidades, Fortalezas, Amenazas, Oportunidades) para cada una de las propuestas. A partir del análisis de dichas matrices fue posible reducir el número de propuestas y mejorar algunos aspectos de los diseños seleccionados. Posteriormente, se procedió a la selección de la propuesta de diseño con mayor potencial para ser materializado. Para este fin, se elaboró y utilizó una matriz de criterios ponderados en la cual se generó una calificación de 0 a 5 para cada propuesta de acuerdo con criterios que comprendían factibilidad de mercado, operacional, económica, entre otras. Los encargados de generar dichas calificaciones fueron los integrantes del área de investigación y desarrollo de Penagos Hermanos y Cía. S.A.S.

## **2.2. Diseño conceptual y fabricación del fermentador controlado de café.**

Luego de seleccionada la mejor propuesta, se procedió a la realización del diseño conceptual del fermentador. En esta parte se seleccionó el tipo de material, se dimensionó el cuerpo del fermentador, se estableció el sistema de control *on/off* modulado con Arduino y se seleccionó un ventilador cuyo punto de operación cumpliera con los requerimientos energéticos necesarios para la regulación de la temperatura del café. Dichos requerimientos fueron estimados a partir del balance energético del sistema, el cual comprendía la generación de calor metabólico de una fermentación en estado sólido [15, 16] y la transferencia de calor desde el ambiente hacia el fermentador [17]. La estimación de estos calores permitió el cálculo del caudal requerido a las condiciones de diseño presentadas en la Tabla 1.

Así mismo, se determinó la caída de presión del sistema utilizando las ecuaciones relacionadas con el transporte de fluidos a través de tuberías y ductos [18]. Dicha caída de presión junto con el caudal requerido permitió la selección adecuada del ventilador y la estimación del punto de operación. Por otra parte, el diseño del sistema de refrigeración estuvo fuera del alcance del proyecto por cuestiones de

presupuesto, por ello fue adecuado un congelador ya existente para refrigerar el aire (seleccionado como fluido refrigerante en la Fase 1) y ser distribuido al sistema.

**Tabla 1. Condiciones de diseño para balance energético.**

<b>Variable</b>	<b>Valor supuesto</b>	<b>Justificación</b>
Temperatura ambiental	25 [°C]	Máxima temperatura alcanzada en zonas productoras de café [19].
Temperatura promedio del aire refrigerante	10 [°C]	Valor mínimo alcanzado por una unidad de refrigeración de aire.
Temperatura de set point	15 [°C]	Temperatura estudiada por Cenicafé para fermentaciones de cafés especiales [8].
Delta de temperatura del aire refrigerante	1 [°C]	Valor mínimo de intercambio obtenido en algunas fermentaciones de sustrato sólido [20].

Una vez finalizado el diseño conceptual se continuó con la realización del diseño virtual utilizando SolidWorks 2017, con el cual se obtuvieron los planos de construcción del fermentador a cargo del taller de prototipos de Penagos Hermanos. Por último, de forma paralela a la construcción, se realizó la programación del código de medición y control utilizando el programa Arduino 1.8.5 y se procedió al montaje de una interfaz gráfica para la visualización de los valores de temperatura. Dicha interfaz fue realizada en Excel 2016 mediante la implementación de macros que permitieron la comunicación con el controlador y la recopilación de datos en tiempo real.

### **2.3. Validación funcional y de desempeño del fermentador controlado de café.**

En primera instancia se realizaron pruebas funcionales en la planta de Penagos Hermanos, las cuales permitieron realizar los ajustes necesarios para el correcto funcionamiento del equipo. Una vez corregidos los aspectos encontrados en las pruebas funcionales se procedió con el desarrollo de las pruebas experimentales,

en el Parque Tecnológico Guatiguará - UIS, en las cuales se desarrollaron dos fermentaciones de café en baba, utilizando café de la variedad Caturra proveniente de la hacienda el Roble del municipio de Los Santos del departamento de Santander.

Debido a la escasez de café, para el momento de las pruebas solo se pudieron obtener para cada fermentación 10 kg de café en baba de un mismo lote. De ellos, 5 kg se fermentaron en el prototipo controlado (50% de su capacidad máxima) a una temperatura de *set point* de 15°C, basados en los resultados reportados por Cenicafe [8] y los restantes 5 kg fueron fermentados en un recipiente plástico destapado y a temperatura ambiente (16°C – 24°C), sirviendo como referencia de las fermentaciones tradicionales realizadas en las haciendas cafeteras. La temperatura inicial del café fue de aproximadamente 16,5°C y el tiempo de fermentación fue de 20 h, teniendo en cuenta condiciones de operación utilizadas comúnmente en haciendas cafeteras de Santander.

En el prototipo se comenzó el proceso utilizando tanto el sistema de aireación directa como el de chaqueta, con el fin de alcanzar rápidamente un primer *set point* de 14° C. Una vez se alcanzó los 14°C, se estableció el nuevo *set point* de operación de 15°C e inmediatamente se procedió a desconectar el sistema de aireación directa. A partir de ese momento la chaqueta de enfriamiento fue la encargada de regular la temperatura hasta el final de la fermentación, de esta forma se consiguió obtener una fermentación en un sistema cerrado con limitaciones de oxígeno, en las cuales se reportan sabores frutales, dulces y florales en los cafés [8].

Finalmente, el café fermentado fue lavado y secado al sol en una marquesina dispuesta en la empresa Penagos Hermanos hasta alcanzar una humedad entre 10% y 12% para ser posteriormente evaluado sensorialmente, con el fin de determinar un puntaje y unos atributos al café fermentado. La finalidad de estas pruebas sensoriales es dejar un antecedente para futuras investigaciones de la calidad del café a las condiciones establecidas en el prototipo.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1. Selección del concepto de diseño para el fermentador controlado de café.

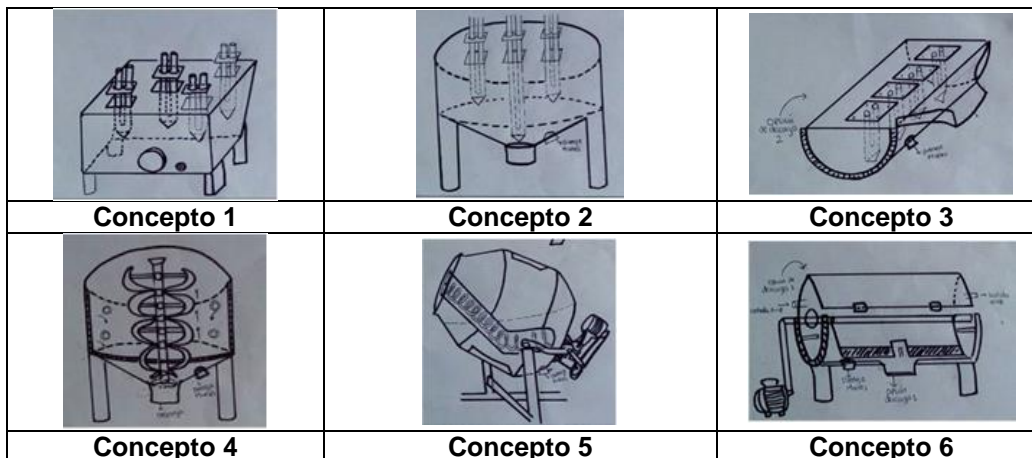
La primera actividad creativa mencionada en la metodología contó con la participación de 3 personas del grupo de investigación CICTA/UIS y 6 personas de Penagos Hermanos y Cía. S.A.S.; participaron ing. mecánicos, diseñadores industriales, ing. químicos y técnicos de producción (Figura 4).

**Figura 4. Recopilación de evidencias de la actividad creativa.**



El resultado obtenido de dicha actividad grupal fue la generación de 24 conceptos de diseño, 13 con principio de funcionamiento estático y 11 con principio de funcionamiento agitado. Cada uno de los diseños obtenidos fue analizado por medio de una matriz DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas, Amenazas) como estrategia para descartar y mejorar los conceptos (un ejemplo se presenta en el Anexo A). Es así como se redujo el número de conceptos de 24 a 6 (Ver Figura 5).

**Figura 5. Conceptos de diseño obtenidos a partir de matrices DOFA.**



Tres de los conceptos presentados en la Figura 5 tenían principio estático (conceptos 1, 2 y 3) y tres agitados (conceptos 4, 5 y 6). Entre estos conceptos se eligió el de mayor potencial para ser materializado a partir de una matriz de criterios. La Tabla 2 muestra la evaluación realizada del concepto seleccionado (concepto 6); la matriz detallada para cada concepto se puede observar en el Anexo B.

**Tabla 2. Evaluación del concepto ganador por matriz de criterios ponderados.**

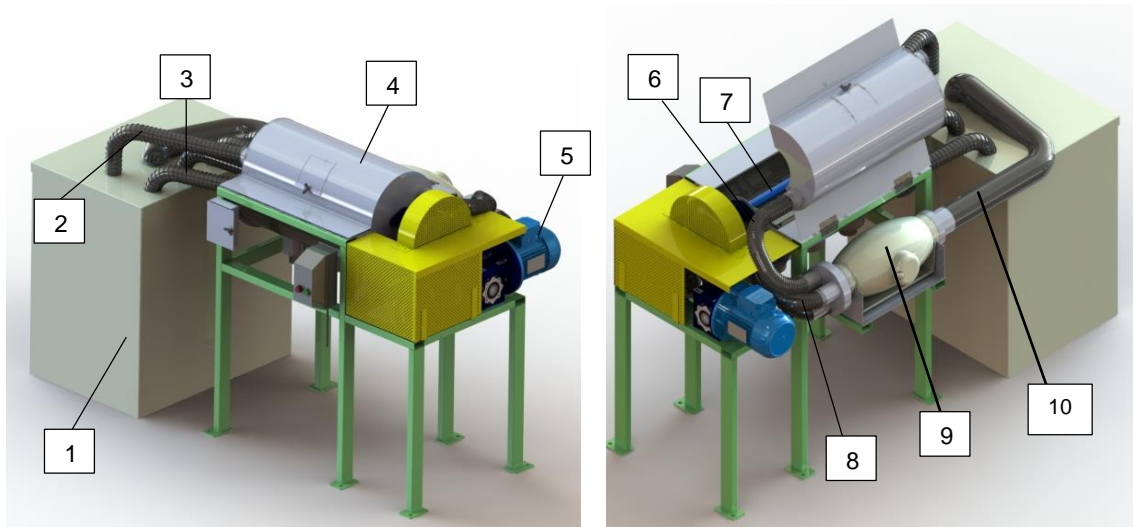
					<b>EVALUACIÓN</b>
<b>CRITERIO</b>	<b>No.</b>	<b>ENUNCIADO</b>	<b>INCIDENCIA DEL ENUNCIADO EN LA EVALUACIÓN</b>	<b>VALOR NUMÉRICO DE LA INCIDENCIA DEL ENUNCIADO EN LA EVALUACIÓN</b>	<b>CONCEPTO 6: Cilindro horizontal agitado</b>
<b>Factibilidad técnica y operativa</b>	1	El diseño del equipo asegura las condiciones de inocuidad del proceso (materiales, contaminación externa, entre otros)	Muy conveniente	4	4
	2	El equipo presenta una buena estética	Recomendable	2	4
	3	El equipo requiere poco espacio	Conveniente	3	3
	4	Los procesos de fabricación del equipo son sencillos	Muy conveniente	4	4
	5	El sistema de descarga del equipo es adecuado en aspectos de forma, funcionalidad y sencillez de fabricación	Esencial	5	4
	6	El equipo es de fácil limpieza y consume poca agua	Esencial	5	5
	7	El equipo requiere poco mantenimiento	Muy conveniente	4	4
	8	El equipo es de fácil operación y presenta una interfaz amigable con el cliente en las etapas de: carga, puesta en marcha y seguimiento de variables de operación	Esencial	5	5
	9	La instalación del equipo podría ser realizada en cualquier finca	Muy conveniente	4	4
	10	El equipo puede llegar a ser versátil en su construcción para permitir fermentaciones en seco o en sumergido	Conveniente	3	3
	11	El equipo no representa riesgos físicos	Esencial	5	4
<b>Factibilidad de ingeniería del proceso</b>	12	El consumo de energía es bajo en el equipo en referencia a accesorios, motores, entre otros	Esencial	5	2
	13	No se generan perfiles de temperatura dentro del equipo (Homogeneidad de la temperatura en toda la masa de café)	Esencial	5	5
	14	El sistema de control de temperatura tendrá una rápida respuesta	Esencial	5	4
	15	La forma del equipo permite realizar el escalado de forma sencilla	Esencial	5	5
<b>Factibilidad ambiental</b>	16	La sustancia para el control de temperatura es amigable con el medio ambiente	Esencial	5	5
<b>Factibilidad legal</b>	17	El equipo se ajustaría a la normatividad legal y reglamentaria asociada al procesamiento de alimentos, a la seguridad industrial e impactos ambientales en la mayoría de países de comercialización	Esencial	5	4
<b>Factibilidad financiera</b>	18	El costo de fabricación del equipo es bajo teniendo en cuenta los siguientes aspectos: materiales, mano de obra y servicios	Esencial	5	4
	19	El costo de operación del equipo es bajo	Muy conveniente	4	4
<b>Carácter innovador</b>	20	La ingeniería requerida para el diseño es de alto nivel y el equipo difícilmente podrá ser copiado por la competencia	Muy conveniente	4	3
<b>TOTAL</b>				<b>87</b>	<b>4,06</b>

A partir de los resultados se puede apreciar que este concepto tuvo un puntaje superior a 4,0 cumpliendo con los requerimientos del proceso. Así mismo, la presencia de un sistema de agitación y uno de aireación directa, le permitieron a este concepto tener alta calificación en aspectos esenciales como la homogeneidad de la temperatura y la rápida respuesta al sistema de control. Cabe recordar que esta matriz fue evaluada por el grupo de investigación y desarrollo de Penagos Hermanos, dando una calificación de 1 a 5 en cada enunciado a cada concepto.

### 3.2. Diseño conceptual y fabricación del fermentador controlado de café.

En la Figura 6 se presenta el diseño virtual del prototipo, el cual se realizó utilizando el *software* SolidWorks 2017.

**Figura 6. Diseño virtual del prototipo con sus respectivas partes.**



1	Congelador	6	Ducto de entrada de aire de la cámara
2	Ducto de salida de aire de la cámara	7	Agitador
3	Ductos de salida de aire de chaqueta	8	Ductos de entrada de aire de chaqueta
4	Cámara de fermentación	9	Ventilador
5	Motor	10	Ducto de succión del aire

El diseño presenta una orientación horizontal que mejora la distribución del grano y disminuye el nivel de compactación. El fluido refrigerante seleccionado fue el aire,

debido a la posibilidad de ponerlo en contacto directo con el café al inicio del proceso, facilidad en su uso, y su buena implementación en algunas fermentaciones de sustrato sólido [20].

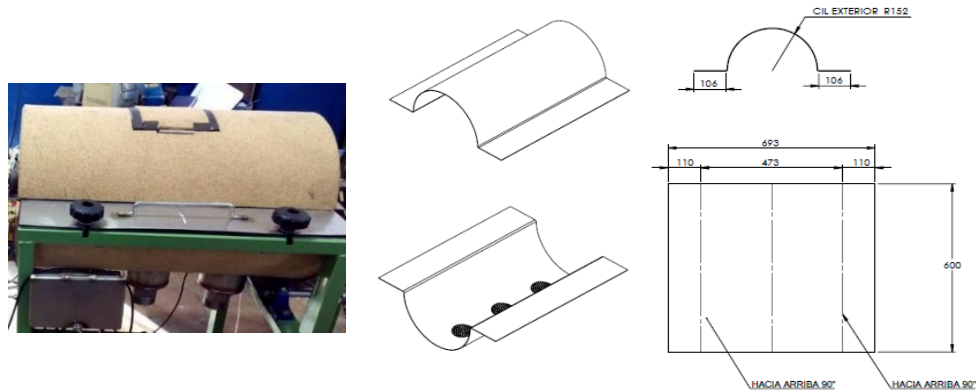
A nivel de funcionamiento, el café despulpado es colocado dentro de la cámara de fermentación (4), una corriente de aire hace un recorrido a través del ducto de succión (10), desde la unidad de refrigeración hasta el ventilador (9) para luego ser descargado mediante tres ductos, dos de ellos a la chaqueta de enfriamiento (8) y uno a la cámara de fermentación (6). La finalidad del ducto de aireación a la cámara es obtener una respuesta rápida de enfriamiento, dicho ducto puede desconectarse una vez se alcance la temperatura de *set point* para iniciar la fermentación, gracias a la presencia de bacterias facultativas en el mucílago de café [8]. El aire utilizado para el enfriamiento es recirculado al congelador por los ductos (2) y (3). Adicionalmente, el fermentador cuenta con un sistema de agitación (7) que evitará la formación de perfiles de temperatura. A continuación, se explicará en detalle el diseño y las dimensiones de las partes que conforman el prototipo.

#### Cámara de fermentación

La cámara se diseñó para una capacidad de carga de 10 kg de café en baba y con una densidad relativa de  $826,7 \text{ kg/m}^3$  [21]. Se estableció un sobredimensionamiento de 40%, de acuerdo con el factor de seguridad establecido por la empresa y una relación longitud/diámetro igual a 2, para asegurar una buena distribución del grano. De esta forma se obtuvo una cámara con diámetro de 30 cm y longitud de 60 cm, construida en acero inoxidable 304 y con espesor de 1,5 mm, teniendo en cuenta el soporte estructural y la disposición de material de la empresa.

En la parte inferior de la cámara se ubicaron tres sifones para facilitar el lavado. Por otra parte, la zona superior presenta una entrada y una salida de aire de 2" de diámetro y una mirilla de 16 cm x 16 cm. Por último, la cámara fue aislada con corcho natural de 6mm, como se observa en la Figura 7.

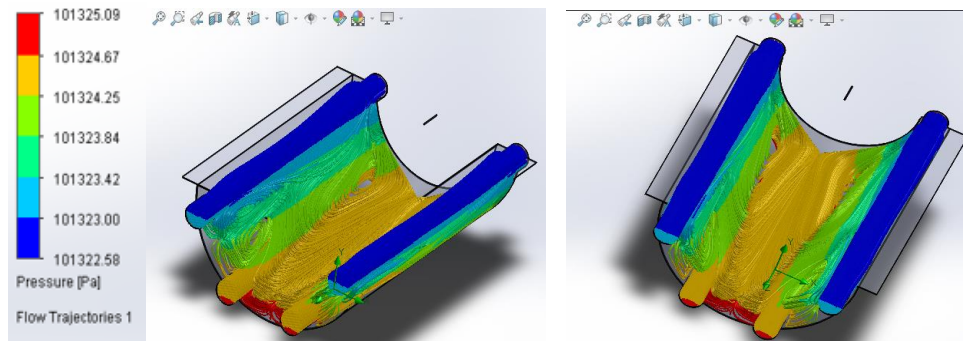
**Figura 7. Planos (en mm) e imagen de la cámara de fermentación.**



### Chaqueta de enfriamiento

En la parte inferior de la cámara se encuentra la chaqueta de enfriamiento, la cual fue elaborada en acero inoxidable y tiene un ancho de 6 cm para el flujo del aire. Además, cuenta con dos entradas y 4 salidas de 2" de diámetro. El número de entradas y de salidas de aire en la chaqueta se definió en base a la simulación del flujo de aire dentro de la chaqueta, buscando evitar la formación de volúmenes muertos en su interior, como se muestra en la Figura 8.

**Figura 8. Simulación en SolidWorks de la trayectoria del aire dentro de la chaqueta.**

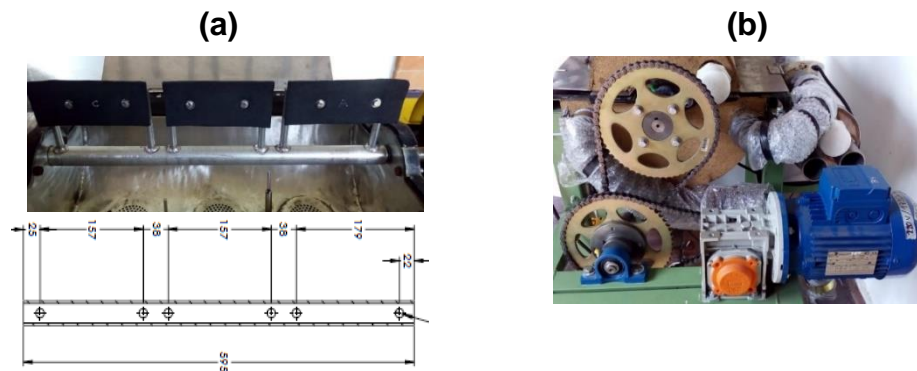


### Sistema de agitación

El sistema de agitación está constituido por tres palas planas de acero inoxidable de 15,7 cm de largo y 5 cm de ancho, con un espesor de 3 mm, las cuales presentan una separación de 3,8 cm entre ellas, con la finalidad de ubicar los sensores sin

riesgos de choque durante el giro (Figura 9a). Las palas se encuentran unidas a una fibra microporosa para mover los granos que se encuentren adheridos a las superficies de la cámara. El movimiento de las palas es generado por un eje en acero inoxidable de 1" de diámetro y 59,5 cm de largo, el cual gira a una velocidad de 5 rpm, valor adecuado para evitar daños en materiales como el grano de café [20]. Las bajas revoluciones son alcanzadas por la acción de un sistema de transmisión conformado por un motor trifásico de 1 hp de potencia y 220V, un reductor de frecuencia y dos poleas de 56 y 13 dientes (Figura 9b).

**Figura 9. Sistema de agitación a) Planos e imagen del agitador b) imagen del sistema de transmisión.**



### Sistema de refrigeración (congelador)

Como se mencionó en la metodología, se adaptó un congelador como sistema de refrigeración del aire. Dicho congelador tuvo una modificación en su tapa, la cual fue reemplazada por una en acero inoxidable con 5 entradas de 2" para la recirculación de aire y una salida de 3" para el ducto de succión del ventilador. Dicha tapa contó con un aislante de corcho en su exterior.

### Ventilador

Se seleccionó un ventilador de tipo helicocentrífugo silencioso y con referencia TD-350/125 SILENT. Este ventilador tiene una potencia de 44 W, una velocidad de 2459 rpm y un caudal máximo de 391 m<sup>3</sup>/h [22]. La selección se hizo basándose en el

punto de operación que superara el caudal requerido y la caída de presión del sistema.

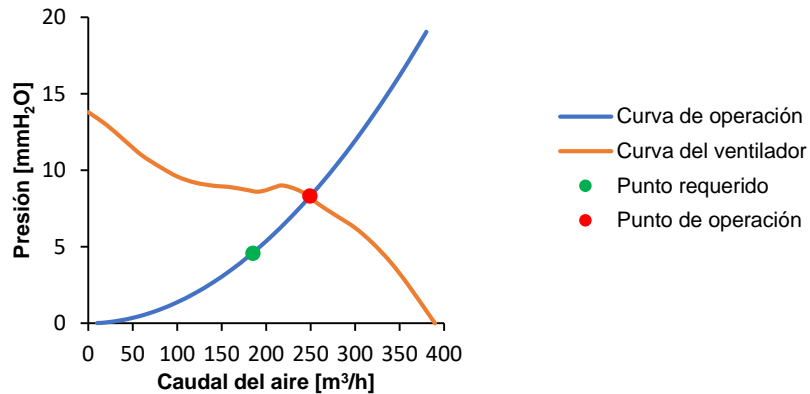
El caudal requerido se estimó a partir del balance de energía, en el cual se tuvo en cuenta el calor generado durante la fermentación y el calor transferido hacia el fermentador por efectos conductivos, convectivos y de radiación. Este último se consideró como la suma del calor ganado por la parte superior de la cámara, por la superficie externa de la chaqueta y por las superficies externas de las tuberías. El desarrollo detallado de la estimación de los calores y el caudal requerido se encuentran en el Anexo C. En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos.

**Tabla 3. Valores estimados para los calores metabólico y transferido.**

<b>Descripción</b>	<b>Valor calculado</b>	<b>Unidades</b>
Calor metabólico	11,1	kJ/h
Transferido a la parte superior de la cámara	51,2	kJ/h
Transferido a la superficie externa de la chaqueta	82,4	kJ/h
Transferido a las superficies de las tuberías	87,2	kJ/h
<b>Calor del sistema</b>	<b>231,8</b>	<b>kJ/h</b>
<b>Caudal requerido de aire</b>	<b>184,8</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>

Luego de estimar el caudal de aire requerido, se realizaron los cálculos para determinar la caída de presión total dando como resultado un valor de 4,6 mmH<sub>2</sub>O (el detalle de los cálculos se describe en el Anexo D). Estos valores se utilizaron para determinar el punto de operación del ventilador a partir de su curva de operación, como se muestra en la Figura 10. En ella se puede observar que el punto de operación se encuentra por encima del punto requerido, con un valor de caudal de aire aproximado de 250 m<sup>3</sup>/h y una caída de presión aproximada de 8 mmH<sub>2</sub>O. Lo anterior representa un sobredimensionamiento de 35% con respecto al caudal de aire requerido, lo cual asegurará la regulación de la temperatura durante el proceso.

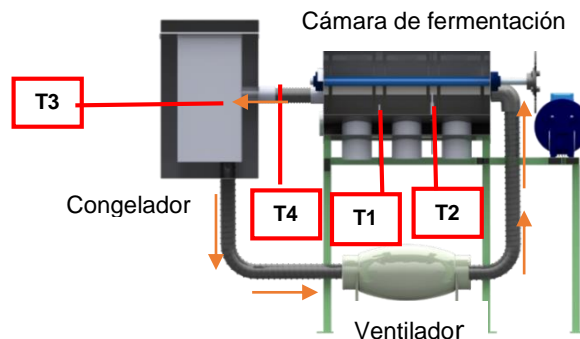
**Figura 10. Estimación del punto de operación del sistema.**



### Sistema de control

En la Figura 11 se puede apreciar la posición de los sensores en el prototipo. Los cuatro sensores utilizados son de la referencia DS18B20 (Figura 12a), de tipo digital y a su vez sumergibles. Así mismo, son compatibles con Arduino y presentan un rango de medición de -55°C a 125°C y una precisión de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Los sensores T1 y T2 realizan la medición de la temperatura del grano a una distancia de 20 cm y una altura de capa de 5 cm (T1) y 10 cm (T2) (Figura 12b). Los sensores T3 y T4 indican las temperaturas del aire dentro de la unidad de refrigeración (entrada al sistema) y en el ducto de recirculación (salida del sistema). El *set point* se estableció como el promedio entre T1 y T2.

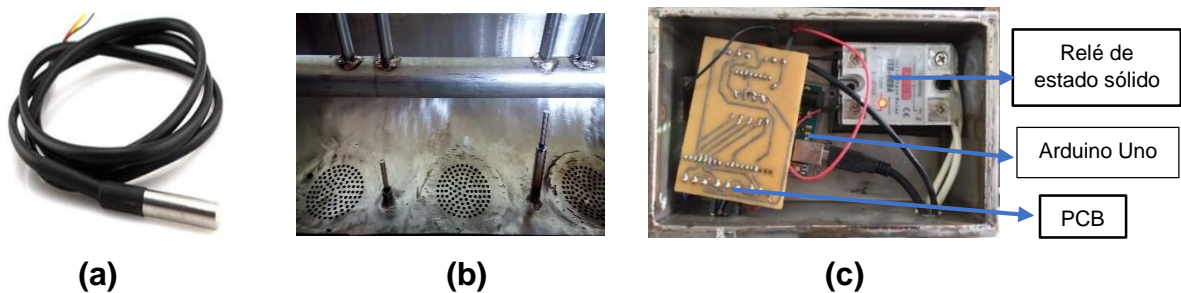
**Figura 11. Ubicación de los sensores en el prototipo.**



Como controlador fue utilizada una placa de Arduino Uno, la cual presenta un microcontrolador Atmega328 instalado que fue programado en el mismo

desarrollador libre de Arduino versión 1.8.1. y compilado por medio de un cable USB. La placa de Arduino es la encargada de recibir las señales provenientes de los sensores y ejecutar la orden de encendido y apagado del elemento final de control. Para dicho fin, es acoplada a ella una PCB (*Printed Circuit Board*), la cual tiene un circuito impreso de pistas de cobre recubiertas de estaño que permiten el paso de las señales eléctricas tanto al Arduino como al relé de estado sólido. El relé de estado sólido funciona como interruptor, permitiendo el paso de la corriente eléctrica hacia el ventilador cuando la temperatura de control es superior al *set point* e interrumpiéndola cuando es inferior. En la Figura 12c se puede apreciar los elementos de control descritos anteriormente.

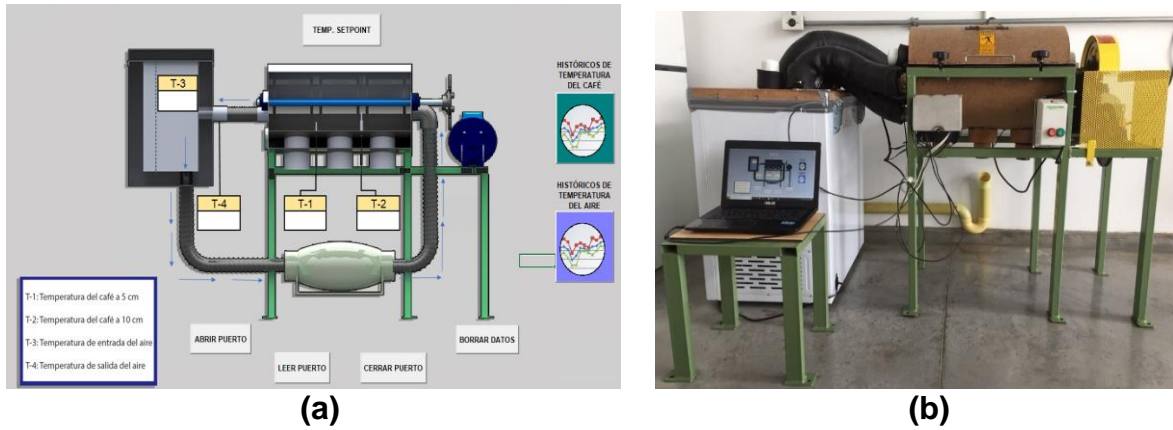
**Figura 12. (a) Imagen del sensor DS18B20 (b) localización de los sensores dentro de la cámara de fermentación (c) Elementos de control.**



### Interfaz gráfica de usuario

En la Figura 13a se puede apreciar el entorno visual de la interfaz, la cual cuenta con 4 botones en la parte inferior, 3 de ellos asociados al funcionamiento del puerto USB y otro para borrar los datos existentes. En la parte superior se encuentra un botón con la descripción “TEMP. SETPOINT”, el cual permite la modificación del *set point*. En la parte derecha se pueden observar dos botones, los cuales se encargan de la visualización gráfica y en tiempo real de los datos obtenidos por los diferentes sensores. La programación de la interfaz se realizó en Microsoft Excel, ya que es una herramienta de cálculo muy conocida, que maneja un lenguaje de programación sencillo y es de fácil acceso para los usuarios. Por último, se muestra en la Figura 13b el prototipo de fermentador ensamblado y con la interfaz implementada.

**Figura 13. (a) Interfaz gráfica de usuario (b) prototipo ensamblado y con la interfaz implementada.**



### 3.3. Validación funcional y de desempeño del fermentador controlado de café.

En esta etapa se realizaron pruebas funcionales con las cuales se pudieron detectar algunas falencias operacionales que debieron ser corregidas. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los hallazgos y ajustes realizados.

**Tabla 4. Hallazgos y ajustes del prototipo de fermentador controlado.**

Hallazgo encontrado	Ajuste realizado
Aumento acelerado de la temperatura del congelador cuando el sistema estaba en funcionamiento. Atribuible a posibles fugas.	Incorporación de silicona en zonas con alta probabilidad de fugas, con lo cual se logró disminuir el aumento de temperatura en el congelador.
Baja capacidad de regulación del sistema en el tiempo y aumento progresivo de la temperatura del café, lo anterior debido a la limitación funcional del congelador, el cual no es capaz de enfriar rápidamente el aire recirculado	Inclusión de bolsas refrigerantes de gel al interior del congelador. Este ajuste permitió mejorar la capacidad de enfriamiento del congelador, pero no logró mantener estable todo el tiempo la temperatura al interior de éste.
Porcentaje de trilla (daño físico del café) superior al 50%, debido a la agitación del grano.	Cambio en el espesor de la fibra micro porosa de 3mm a 1 mm para disminuir la fricción del grano con la pared. Con este ajuste se logró disminuir a 30% de trilla.

Luego de realizar los ajustes necesarios se tomaron mediciones de algunas variables, con el fin de comparar los valores calculados a través de los balances energéticos y los valores medidos. En la Tabla 5 muestra el % de error generado.

**Tabla 5. Porcentajes de error entre valores calculados y medidos.**

<b>Variable</b>	<b>Valor calculado</b>	<b>Valor medido</b>	<b>error</b>
Caudal de operación ( $q_{op}$ )	250 [m <sup>3</sup> /h]	239,3 [m <sup>3</sup> /h]	4,3%
Temperatura exterior de la parte superior de la cámara ( $T_{pps}$ )	18,1 [°C]	20,2 [°C]	11,6%
Temperatura externa de la chaqueta ( $T_{pch}$ )	17,0 [°C]	17,9 [°C]	5,1%
Temperatura externa de la tubería ( $T_{pt}$ )	22,0 [°C]	20,4 [°C]	7,4%

En la Tabla 5 se puede apreciar que los errores asociados a los cálculos no superan el 12%, por lo cual, los valores medidos se acercan en gran medida a los valores calculados teóricamente.

Finalizada la fase de pruebas funcionales, se procedió a realizar dos pruebas experimentales bajo las condiciones mencionadas en la metodología. En la Tabla 6 se muestran los valores de pH inicial y final del mucílago del café fermentado. Dichos valores concuerdan con los reportados por Puerta y Echeverry [8]; Jackels *et al.* [23] y Córdoba & Guerrero [24]. Se observa que los valores finales de pH indican una menor acidez para los cafés del prototipo, debido al efecto directo que tiene la temperatura sobre las velocidades de reacción.

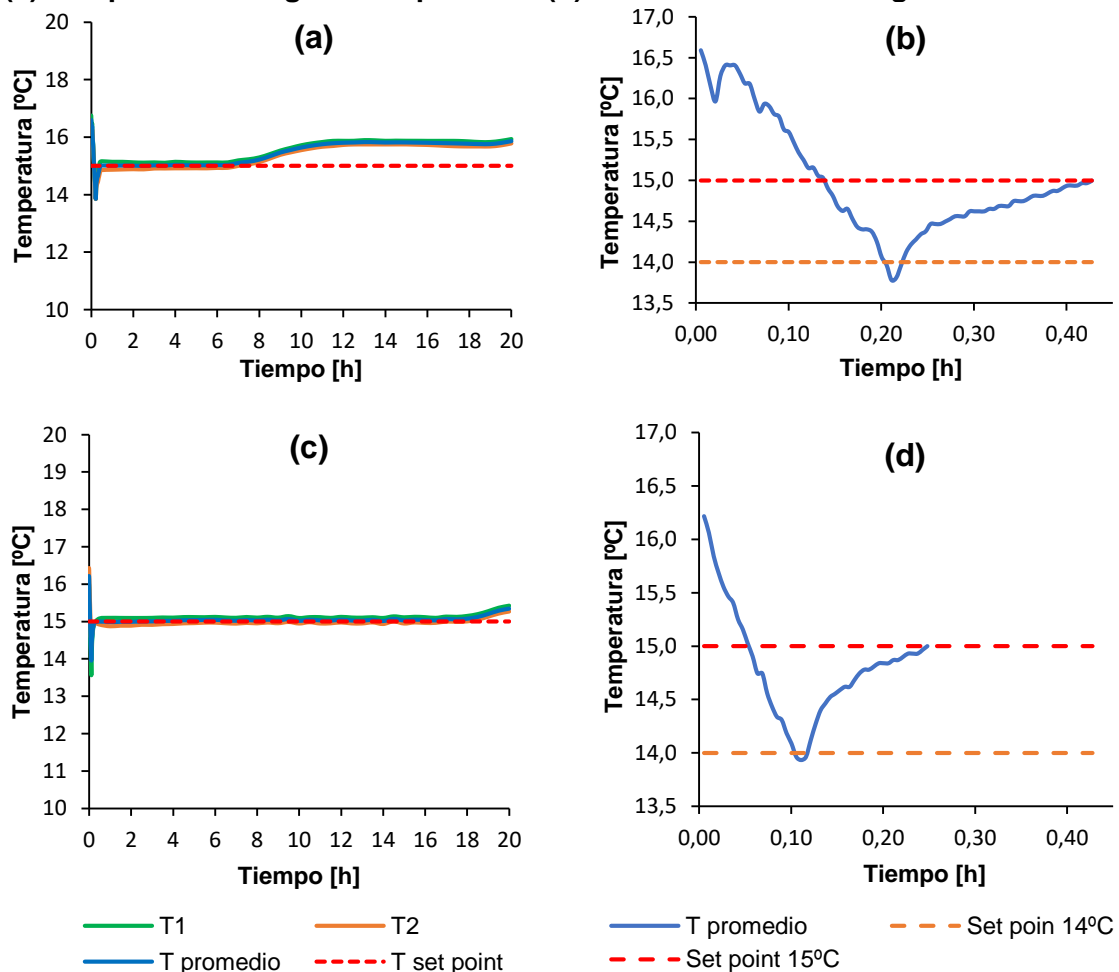
**Tabla 6. Valores de pH en las pruebas experimentales.**

<b>Variables</b>	<b>Prueba 1</b>		<b>Prueba 2</b>	
	<b>Fermentación controlada</b>	<b>Fermentación tradicional</b>	<b>Fermentación controlada</b>	<b>Fermentación tradicional</b>
<b>pH inicial</b>	5,12	5,12	5,02	5,02
<b>pH final</b>	4,58	4,30	4,57	4,29

Por otra parte, se muestra en las Figuras 14a y 14c la temperatura del grano de café en el prototipo para las pruebas 1 y 2, respectivamente. Los datos muestran en cada gráfica una diferencia promedio aproximada de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  entre las zonas T1 y T2, indicando la ausencia de perfiles de temperatura en la masa de café, y con ello la eficacia del sistema de agitación. Sin embargo, hay que recordar que la agitación continua generó un 30% de trilla. Este aspecto deja ver la necesidad de experimentar a futuro con tiempos y periodos de agitación que reduzcan el % en trilla sin comprometer la homogeneidad de la temperatura dentro del sistema.

Así mismo, en la Figura 14b y la Figura 14d se presenta un acercamiento de las Figuras 14a y 14c al inicio del proceso; tiempo en el cual se tuvo acoplado el sistema de aireación directa. En estas gráficas se observa un rápido descenso de la temperatura ( $-0,3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ), alcanzando el *set point* de  $14^{\circ}\text{C}$  en menos de 13 min. (aproximadamente el 1% del tiempo total de fermentación). Las diferencias entre las dos figuras se atribuyen a aspectos físicos entre los cafés utilizados, ya que en la prueba 2, el café presentaba un mayor tamaño de grano y por ende una mayor cantidad de mucílago favoreciendo el intercambio de energía.

**Figura 14. (a) Temperatura del grano en prueba 1 (b) acercamiento de la Figura 15a (c) Temperatura del grano en prueba 2 (d) acercamiento de la Figura 15c.**



En una segunda fase del proceso (en la regulación a  $15^{\circ}\text{C}$  para el inicio de la fermentación) se interrumpió la aireación directa y se utilizó solamente el sistema

de chaqueta. La capacidad de control del sistema se analizó a partir de gráficos de control estadísticos (Figura 15a y 15b). Para el actual proceso de fermentación se definió un rango de tolerancia de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , por lo cual el Límite Superior Especificado (LSE) fue de  $16^{\circ}\text{C}$  y el Límite inferior Especificado (LIE) fue de  $14^{\circ}\text{C}$ , para un Valor Ideal (VI) de  $15^{\circ}\text{C}$ . Los límites reales del proceso, como se muestra en la Tabla 7, se fijaron a partir de la media ( $\mu$ ) y la desviación típica ( $\sigma$ ) de los datos, expresados para observaciones como  $\mu = \bar{x}$  y  $\sigma = R/d_2$ ;  $d_2=1,128$  ( $\bar{x}$ : promedio de las observaciones; R: rango móvil promedio de las observaciones) [25].

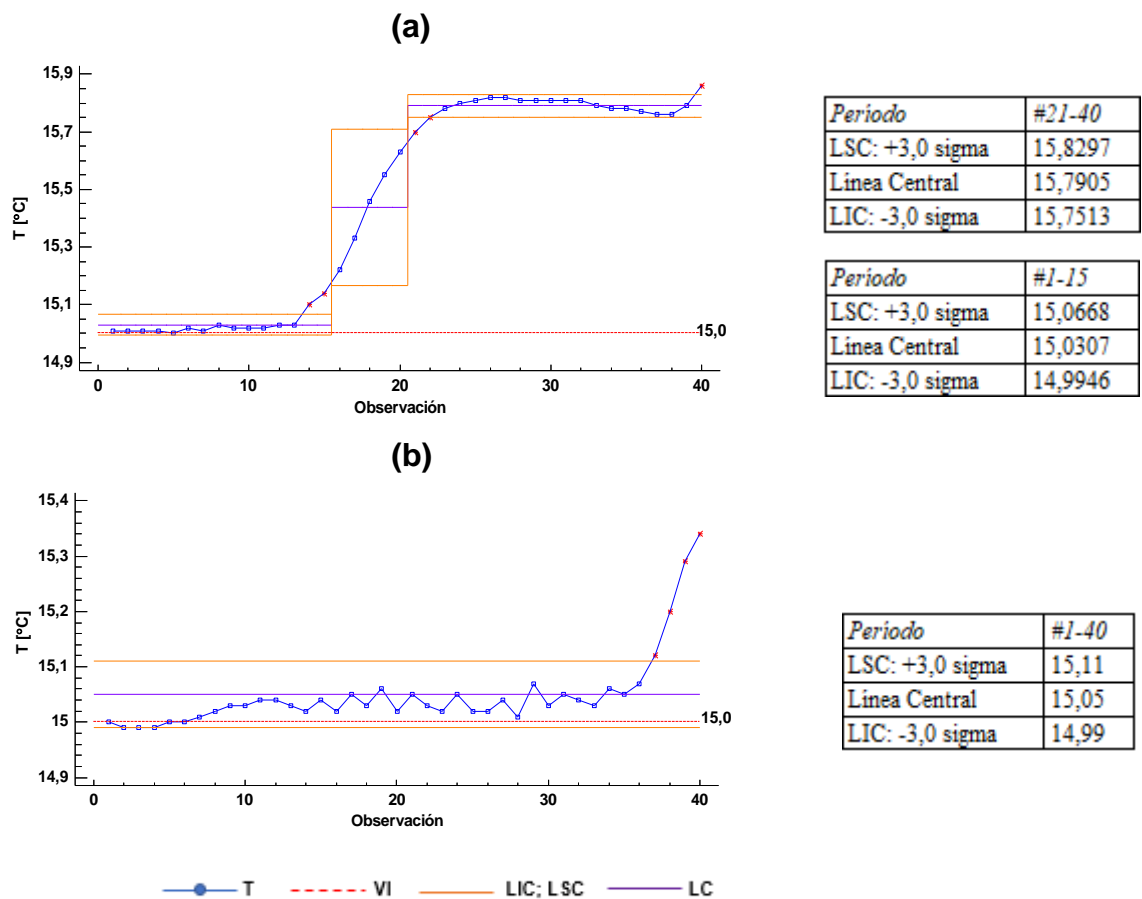
**Tabla 7. Fórmulas para determinar los límites de control.**

Límite Superior de Control (LSC)	$LSC = \mu + 3\sigma = \bar{x} + 3 R/d_2$
Línea Central (LC)	$LC = \mu = \bar{x}$
Límite Inferior de Control (LIC)	$LIC = \mu - 3\sigma = \bar{x} - 3 R/d_2$

Para mejorar la visualización de las gráficas se tomó el promedio de los datos obtenidos en intervalos de  $\frac{1}{2}$  h después de alcanzar los  $15^{\circ}\text{C}$ , de esta forma se obtuvieron 40 observaciones. La Figura 15a fue analizada en tres secciones debido al comportamiento presentado. De 0 a 8 h se aprecia que todos los valores de temperatura y la línea del valor ideal (VI) se encuentran dentro de los límites de control, por lo cual, para ese periodo de tiempo, el proceso estuvo controlado y tuvo una alta capacidad para regular cerca al valor ideal. Entre las 8 y 10 h se percibió un aumento de la temperatura debido a las limitaciones del congelador expuestas anteriormente y de 10 a 20 h se observa que todos los valores se encuentran dentro de los límites de control, pero la línea de valor ideal no, por tanto, para ese periodo de tiempo el proceso estuvo controlado, pero presentó una baja capacidad para regular cerca al valor ideal. En forma general, se puede concluir que durante la prueba 1 el proceso estuvo controlado ya que todos los valores de temperatura se mantuvieron dentro de los límites especificados ( $14^{\circ}\text{C}$  y  $16^{\circ}\text{C}$ ) pero hubo una pérdida de la capacidad para regular cerca del valor ideal (VI) después de 8h de fermentación.

En la Figura 15b se puede apreciar que la línea del valor ideal se mantuvo dentro de los límites de control durante todo el proceso y solo los valores correspondientes a las dos últimas horas se encuentran por fuera de dichos límites. Así mismo, todos los valores de temperatura se encuentran dentro de los límites especificados (14°C y 16°C). Lo anterior permite concluir que durante la prueba 2 el proceso se mantuvo controlado y hubo una gran capacidad para regular cerca al valor ideal durante 18 de las 20h de fermentación.

**Figura 15. (a) Gráfica de control de la prueba 1, (b) Gráfica de control de la prueba 2.**



Al finalizar la fase experimental y con ánimo de generar antecedentes para futuros proyectos, se evaluaron sensorialmente los cafés procesados. Dicha evaluación la realizó un catador certificado como *Q Arabiga Grader CQI*, quien describió los atributos percibidos y generó un puntaje global, el cual se muestra en la Tabla 8. En

ella se observa que todos los cafés se ubicaron en la clasificación especial (80 – 100 puntos). Sin embargo, el café del prototipo obtuvo un puntaje inferior, con lo cual se concluye que a las condiciones de operación establecidas no hubo mejoras en la calidad del café. Lo anterior se le puede atribuir a la baja acidez, la cual afecta el balance de sabor y la formación de compuestos volátiles precursores de aromas, lo que provocó la penalización en estos aspectos. Por otra parte, se destaca la reproducibilidad del puntaje obtenido para el café procesado en el prototipo, ya que 8 de los 10 aspectos tienen el mismo puntaje. En la Tabla 9 se muestran los perfiles sensoriales de los cafés procesados. En ella se aprecia que, a diferencia de la fermentación tradicional, el perfil obtenido para los cafés procesados en el prototipo es igual en cuanto a sabor, sabor residual y acidez.

**Tabla 8. Puntajes de la evaluación sensorial de los cafés procesados.**

Atributo	Prueba 1		Prueba 2	
	Fermentación controlada	Fermentación tradicional	Fermentación controlada	Fermentación tradicional
Fragancia/Aroma	7	7,25	7,25	7,75
Sabor	7,25	7,5	7,25	7,5
Sabor residual	7,25	7,75	7	7,25
Acidez	6,5	7,5	6,5	7,75
Cuerpo	7,5	7,5	7,5	7,25
Uniformidad	10	10	10	10
Balance	7	7,75	7	7,5
Taza limpia	10	10	10	10
Dulce	10	10	10	10
Impresión global	7,5	8	7,5	8
<b>Puntaje final</b>	<b>80</b>	<b>83,25</b>	<b>80</b>	<b>83</b>

**Tabla 9. Perfiles sensoriales de los cafés procesados.**

		Fragancia/Aroma	Sabor	Sabor residual	Acidez
Prueba 1	Fermentación controlada	Meloso, suave y consistente	Dulce caramelo	Dulce frutal	Cítrica, bajo
	Fermentación tradicional	Complejo, meloso, floral, vainilla	Dulce miel	Dulce chocolate blanco	Cítrica, limón, media, brillante
Prueba 2	Fermentación controlada	Cereal dulce, frutal sandía	Dulce caramelo	Dulce frutal	Cítrica, bajo, brillante
	Fermentación tradicional	Meloso, frutal	Dulce chocolate blanco	Dulzón	Cítrica, limón, media, brillante

Estos resultados preliminares son importantes si se considera que el café en baba fermentado en cada prueba tenía características iniciales diferentes (tamaño, cantidad de mucílago, entre otros) y permiten pensar que el uso del prototipo en la fermentación, bajo las mismas condiciones en las otras etapas del proceso de postcosecha, permite obtener cafés con puntajes iguales o muy parecidos y con un perfil característico, independientemente de las condiciones climáticas y del día en que se procese.

Costos del prototipo de fermentador controlado de café

La Tabla 10 resume el costo total de fabricación del prototipo, donde el costo de materiales representa un 50,4%, mano de obra un 28,5% y servicios un 21,1%. Así mismo, se estimó en la Tabla 11 el costo operacional del equipo. Para ello, se tuvo en cuenta una capacidad de 10 kg de café en baba, el consumo energético en 20 h de funcionamiento, un factor de conversión a café pergamino de 0,37 [21] y el precio del kWh establecido por la ESSA, 2018 [26] de 194,20 [COP/kWh].

**Tabla 10. Distribución de costos del prototipo de fermentador controlado.**

Concepto	Costo [COP]
Materiales y equipos	3'953.763
Mano de obra y CIF	2'233.325
Servicios de producción	1'653.763
<b>TOTAL</b>	<b>7'840.850</b>

**Tabla 11. Costo operacional del prototipo de fermentador controlado**

Parte	Potencia [kW]	Consumo [kWh]	Consumo [kWh/kg café pergamino]	Costo [COP/kg café pergamino]
<b>Ventilador</b>	0,044	0,88	0,24	46,61
<b>Congelador</b>	0,064	1,28	0,35	67,98
<b>Motor</b>	0,746	14,92	4,03	782,70
<b>TOTAL</b>				<b>897,29</b>

Con base en el costo operacional estimado, se espera que en futuros proyectos se busquen condiciones de operación que generen una mejora en la calidad del café y así superar el costo. Así mismo, se hace evidente desde el punto de vista económico el uso de la agitación en periodos de tiempo y no en forma continua, ya que disminuiría el consumo del motor, el cual representa el 88% del costo operacional.

## 4. CONCLUSIONES

- Se generó un banco de diseños conceptuales para un fermentador controlado de café implementando una metodología de diseño de nuevo producto, y se seleccionó de dicho banco, un diseño innovador con el objetivo de mantener el café a una temperatura deseada, evitar perfiles de temperatura en su interior y tener una respuesta rápida para llegar al *set point*.
- Con base en los requerimientos, se realizó el diseño de las partes que conformaron el prototipo para una capacidad de 10kg de café en baba, el cual contó con un sistema de agitación para eliminar posibles perfiles de temperatura, un sistema de aireación encargado de regular la temperatura del grano de café y una interfaz gráfica, la cual le permite interactuar al usuario de forma sencilla con los datos obtenidos y los valores de *set point*.
- En la implementación del prototipo bajo las condiciones operacionales establecidas, se logró mantener la temperatura del grano de café dentro de la tolerancia especificada para el proceso de  $\pm 1$  °C, durante las 20 h de fermentación. Así mismo, se mantuvo una temperatura homogénea en toda la masa de café y se observó una rápida respuesta inicial utilizando el sistema de aireación directa, encontrándose una velocidad promedio de  $-0,3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . No obstante, el uso continuo de la agitación ocasionó una trilla del 30%.
- Finalmente, el análisis sensorial mostró que el café procesado en el prototipo a las condiciones establecidas se encontraba dentro de la categoría especial, pero no evidenció una mejora en el puntaje final con respecto a la fermentación tradicional. Sin embargo, se apreció que el café fermentado en el equipo tuvo un puntaje igual y un perfil sensorial muy similar, lo cual representaría un avance en busca de mantener un puntaje y un perfil característico del café durante la época de cosecha, donde las condiciones ambientales pueden cambiar significativamente.

## 5. RECOMENDACIONES

- Reemplazar el congelador por un sistema de refrigeración especialmente diseñado para el prototipo, el cual tenga la capacidad de refrigerar rápidamente el aire recirculado y mantenga la temperatura constante del aire refrigerante.
- Establecer fermentaciones variando la temperatura de *set point* y el tiempo de fermentación, en busca de condiciones operacionales que generen mejoras en la calidad del café.
- Estudiar tiempos y periodos de agitación dentro del equipo que permitan disminuir el % de trilla en los granos de café sin comprometer la homogeneidad de la temperatura.
- Estudiar experimentalmente la cinética de la fermentación del café en busca de una mejor estimación del calor metabólico que permita en un futuro un correcto escalado térmico del prototipo.
- Realizar caracterizaciones fisicoquímicas y estudios microbiológicos al café fermentado en el prototipo, con el fin de identificar compuestos y microorganismos diferenciadores que ayuden a explicar el perfil sensorial obtenido.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICO. Total production by all exporting countries. Statics, Historical Date. [En línea]. International coffee organization. (Recuperado en 17 julio 2018). Disponible en [http://www.ico.org/new\\_historical.asp?section=Statistics](http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics)

[2] EL TIEMPO. Producción cafetera del país fue de 14,2 millones de sacos. [En línea]. Bogotá. Economía y negocios. 2018. (Recuperado en 10 julio 2018). Disponible en: <http://www.eltiempo.com/economia/sectores/produccion-de-cafe-en-colombia-en-2017-167590>

[3] ROJAS TRUJILLO, Juan Fernando. La otra cumbre de 80 mil familias cafeteras en Antioquia. [En línea]. El colombiano. 2017. [Recuperado en 13 julio 2018]. Disponible en <http://www.elcolombiano.com/negocios/cumbre-mundial-cafetera-en-medellin-asi-van-los-productores-CK6873466>

[4] ROGERS, Laura. El árbol de café: parte 1 de “Todas sobre el café”. [En línea]. Rogers family Company. 2012. [Recuperado en 9 marzo 2018]. Disponible en <http://www.rogersfamilyco.com/index.php/el-arbol-de-cafe-parte-1-de-todas-sobre-el-cafe/>

[5] PUERTA QUINTERO, Gloria. Influencia el proceso de beneficio en la calidad del café. En: Revista del centro nacional de investigaciones de café. 1999, vol.50, no.1., p. 78 – 88.

[6] PUERTA QUINTERO, Gloria. Buenas prácticas agrícolas para el café. En: Avances técnicos Cenicafé. Julio, 2006, no.349., p. 12. ISSN 0120-0178.

[7] PUERTA QUINTERO, Gloria. Factores, procesos y controles en la fermentación de café. En: Avances técnicos Cenicafé. Agosto, 2012, no.422., p. 12. ISSN 0120-0178.

[8] PUERTA QUINTERO, Gloria y ECHEVERRY MOLINA, José. Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad. En: Avances técnicos Cenicafé. Abril, 2015, no.454., p. 12. ISSN 0120-0178.

[9] PEÑUELA MARTÍNEZ, Aida. Estudio de la remoción del mucílago de café a través de fermentación natural. Manizales, 2010. Tesis de maestría (Desarrollo sostenible y medio ambiente). Universidad de Manizales.

[10] PUERTA QUINTERO, Gloria. Composición química de una taza de café. En: Avances técnicos Cenicafé. Diciembre, 2011, no.414., p.12. ISSN 0120-0178.

[11] ZAPATA, Arley. [et al.]. Investigación sobre cafés especiales. Línea de investigación fermentación. Medellín, 2015. Informa técnico. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y Gobernación de Antioquía. p. 134 – 204.

[12] OLIVEROS, Carlos. [et al.]. ECOMILL<sup>®</sup>. Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. En: Avances técnicos Cenicafé. Junio, 2013, no.432., p. 8. ISSN 0120-0178.

[13] AGÁMEZ HERNÁNDES, Jennifer. Determinación de la viabilidad técnica para la automatización de un biorreactor usado para la fermentación de café de la empresa Penagos hermanos. Bucaramanga, 2017. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones.

- [14] ULRICH, Karl T y EPPINGER, Steven D. Diseño y desarrollo de productos. 5ta ed. México: McGraw-Hill, 2012. p. 120 – 178.
- [15] MITCHELL, David. [et al.]. Scale-up strategies for packedbed bioreactors for solid-state fermentation: Process Biochem, 1999. p.167–178.
- [16] BAILEY, James Edwin y OLLIS David F. Biochemical engineering fundamentals. Estados unidos de América: McGraw-Hill,1977. p. 473 – 487.
- [17] ÇENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. 3ra ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. p. 355 – 709. ISBN – 13: 978-970-10-6173-2.
- [18] ÇENGEL, Yunus A y CIMBALA John M. Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicación. 1ra ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. p. 321 – 399. ISBN 970-10-5612-4.
- [19] FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS. Nuestras regiones cafeteras. [En línea]. Café de Colombia. 2010. [Recuperado en 25 julio 2018]. Disponible en [http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la\\_tierra\\_del\\_cafe/regiones\\_cafeteras/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/regiones_cafeteras/)
- [20] MITCHELL, David; KRIEGER, Nadia y BEROVIC Marin. Solid – State Fermentation Bioreactors: Fundamentals of desing and operation. Germany: Springer, 2006. p. 439.
- [21] PÉREZ MONTILLA, Jimena. [et al.]. Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. En: Avances técnicos Cenicafé. Abril, 2008, no.370. p 8. ISSN: 0120-0178.

[22] SOLER & PAUL. Ventilation Group. Manual técnico de los ventiladores TD-Silent ventilador helicocentrífugo. p. 38-40.

[23] JACKELS, S. [*et al.*]. Control of the coffee fermentation process and quality of resulting roasted coffee: Studies in the field laboratory and on small farms in Nicaragua during the 2005-06 harvest. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. Septiembre 11-15, 2006. París, Montpellier: ASIC, p. 434-442.

[24] CÓRDOBA CASTRO, Nancy y GUERRERO FAJARDO, Jesús. Caracterización de los procesos tradicionales de fermentación de café en el departamento de Nariño. En: Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial. Julio-diciembre, 2016, vol.14, no.2. Popayán: Taller editorial universidad del Cauca, p. 75– 83.

[25] LOMBARDERO, Luis. Gráfico de control por variables. Bureau Veritas Formación, S.A. España, 2010, p. 28.

[26] ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. (ESSA). Tarifas residenciales para periodo 2018-6. [En línea]. (Recuperado en 26 julio 2018). Disponible en <http://www.essa.com.co/site/clientes/es-es/tarifas/consultartarifas.aspx>

## BIBLIOGRAFÍA

AGÁMEZ HERNÁNDES, Jennifer. Determinación de la viabilidad técnica para la automatización de un biorreactor usado para la fermentación de café de la empresa Penagos hermanos. Bucaramanga, 2017. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones.

BAILEY, James Edwin y OLLIS David F. Biochemical engineering fundamentals. Estados unidos de América: McGraw-Hill, 1977. p. 473 – 487.

ÇENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. 3ra ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. p. 355 – 709. ISBN – 13: 978-970-10-6173-2.

ÇENGEL, Yunus A y CIMBALA John M. Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicación. 1ra ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. p. 321 – 399. ISBN 970-10-5612-4.

CÓRDOBA CASTRO, Nancy y GUERRERO FAJARDO, Jesús. Caracterización de los procesos tradicionales de fermentación de café en el departamento de Nariño. En: Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial. Julio – diciembre, 2016, vol.14, no.2. Popayán: Taller editorial universidad del Cauca, p. 75 – 83.

EL TIEMPO. Producción cafetera del país fue de 14,2 millones de sacos. [En línea]. Bogotá. Economía y negocios. 2018. (Recuperado en 10 julio 2018). Disponible en: <http://www.eltiempo.com/economia/sectores/produccion-de-cafe-en-colombia-en-2017-167590>

ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. (ESSA). Tarifas residenciales para periodo 2018-6. [En línea]. (Recuperado en 26 julio 2018). Disponible en <http://www.essa.com.co/site/clientes/es-es/tarifas/consultartarifas.aspx>

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS. Nuestras regiones cafeteras. [En línea]. Café de Colombia. 2010. [Recuperado en 25 julio 2018]. Disponible en [http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la\\_tierra\\_del\\_cafe/regiones\\_cafeteras/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/regiones_cafeteras/)

ICO. Total production by all exporting countries. Statics, Historical Date. [En línea]. International coffee organization. (Recuerado en 17 julio 2018). Disponible en [http://www.ico.org/new\\_historical.asp?section=Statistics](http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics)

JACKELS, S. [*et al.*]. Control of the coffee fermentation process and quality of resulting roasted coffee: Studies in the field laboratory and on small farms in Nicaragua during the 2005-06 harvest. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. Septiembre 11-15, 2006. París, Montpellier: ASIC, p. 434-442.

LOMBARDERO, Luis. Gráfico de control por variables. Bureau Veritas Formación, S.A. España, 2010, 28 p.

MITCHELL, David; KRIEGER, Nadia y BEROVIC Marin. Solid – State Fermentation Bioreactors: Fundamentals of desing and operation. Germany: Springer, 2006. p. 439.

MITCHELL, David. [*et al.*]. Scale-up strategies for packedbed bioreactors for solid-state fermentation: Process Biochem, 1999. pp.167–178.

OLIVEROS, Carlos. [*et al.*]. ECOMILL<sup>®</sup>. Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. En: Avances técnicos Cenicafé. Junio, 2013, no.432., p. 8. ISSN 0120-0178.

PEÑUELA MARTÍNEZ, Aida. Estudio de la remoción del mucílago de café a través de fermentación natural. Manizales, 2010. Tesis de maestría (Desarrollo sostenible y medio ambiente). Universidad de Manizales.

PÉREZ MONTILLA, Jimena. [et al.]. Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. En: Avances técnicos Cenicafé. Abril, 2008, no.370. p 8. ISSN: 0120-0178.

PUERTA QUINTERO, Gloria. Buenas prácticas agrícolas para el café. En: Avances técnicos Cenicafé. Julio, 2006, no.349., p. 12. ISSN 0120-0178.

PUERTA QUINTERO, Gloria y ECHEVERRY MOLINA, José. Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad. En: Avances técnicos Cenicafé. Abril, 2015, no.454., p. 12. ISSN 0120-0178.

PUERTA QUINTERO, Gloria. Influencia el proceso de beneficio en la calidad del café. En: Revista del centro nacional de investigaciones de café. 1999, vol.50, no.1., p. 78 – 88.

PUERTA QUINTERO, Gloria. Factores, procesos y controles en la fermentación de café. En: Avances técnicos Cenicafé. Agosto, 2012, no.422., p. 12. ISSN 0120-0178.

PUERTA QUINTERO, Gloria. Composición química de una taza de café. En: Avances técnicos Cenicafé. Diciembre, 2011, no.414., p.12. ISSN 0120-0178.

ROGERS, Laura. El árbol de café: parte 1 de “Todas sobre el café”. [En línea]. Rogers family Company. 2012. [Recuperado en 9 marzo 2018]. Disponible en <http://www.rogersfamilyco.com/index.php/el-arbol-de-cafe-parte-1-de-todas-sobre-el-cafe/>

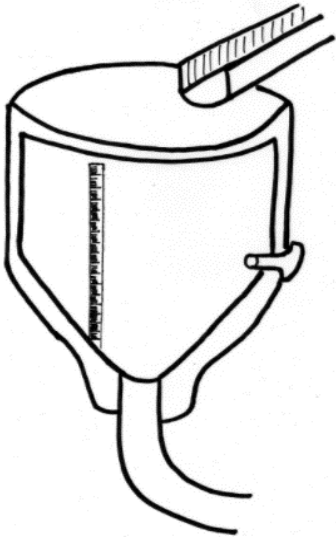
ROJAS TRUJILLO, Juan Fernando. La otra cumbre de 80 mil familias cafeteras en Antioquia. [En línea]. El colombiano. 2017. [Recuperado en 13 julio 2018]. Disponible en <http://www.elcolombiano.com/negocios/cumbre-mundial-cafe-terera-en-medellin-asi-van-los-productores-CK6873466>

SOLER & PAUL. Ventilation Group. TD-Silent ventilador helicocentrífugo. p. 38.  
ULRICH, Karl T y EPPINGER, Steven D. Diseño y desarrollo de productos. 5ta ed. México: McGraw-Hill, 2012. p. 120 – 178.

ZAPATA, Arley. [et al.]. Investigación sobre cafés especiales. Línea de investigación fermentación. Medellín, 2015. Informa técnico. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y Gobernación de Antioquía. p. 134 – 204.

## ANEXOS

### Anexo A. Ejemplo de matriz DOFA para uno de los 24 conceptos de diseño

<i>Proponente</i>	<i>Bosquejo</i>	<i>Fortalezas mayores</i>	<i>Debilidades mayores</i>
Gabriela Medina	<p style="text-align: center;"><i>Diana Gabriela Medina</i></p> 	La forma implementada permite una sencilla descarga del equipo	La orientación vertical hace que la masa del café se compacte dentro del equipo disminuyendo los espacios vacíos entre los granos de café
		<b><i>Fortalezas menores</i></b>	<b><i>Debilidades mayores</i></b>
		su forma vertical hace que el espacio ocupado por el equipo sea bajo	Generación de perfiles de temperatura y una lenta respuesta al control debido a que sólo se encuentra la chaqueta de enfriamiento para el intercambio de calor
		<b><i>Debilidades menores</i></b>	<b><i>Debilidades menores</i></b>
		capacidad de trabajar en sólido o sumergido cerrando el sistema de descarga	necesidad de agregar agua al equipo para su descarga

<i>oportunidades</i>	<i>Amenazas</i>
la forma es similar a la ECOMILL lo que facilitaría la aceptación en los clientes	El equipo se vería limitado para su limpieza si se encuentra en una zona con escasez de agua

**Figura A1. Ejemplo de matriz DOFA para un concepto de diseño.**

## Anexo B. Matriz de criterios ponderados

### Perfil de los evaluadores de los conceptos

Los conceptos fueron evaluados por el área de investigación y desarrollo de Penagos Hermanos, en la Tabla B1 se encuentra el perfil y los conocimientos que aportaron cada evaluador.

**Tabla B1. Perfil de los evaluadores de los conceptos de diseño.**

No	Asistentes	Criterios de evaluación					
		Factibilidad técnica y operativa	Factibilidad de ingeniería del proceso	Factibilidad ambiental	Factibilidad legal	Factibilidad financiera	Carácter innovador
1	Víctor Prada	x	x		x	x	x
2	Alexander Guerrero	x	x			x	
3	Dalia Galvis			x	x	x	x
4	Carlos Gonzales	x	x				
5	Fernando Cabarique	x	x			x	
6	Jennifer Agámez		x		x		x
7	Henry Ortega	x		x			x

### Criterios de ponderación y evaluación de conceptos de diseño

Los criterios de ponderación fueron establecidos en conjunto con el director y el codirector del proyecto y se hicieron con base en la importancia que representaba cada uno en el diseño del prototipo.

**Tabla B2. Criterios ponderados y de evaluación para los conceptos de diseño.**

PONDERACIÓN	
Incidencia del enunciado en la evaluación	Valor numérico de la incidencia del enunciado en la evaluación
Esencial	5
Muy conveniente	4
Conveniente	3
Recomendable	2
Deseable	1

EVALUACIÓN	
Criterio de evaluación	Valor numérico del criterio de evaluación
Cumple totalmente	5
Cumple en alto grado	4
Cumple aceptablemente	3
Cumple escasamente	2
No cumple	1

Evaluación de los criterios

**Tabla B3. Evaluación de los conceptos de diseño.**

<b>CRITERIO</b>	<b>No.</b>	<b>ENUNCIADO</b>	<b>INCIDENCIA DEL ENUNCIADO EN LA EVALUACIÓN</b>	<b>VALOR NUMÉRICO DE LA INCIDENCIA DEL ENUNCIADO EN LA EVALUACIÓN</b>
<b>Factibilidad técnica y operativa</b>	1	El diseño del equipo asegura las condiciones de inocuidad del proceso (materiales, contaminación externa, entre otros)	Muy conveniente	4
	2	El equipo presenta una buena estética	Recomendable	2
	3	El equipo requiere poco espacio	Conveniente	3
	4	Los procesos de fabricación del equipo son sencillos	Muy conveniente	4
	5	El sistema de descarga del equipo es adecuado en aspectos de forma, funcionalidad y sencillez de fabricación	Esencial	5
	6	El equipo es de fácil limpieza y consume poca agua	Esencial	5
	7	El equipo requiere poco mantenimiento	Muy conveniente	4
	8	El equipo es de fácil operación y presenta una interfaz amigable con el cliente en las etapas de: carga, puesta en marcha y seguimiento de variables de operación	Esencial	5
	9	La instalación del equipo podría ser realizada en cualquier finca	Muy conveniente	4
	10	El equipo puede llegar a ser versátil en su construcción para permitir fermentaciones en seco o en sumergido	Conveniente	3
	11	El equipo no representa riesgos físicos	Esencial	5
<b>Factibilidad de ingeniería del proceso</b>	12	El consumo de energía es bajo en el equipo en referencia a accesorios, motores, entre otros	Esencial	5
	13	No se generan perfiles de temperatura dentro del equipo (Homogeneidad de la temperatura en toda la masa de café)	Esencial	5
	14	El sistema de control de temperatura tendrá una rápida respuesta	Esencial	5
	15	La forma del equipo permite realizar el escalado de forma sencilla	Esencial	5
<b>Factibilidad ambiental</b>	16	La sustancia para el control de temperatura es amigable con el medio ambiente	Esencial	5
<b>Factibilidad legal</b>	17	El equipo se ajustaría a la normatividad legal y reglamentaria asociada al procesamiento de alimentos, a la seguridad industrial e impactos ambientales en la mayoría de países de comercialización	Esencial	5
<b>Factibilidad financiera</b>	18	El costo de fabricación del equipo es bajo teniendo en cuenta los siguientes aspectos: materiales, mano de obra y servicios	Esencial	5
	19	El costo de operación del equipo es bajo	Muy conveniente	4
<b>Carácter innovador</b>	20	La ingeniería requerida para el diseño es de alto nivel y el equipo difícilmente podrá ser copiado por la competencia	Muy conveniente	4
<b>TOTAL</b>				<b>87</b>

**Tabla B4. Continuación de la Tabla B3.**

Enunciado No.	EVALUACIÓN					
	CONCEPTO 1	CONCEPTO 2	CONCEPTO 3	CONCEPTO 4	CONCEPTO 5	CONCEPTO 6
1	3	4	4	3	3	4
2	3	5	4	5	5	4
3	4	5	3	5	5	3
4	5	4	5	3	2	4
5	3	4	5	4	5	4
6	4	5	5	4	4	5
7	5	5	4	2	1	4
8	2	3	2	4	4	5
9	5	5	5	5	3	4
10	4	3	2	2	1	3
11	5	5	4	4	3	4
12	5	5	5	2	1	2
13	3	2	3	5	5	5
14	2	3	4	4	4	4
15	5	5	5	2	2	5
16	5	5	5	5	5	5
17	4	4	4	4	4	4
18	4	4	4	2	1	4
19	4	4	4	2	3	4
20	1	1	1	4	5	3
	3,82	4,03	3,97	3,53	3,29	4,06

### Anexo C. Cálculo del caudal de aire requerido

Balance de energía en el sistema:

$$Q_{sistema} = Q_{met.} + Q_{trans.} [kJ/h] \quad (Ec. 1)$$

el calor transferido ( $Q_{trans.}$ ) es considerado como la suma del calor ganado por la parte superior de la cámara de fermentación ( $Q_{ps}$ ), por la superficie externa de la chaqueta ( $Q_{ch}$ ) y por las superficies externas de las tuberías ( $Q_{tub}$ ). Por tanto:

$$Q_{trans.} = Q_{ps} + Q_{ch} + Q_{tub} [kJ/h] \quad (Ec. 2)$$

calor generado por la fermentación del mucílago del café (calor metabólico)

Para estimar el calor máximo que puede generar el metabolismo de los microorganismos presentes en el mucílago del café, se utiliza la siguiente expresión (Mitchell, 1999) usada en fermentaciones de sustrato sólido.

$$Q_{met.} = 0.25 m_s X_{m\acute{a}x} Y_q \mu_{m\acute{a}x} [kJ/h] \quad (Ec. 3)$$

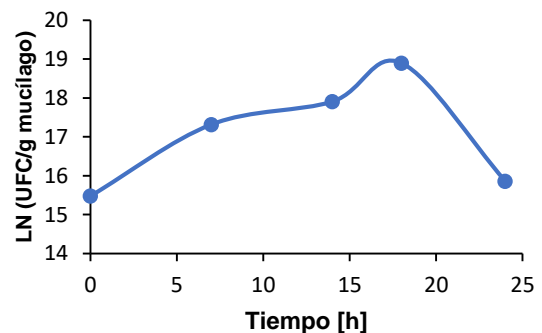
Donde  $m_s$  [ $kg_{sustrato}$ ] hace referencia a la masa de sustrato,  $X_{m\acute{a}x}$  [ $kg_{biomasa}/kg_{sustrato}$ ] al contenido máximo de biomasa,  $Y_q$  [ $kJ/kg_{biomasa}$ ] al coeficiente de rendimiento de calor metabólico,  $\mu_{m\acute{a}x}$  [ $1/h$ ] a la constante de crecimiento máxima y

La masa de sustrato hace referencia a la materia seca fermentable que se encuentra en el mucílago de café en baba (carbohidratos, proteínas y lípidos). Se conoce que el 11% de la composición del café en baba corresponde al mucílago y de este porcentaje el 9,6% corresponde a la composición de carbohidratos, proteínas y lípidos (Puerta, 2012). Por tanto, al partir de 10 kg de café, la masa de sustrato será  $m_s = 10 * 0,11 * 0,096 = 0,1056 kg_{sustrato}$ .

La constante de crecimiento máximo fue estimada de la curva de crecimiento obtenida de los resultados del recuento microbiológico de una fermentación a 15°C realizada por la UDES para Penagos Hermanos y Cía. S.A.S.

Los valores de UFC corresponden al promedio de tres réplicas de conteo por cada hora.

Fermentación a 15°C (DILUCION 10 e-5)		
Tiempo [h]	UFC/g mucílago	LN (UFC/g muc)
0	5.27E+06	15.47690884
7	3.33E+07	17.32006645
14	6.00E+07	17.91041052
18	1.61E+08	18.89836317
24	7.73E+06	15.86105076



**Figura C1. Curva de crecimiento de microorganismos en la fermentación de café en baba a 15°C.**

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{17,3200 - 15,4769}{7 - 0} = 0,26 [h^{-1}] \quad (Ec. 4)$$

El contenido máximo de biomasa se aproxim al encontrado en la literatura para fermentaciones en medio sólido  $X_{m\acute{a}x} = 0,125 [kg_{biomasa}/kg_{sustrato}]$  (Bailey, 1977).

Por otra parte, el valor del coeficiente de rendimiento de calor metabólico es estimado a partir de siguiente expresión (Bailey, 1977).

$$Y_q = \frac{1}{Y_\Delta} [kJ/kg_{biomasa}] \quad (Ec. 5)$$

Donde  $Y_\Delta$  representa la cantidad de masa celular por cantidad de calor producido y cuya expresión matemática es (Bailey, 1977).

$$Y_\Delta = \frac{Y_{x/s}}{(\Delta H_s - Y_{x/s} \Delta H_c)} [kg_{biomasa}/kJ] \quad (Ec. 6)$$

Donde  $Y_{x/s}$  representa el coeficiente de rendimiento sustrato-biomasa,  $\Delta H_s$  el calor de combustión para el sustrato (materia seca del mucílago) y  $\Delta H_c$  el calor de combustión para la biomasa.

Debido a que no se cuentan con datos experimentales sobre el comportamiento del sustrato sobre la fermentación natural del café en baba, el valor de rendimiento biomasa-sustrato fue tomado de la literatura para microorganismos que actúan en sustratos de glucosa, por tanto  $Y_{x/s} = 0,51 [kg_{biomasa}/kg_{sustrato}]$  (Bailey, 1977).

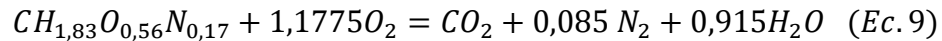
El valor de  $\Delta H_s$  se estima en forma similar al aporte calórico de los alimentos, tomando el aporte de los carbohidratos, proteínas y lípidos como  $4 Kcal/g_{carbohidrato}$ ,  $4 Kcal/g_{proteína}$  y  $9 Kcal/g_{lípido}$  respectivamente. De esta forma, para 1 kg de mucílago cuya composición en base seca es 89,06% carbohidratos (c), 9,69% proteínas (p) y 1,25% Lípidos (l) (Puerta, 2012) se tendrá:

$$\Delta H_s = \frac{890,6 g_c}{1 kg_{M.S muc}} \left( \frac{4 Kcal}{g_c} \right) + \frac{96,9 g_p}{1 kg_{M.S muc}} \left( \frac{4 Kcal}{g_p} \right) + \frac{812,5 g_l}{1 kg_{M.S muc}} \left( \frac{9 Kcal}{g_l} \right) \quad (Ec. 7)$$

$$\Delta H_s = 4062,5 \frac{Kcal}{kg_{M.S muc}} = 17008,85 \frac{kJ}{kg_{M.S muc}} \quad (Ec. 8)$$

Finalmente, el calor de combustión asociado a la biomasa se puede calcular utilizando el método descrito en Bailey, 1977, donde dicho valor se estima a partir de la composición celular promedio y siguiendo los siguientes pasos.

1. Balance para el microorganismo principal (*Saccharomyces cerevisiae* con fórmula molecular  $CH_{1,83}O_{0,56}N_{0,17}$ )



2. Calor de combustión tomado como 436160,36 kJ por mol de  $O_2$ .

3. Cálculo del calor celular de combustión con la siguiente expresión

$$\Delta H_c = \frac{(1,1775 \text{ mol } O_2)(436160,36 \text{ kcal/mol } O_2)}{1(12) + 1,83(1) + 0,56(16) + 0,17(14)} = 20404,403 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{biom}} \quad (Ec. 10)$$

Al reemplazar los valores estimados en la Ecuación 6

$$Y_{\Delta} = \frac{0,51}{(17008,85 - 0,51 * 20404,403)} = 7,7242 * 10^{-5} \text{ [kg}_{biomasa}/\text{kJ}] \quad (Ec. 11)$$

Reemplazando en 5,

$$Y_q = \frac{1}{7,7242 * 10^{-5}} = 12946,28 \text{ [kJ/kg}_{biomasa}] \quad (Ec. 12)$$

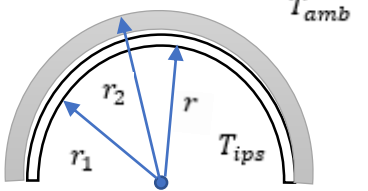
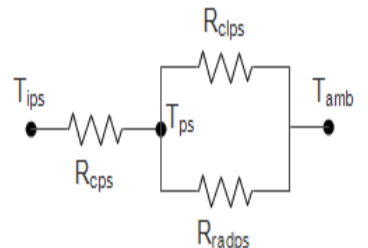
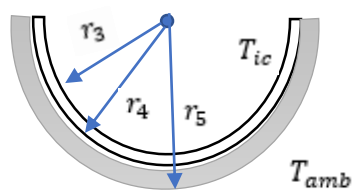
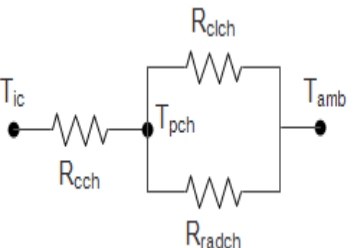
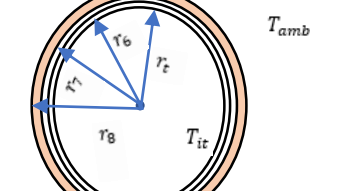
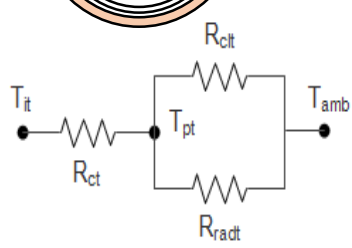
Ahora, se puede obtener la estimación del calor metabólico máximo al reemplazar los parámetros en 3.

$$Q_{met.} = 0,25 * 0,1056 * 0,125 * 12946,28 * 0,26 = \mathbf{11,108 \text{ [kJ/h]}} \quad (Ec. 13)$$

#### calor transferido hacia el fermentador (Planteamiento de circuitos térmicos)

Para la estimación del calor transferido se plantearon circuitos térmicos en las tres zonas donde se tendría transferencia de calor por efectos conductivos, convectivos y de radiación (Cengel, 2007).

Donde  $K$  representa conductividades térmicas [kJ/h m K],  $h_c$  el coeficiente de transferencia de calor por convección libre [kJ/h m<sup>2</sup> K].  $h_r$  coeficiente de transferencia de por radiación [kJ/h m<sup>2</sup> K],  $T_p$  la temperatura de pares externa [K],  $T_{ip}$  la temperatura de pared interna [K] y  $T_{amb}$  la temperatura ambiental [K].

Circuito térmico para la parte superior	Circuito térmico para zona de chaqueta	Circuito térmico para la zona de tubería
 	 	 
<p>Resistencia por conducción (<math>R_{cps}</math>) [K h/ kJ]</p>	<p>Resistencia por conducción (<math>R_{cch}</math>) [K h/ kJ]</p>	<p>Resistencia por conducción (<math>R_{ct}</math>) [K h/ kJ]</p>
$R_{cps} = \frac{\ln(r_1/r)}{\pi L K_{acero}} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{\pi L K_{corcho}}$	$R_{cch} = \frac{\ln(r_4/r_3)}{\pi L K_{acero}} + \frac{\ln(r_5/r_4)}{\pi L K_{corcho}}$	$R_{ct} = \frac{\ln(r_6/r_t)}{2\pi L K_{PVC}} + \frac{\ln(r_7/r_6)}{2\pi L K_{poliester}} + \frac{\ln(r_8/r_7)}{2\pi L K_{espuma}}$
<p>Resistencia por convección (<math>R_{clps}</math>) [K h/ kJ]</p>	<p>Resistencia por convección (<math>R_{clch}</math>) [K h/ kJ]</p>	<p>Resistencia por convección (<math>R_{clt}</math>) [K h/ kJ]</p>
$R_{clps} = \frac{1}{\pi L r_2 h_{cps}}$	$R_{clch} = \frac{1}{\pi L r_5 h_{cch}}$	$R_{clt} = \frac{1}{2\pi L r_8 h_{ct}}$
<p>Resistencia por radiación (<math>R_{radps}</math>) [K h/ kJ]</p>	<p>Resistencia por radiación (<math>R_{radch}</math>) [K h/ kJ]</p>	<p>Resistencia por radiación (<math>R_{radt}</math>) [K h/ kJ]</p>
$R_{radps} = \frac{1}{\pi L r_2 h_{rps}}$	$R_{radch} = \frac{1}{\pi L r_5 h_{rch}}$	$R_{radt} = \frac{1}{2\pi L r_8 h_{rt}}$
<p>Resistencia equivalente (<math>R_{eq.ps}</math>) [K h/ kJ]</p>	<p>Resistencia equivalente (<math>R_{eq.ch}</math>) [K h/ kJ]</p>	<p>Resistencia equivalente (<math>R_{eq.t}</math>) [K h/ kJ]</p>
$R_{eq.ps} = \frac{R_{clps} * R_{radps}}{R_{clps} + R_{radps}}$	$R_{eq.ch} = \frac{R_{clch} * R_{radch}}{R_{clch} + R_{radch}}$	$R_{eq.t} = \frac{R_{clt} * R_{radt}}{R_{clt} + R_{radt}}$
<p>Calor transferido (<math>Q_{ps}</math>) [kJ/h]</p>	<p>Calor transferido (<math>Q_{ch}</math>) [kJ/h]</p>	<p>Calor transferido (<math>Q_{tub}</math>) [kJ/h]</p>
$Q_{ps} = \frac{T_{ps} - T_{ips}}{R_{cps}} = \frac{T_{amb} - T_{ps}}{R_{eq.ps}}$	$Q_{ch} = \frac{T_{pch} - T_{ic}}{R_{cch}} = \frac{T_{amb} - T_{pch}}{R_{eq.ch}}$	$Q_{tub} = \frac{T_{pt} - T_{it}}{R_{ct}} = \frac{T_{amb} - T_{pt}}{R_{eq.t}}$
<p>Condición de frontera</p> $Q_{ps} = \frac{T_{amb} - T_{ips}}{R_{c.ps} + R_{eq.ps}}$	<p>Condición de frontera</p> $Q_{ch} = \frac{T_{amb} - T_{ic}}{R_{c.ch} + R_{eq.ch}}$	<p>Condición de frontera</p> $Q_{tub} = \frac{T_{amb} - T_{it}}{R_{ct} + R_{eq.t}}$

La solución al sistema de ecuaciones se hizo en *software Engineering Equation Solver (EES)*, cuyo código se muestra a continuación.

"!Transferencia de calor hacia la parte superior del fermentador [interacción tapa-ambiente]!"

```

Qp.s=(Tamb-Tips)/Rps "Qp.s:ganancia de energía por la tapa del fermentador"
Tips=285 [K] "Tip: Temperatura de la pared interior de la tapa"
Tamb=298 [K] "Tamb: Temperatura del lugar donde se encuentra el fermentador"
Rps=Rcps+Reqps "Rps: Resistencia total del circuito térmico para la zona de la tapa"
Rcps=(LN(r1/r)/(pi*L*Kinox))+(LN(r2/r1)/(pi*L*Kcorcho)) "Rcps: Resistencia a la conducción [lámina y aislante]"
Reqps=(Rclps*Radps)/(Radps+Rclps) "Reqps: resistencia equivalente para las resistencias que se encuentran en paralelo"
Rclps=(1/(pi*L*r2*hcps)) "Rclps:Resistencia a la convección libre o natural"
hcps=(Nups*Kaire_Tclps)/(2*r2) "Coeficiente de convección libre para la zona de la tapa"
Nups=(0.6+(0.387*Raps^(1/6))/(1+(0.559/Prps)^(9/16))^(8/27)))^2 "Relación empírica para número de Nutsel [Nups]" "para Raps<10^11"
Raps=(g*Bps*(Tamb-Tpps)^(2*r2)^3*Prps)/visc_cinematíca_aire_Tclps^2 "Raps: número de Rayleigh en la zona de la tapa"
Bps=(1/Tclps) "Bps:Coeficiente de expansión volumétrica en la zona de la tapa"
Prps=visc_aire_Tclps*cp_aire_Tclps/Kaire_Tclps "Prps:Número de Prand en la zona de la tapa"
Radps=(1/(pi*r2*L*hrps)) "Radps:Resistencia a la radiación"
hrps=emisividad_corcho*cte_boltzmann*(Tpps^2+Tamb^2)*(Tpps+Tamb) "hrps: Coeficiente de radiación para la zona de la tapa"
Tclps=(Tpps+Tamb)/2 "Tclps:Temperatura de capa límite en la zona de la tapa"
Espesor_inox=0,0015 [m]
Espesor_corcho=0,006 [m]
r=0,15 [m] "Radio interno de la tapa del fermentador"
r1=r+Espesor_inox "radio externo de la tapa del fermentador"
r2=r1+Espesor_corcho "radio externo dela capa de corcho"
L=0,6 [m] "Longitud del fermentador"
Kinox=53,64 [kJ/h*m*K] "Conductividad térmica del acero inoxidable"
Kcorcho=0,1728 [kJ/h*m*K] "Conductividad térmica del aislante [corcho]"
g=127008000 [m/h^2] "Valor de la gravedad en m/h^2"
emisividad_corcho=0,7 "valor de la emisividad para el corcho"
cte_boltzmann=0,0000020376 [kJ/h*m^2*K^4] "valor de la constante de Boltzmann"
visc_aire_Tclps=VISCOSITY(Air:T=Tclps-273)*3600 "Viscosidad del aire a temperatura de película de la zona de la tapa"
cp_aire_Tclps=CP(Air:T=Tclps-273) "calor específico del aire a temperatura de película de la zona de la tapa"
Kaire_Tclps=CONDUCTIVITY(Air:T=Tclps-273)*3,6 "conductividad térmica del aire a temperatura de película de la zona de la tapa"
densidad_aire_Tclps=DENSITY(Air:T=Tclps-273;P=101,325) "densidad del aire a temperatura de película de la zona de la tapa"
visc_cinematíca_aire_Tclps=visc_aire_Tclps/densidad_aire_Tclps "Viscosidad cinematíca del aire a temperatura de película"
(Tpps-Tips)/Rcps=(Tamb-Tpps)/Reqps "Condición de frontera" "Tpps: Temperatura de la pared exterior de la tapa"

```

"!Transferencia de calor hacia la chaqueta [interacción chaqueta-ambiente]!"

```

Qch=(Tamb-Tic)/Rch "Qch: ganancia de energía por la chaqueta"
Rch=Rcch+Reqch "Rch: Resistencia total del circuito térmico para la zona de la chaqueta"
Rcch=(LN(r4/r3)/(pi*L*Kinox))+(LN(r5/r4)/(pi*L*Kcorcho)) "Rcch: Resistencia a la conducción [lámina y aislante]"
Reqch=(Rclch*Radch)/(Radch+Rclch) "Req: resistencia equivalente para las resistencias que se encuentran en paralelo"
Rclch=(1/(pi*L*r5*hcch)) "Resistencia a la convección libre o natural"
hcch=(Nuch*Kaire_Tclch)/(2*r5) "Coeficiente de convección libre para la zona de la chaqueta"
Nuch=(0.6+(0.387*Rach^(1/6))/(1+(0.559/Prch)^(9/16))^(8/27)))^2 "Relación empírica para número de Nutsel [Nuch]" "para Rach<10^12"
Rach=(g*Bch*(Tamb-Tpch)^(2*r5)^3*Prch)/visc_cinematíca_aire_Tclch^2 "Rach: número de Rayleigh en la zona de la chaqueta"
Bch=(1/Tclch) "Coeficiente de expansión volumétrica en la zona de la chaqueta"
Prch=visc_aire_Tclch*cp_aire_Tclch/Kaire_Tclch "Prch: número de Prand para la zona de la chaqueta"
Radch=(1/(pi*r5*L*hrch)) "Radch: Resistencia a la radiación en la zona de la chaqueta"
hrch=emisividad_corcho*cte_boltzmann*(Tpch^2+Tamb^2)*(Tpch+Tamb) "Coeficiente de radiación para la zona de la chaqueta"
Tclch=(Tpch+Tamb)/2 "Tclch: Temperatura de capa límite en la zona de la chaqueta"
Espesor_chaqueta=0,06 [m]
r3=r1+Espesor_chaqueta "radio interno de la chaqueta"
r4=r3+Espesor_inox "radio externo de la chaqueta"
r5=r4+Espesor_corcho "radio externo de la capa de corcho"
Tic=283 [K] "Tic: temperatura del aire refrigerante"
visc_aire_Tclch=VISCOSITY(Air:T=Tclch-273)*3600 "Viscosidad del aire a temperatura de película de la zona de la chaqueta"
cp_aire_Tclch=CP(Air:T=Tclch-273) "calor específico del aire a temperatura de película de la zona de la chaqueta"
Kaire_Tclch=CONDUCTIVITY(Air:T=Tclch-273)*3,6 "conductividad térmica del aire a temperatura de película de la zona de la chaqueta"
densidad_aire_Tclch=DENSITY(Air:T=Tclch-273;P=101,325) "densidad del aire a temperatura de película de la zona de la chaqueta"
visc_cinematíca_aire_Tclch=visc_aire_Tclch/densidad_aire_Tclch "Viscosidad cinematíca del aire a temperatura de película"

(Tpch-Tic)/Rcch=(Tamb-Tpch)/Reqch "Condición de frontera" "Tpch: Temperatura de la pared exterior de la chaqueta"

```

"[Transferencia de calor hacia la tubería [interacción tubería-ambiente]]"

Qtub=(Tamb-Tit)/Rt "Qtub: Ganancia de energía por la tubería"  
Rt=Rct+Reqt "Rt: Resistencia total del circuito térmico para la zona de tubería"  
Rct=(LN(r6/rub))/(2\*pi\*Lt\*Kpvc)+(LN(r7/r6))/(2\*pi\*Lt\*Kpoliéster)+(LN(r8/r7))/(2\*pi\*Lt\*Kespuma)"Rct: Res. a la conducción [Poli,PVC, Esp]"  
Reqt=(Rct\*Pradt)/(Pradt+Rct)  
Rct=(1/(2\*pi\*Lt\*r8\*hct)) "Resistencia a la onvección libre o natural"  
hct=(Nut\*Kaire\_Tclt)/(2\*r8) "Coeficiente de convección libre para la zona de la tubería"  
Nut=(0.6+(0.387\*Rat^(1/6))/(1+(0.559/Prt)^(9/16)))^(8/27))^2 "Relación empírica para el número de Nutsel [Nut]" "para Rat<10^12"  
Rat=(g\*Bt\*(Tamb-Tpt)^(2\*r8)^3\*Prt)/visc\_cinémática\_aire\_Tclt^2 "Rat: número de Rayleigh en la zona de la tubería"  
Bt=(1/Tclt) "Bt: Coeficiente de expansión volumétrica en la zona de la tubería"  
Prt=visc\_aire\_Tclt\*cp\_aire\_Tclt/Kaire\_Tclt "Prt: número de Prand en la zona de la tubería"  
Pradt=(1/(2\*pi\*r8\*Lt\*hrt)) "Pradt: Resistencia a la radiación en la zona de la tubería"  
hrt=emisividad\_espuma\*cte\_boltzmann\*(Tpt^2+Tamb^2)\*(Tpt+Tamb) "hrt: Coeficiente de radiación para la zona de la tubería"  
Tclt=(Tpt+Tamb)/2 "Tclt: Temperatura de capa límite en la zona de la tubería"  
Tit=Tic "Temperatura de la cara interna de la tubería"  
Espesor\_poliéster= 0,001 [m]  
Espesor\_tub=0,001 [m]  
Espesor\_espuma=0,0127 [m]  
rub=0,0254 [m] "radio interno de la tubería"  
r6=rub+Espesor\_tub "radio externo de la tubería"  
r7=r6+Espesor\_poliéster "radio externo de la capa de poliéster"  
r8=r7+Espesor\_espuma "radio externo de la capa de espuma"  
Lt= 4 [m] "longitud total de la tubería en el sistema"  
Kpvc=0,432 [kJ/hmk] "conductividad térmica del PVC"  
Kpoliéster=0,54 [kJ/hmk] "conductividad térmica del poliéster"  
Kespuma=0,115 [kJ/hmk] "conductividad térmica de la espuma"  
emisividad\_espuma= 0,9 "emisividad de la espuma"  
visc\_aire\_Tclt=VISCOSITY(Air;T=Tclt-273)\*3600 "Viscosidad del aire a temperatura de película de la zona de la tubería"  
cp\_aire\_Tclt=CP(Air;T=Tclt-273) "calor específico del aire a temperatura de película de la zona de la tubería"  
Kaire\_Tclt=CONDUCTIVITY(Air;T=Tclt-273)\*3,6 "conductividad térmica del aire a temperatura de película de la zona de la tubería"  
densidad\_aire\_Tclt=DENSITY(Air;T=Tclt-273;P=101,325) "densidad del aire a temperatura de película de la zona de la tubería"  
visc\_cinémática\_aire\_Tclt=visc\_aire\_Tclt/densidad\_aire\_Tclt "Viscosidad cinémática del aire a temperatura de película"

(Tpt-Tit)/Rct=(Tamb-Tpt)/Reqt "Condición de frontera" "Tpt: Temperatura de la pared exterior de la tubería"

Resultados obtenidos para el sistema de ecuaciones

Bch = 0,003401 [1/K]  
cp\_aire\_Tclch = 1,007 [kJ/kg K]  
densidad\_aire = 1,247 [kg/m<sup>3</sup>]  
emisividad\_corcho = 0,7  
Espesor\_espuma = 0,0127 [m]  
g = 1,270E+08 [m/h<sup>2</sup>]  
hrch = 14,5 [kJ/h m<sup>2</sup> K]  
Kaire\_Tclps = 0,09091 [kJ/m h K]  
Kinox = 53,64 [kJ/h\*m\*K]  
Lt = 4 [m]  
Prch = 0,7306  
**Qp.s = 51,155 [kJ/h]**  
r2 = 0,1575 [m]  
r6 = 0,0264 [m]  
Raps = 2,238E+07  
Rclch = 0,2294 [K h/kJ]  
Rct = 0,1381 [K h/kJ]  
Rps = 0,2541 [K h/kJ]  
Rt = 0,1722 [K h/kJ]  
Tclps = 294,552 [K]  
Tit = 283,000 [K]  
visc\_aire = 0,064  
visc\_cinémática\_aire\_Tclch = 0,0549 [m<sup>2</sup>/h]

Bps = 0,003395 [1/K]  
cp\_aire\_Tclps = 1,007 [kJ/kg K]  
densidad\_aire\_Tclch = 1,2 [kg/m<sup>3</sup>]  
emisividad\_espuma = 0,9  
Espesor\_inox = 0,0015 [m]  
hcch = 10,56 [kJ/h m<sup>2</sup> K]  
hrps = 14,58 [kJ/h m<sup>2</sup> K]  
Kaire\_Tclt = 0,09144 [kJ/m h K]  
Kpoliéster = 0,54 [kJ/hmk]  
Nuch = 50,95  
Prps = 0,7305  
**Qtub = 87,129 [kJ/h]**  
r3 = 0,2115 [m]  
r7 = 0,0274 [m]  
Rat = 154335  
Rclps = 0,3236 [K h/kJ]  
Reqch = 0,09666 [K h/kJ]  
Rradch = 0,167 [K h/kJ]  
rub = 0,0254 [m]  
Tclt = 296,515 [K]  
Tpch = 290,034 [K]  
visc\_aire\_Tclch = 0,06588 [kg/m h]  
visc\_cinémática\_aire\_Tclps = 0,05508 [m<sup>2</sup>/h]

Bt = 0,003373 [1/K]	cp_aire = 1,006 [kJ/kg-K]
cp_aire,Tclt = 1,007 [kJ/kg K]	cte_boltzmann = 2,038E-07 [kJ/h*m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
densidad_aire,Tclps = 1,198 [kg/m <sup>3</sup> ]	densidad_aire,Tclt = 1,19 [kg/m <sup>3</sup> ]
Espesor_chaqueta = 0,06 [m]	Espesor_corcho = 0,006 [m]
Espesor_poliéster = 0,001 [m]	Espesor_tub = 0,001 [m]
hcps = 10,41 [kJ/h m <sup>2</sup> K]	hct = 9,976 [kJ/h m <sup>2</sup> K]
hrt = 19,12 [kJ/h m <sup>2</sup> K]	Kaire_Tclch = 0,09077 [kJ/m h K]
Kcorcho = 0,1728 [kJ/h*m*K]	Kespuma = 0,115 [kJ/hmK]
Kpvc = 0,432 [kJ/hmK]	L = 0,6 [m]
Nups = 36,06	Nut = 8,75
Prt = 0,73	<b>Qch = 82,412 [kJ/h]</b>
r = 0,15 [m]	r1 = 0,1515 [m]
r4 = 0,213 [m]	r5 = 0,219 [m]
r8 = 0,0401 [m]	Rach = 7,009E+07
Rcch = 0,08536 [K h/kJ]	Rch = 0,182 [K h/kJ]
Rclt = 0,09946 [K h/kJ]	Rcps = 0,1193 [K h/kJ]
Reqps = 0,1348 [K h/kJ]	Reqt = 0,0341 [K h/kJ]
Rradps = 0,231 [K h/kJ]	Rradt = 0,05189 [K h/kJ]
Tamb = 298 [K]	Tclch = 294,017 [K]
Tic = 283,000 [K]	Tips = 285,000 [K]
Tpps = 291,105 [K]	Tpt = 295,029 [K]
visc_aire,Tclps = 0,06597 [kg/m h]	visc_aire,Tclt = 0,0663 [kg/m h]
visc_cinematica_aire,Tclt = 0,05572 [m <sup>2</sup> /h]	

### Estimación del caudal requerido

Con los valores estimados de calor metabólico y transferido se aplica la ecuación 2.

$$Q_{sistema} = 11,1 + 51,2 + 82,4 + 87,1 = 231,8 \text{ [kJ/h]} \quad (Ec. 14)$$

El flujo de aire debe ser capaz de retirar el calor estimado que se genera y se transfiere hacia el sistema, dicho calor está definido como:

$$Q_{sistema} = m_{aire} C_{p_{aire}} \Delta T_{aire} = q_{aire} \rho_{aire} C_{p_{aire}} \Delta T_{aire} \text{ [kJ/h]} \quad (Ec. 15)$$

Donde  $q_{aire}$  [m<sup>3</sup>/h] hace referencia al caudal de aire requerido,  $\rho_{aire}$  [kg/m<sup>3</sup>] al valor de la densidad a la temperatura promedio del fluido (10°C),  $C_{p_{aire}}$  [kJ/kg K] al calor específico del aire y  $\Delta T_{aire}$  [K] a la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del aire en el equipo.

Asumiendo un  $\Delta T_{aire} = 1$  [K] se estima el caudal requerido de aire:

$$q_{aire} = \frac{Q_{sistema}}{\rho_{aire} C_{p_{aire}} \Delta T_{aire}} = \frac{231,8}{1,247 * 1,006 * 1} = \mathbf{184,8} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (Ec. 16)$$

## Anexo D. Código de caída de presión del sistema

Para estimar la caída de presión en el fermentador es necesario dividir el equipo en dos secciones. La sección 1 hace referencia al flujo de aire al interior del fermentador, esta sección comprende una tubería de entrada, un flujo a través de la cámara y una tubería de salida; la sección 2 comprende el flujo de aire a través de la chaqueta del fermentador; en esta sección comprende tuberías paralelas hacia la chaqueta, flujo en chaqueta, y tuberías paralelas hacia el cuarto refrigerante. Para estimar la caída de presión total en el sistema se tiene en cuenta que la sección 1 y 2 se encuentran en posición paralela, por lo cual tendrán la misma pérdida de carga (Cengel,2006). Esta estimación se solucionó con el *software EES*, cuyo código se muestra a continuación.

```
"Caída de presión en Sección_1: [1 tubería de entrada +flujo en fermentador+1 tubería de salida]"
"tubería de entrada"
Caire=184,8 [m^3/h] "Caire: caudal de aire requerido"
Caire=C_T1+C_T2+C_T3 "T1:tubería de entrada al fermentador; T2 y T3: tubería de entrada a la chaqueta"
D_T1=0,0635 [m] "D_T1: Diámetro de tubería de entrada al fermentador"
A_T1=(pi*(D_T1)^2)/4 "A_T1: área de la tubería de entrada al fermentador"
densidad_aire_Tprom=DENSITY(Air:T=Tprom;P=101,325) "densidad del aire a temperatura promedio"
Tprom=10 [°C]
V_T1=C_T1/A_T1 "V_T1: velocidad del fluido en la tubería de entrada del fermentador"
viscosidad_aire_Tprom=VISCOSITY(Air:T=Tprom)*3600 "viscosidad del aire a temperatura promedio"
Re_T1=(densidad_aire_Tprom*V_T1*D_T1)/(viscosidad_aire_Tprom) "Re_T1: Número de Reynolds en tubería de entrada al fermentador"
E_T1=0,0000015 "E_T1: Rugosidad del material de la tubería [PVC]"
(1/f_T1^(1/2))=-2*log10(((E_T1/D_T1)/3,7)+(2,51/(Re_T1*f_T1^(1/2)))) "ecuación de Colebrook para Re>4000" "f_T1:factor de fricción"
hL_T1=(f_T1*L_T1*(V_T1)^2)/(2*g*D_T1) "hL_T1: pérdida de carga en la tubería de entrada al fermentador"
L_T1=0,35 [m] "L_T1:Longitud de la tubería de entrada al fermentador"
g=127008000 [m/h^2] "Valor de la gravedad"
"Pérdidas por accesorios en la tubería de entrada a la cámara"
Kent_T1=0,5 "Kent_To: coeficiente de pérdida para las entradas de la tubería"
Ksal_T1=1 "Ksal_To: coeficiente de pérdida para las salidas de la tubería"
hLacc_T1=(Kent_T1+Ksal_T1)*(V_T1^2)/(2*g) "Pérdida de carga por accesorios"
hL1=hL_T1+hLacc_T1

"Flujo en fermentador"
C_ferm=C_T1 "C_ferm: Caudal de aire que circula por el fermentador"
A_ferm=((pi*Dferm^2)/8) "A_ferm: área del fermentador por donde fluye el aire"
Dferm=0,3 [m] "Dferm:diámetro del fermentador"
V_ferm=C_ferm/A_ferm "V_ferm: velocidad del fluido al interior del fermentador"
Re_ferm=(densidad_aire_Tprom*V_ferm*Dferm)/(viscosidad_aire_Tprom) "Re_ferm: Número de Reynolds al interior del fermentador"
E_ferm=0,000002 "E_ferm: Rugosidad del material del fermentador [Inox]"
(1/f_ferm^(1/2))=-2*log10(((E_ferm/Dferm)/3,7)+(2,51/(Re_ferm*f_ferm^(1/2)))) "ecuación de Colebrook para Re>4000" "f_ferm:factor de fricción"
hL_ferm=(f_ferm*L_ferm*(V_ferm)^2)/(2*g*Dferm) "hL_ferm: pérdida de carga al interior del fermentador"
L_ferm=0,6 [m] "L_ferm:Longitud del fermentador"
"Pérdidas por accesorios por flujo de cámara"
K_expansión_repentina=(1-(D_T1^2/Dferm^2))^2
K_contracción_repentina=0,5
hLacc_ferm=(K_expansión_repentina+K_contracción_repentina)*(V_ferm^2)/(2*g) "Pérdida de carga por accesorios"
hLferm=hL_ferm+hLacc_ferm
```

"Tubería de salida"

$C_{T4}=C_{ferm}$  "C\_T4: caudal de aire que circula el ducto de salida del fermentador"  
 $D_{T4}=D_{T1}$  "D\_T4: Diámetro de tubería de salida del fermentador"  
 $A_{T4}=A_{T1}$  "A\_T4: área de la tubería de salida del fermentador"  
 $V_{T4}=C_{T4}/A_{T4}$  "V\_T4: velocidad del fluido en la tubería de salida del fermentador"  
 $Re_{T4}=(\text{densidad\_aire\_Tprom} \cdot V_{T4} \cdot D_{T4})/(\text{viscosidad\_aire\_Tprom})$  "Re\_T4: Número de Reynolds en tubería de salida del fermentador"  
 $E_{T4}=E_{T1}$  "E\_T4: Rugosidad del material de la tubería [PVC]"  
 $(1/f_{T4}^{(1/2)})=-2 \cdot \log_{10}(((E_{T4}/D_{T4})/3.7)+(2.51/(Re_{T4} \cdot f_{T4}^{(1/2))}))$  "ecuación de Colebrook para  $Re > 4000$ " "f\_T4: factor de fricción"  
 $h_{L_{T4}}=(f_{T4} \cdot L_{T4} \cdot V_{T4}^2)/(2 \cdot g \cdot D_{T4})$  "h\_L\_T4: pérdida de carga en la tubería de salida del fermentador"  
 $L_{T4}=0.3$  [m]  
"Pérdidas por accesorios en la tubería de entrada a la chaqueta"  
 $Kent_{T4}=0.5$  "Kent\_To: coeficiente de pérdida para las entradas de la tubería"  
 $Ksal_{T4}=1$  "Ksal\_To: coeficiente de pérdida para las salidas de la tubería"  
 $h_{Lacc_{T4}}=(Kent_{T4}+Ksal_{T4}) \cdot (V_{T4}^2/(2 \cdot g))$  "Pérdida de cargapor accesorios"  
 $h_{L4}=h_{L_{T4}}+h_{Lacc_{T4}}$

$h_{L_{Sección1}}=h_{L1}+h_{Lferm}+h_{L4}$  "Pérdida de carga para la sección 1"  
 $h_{L_{Sección1}}=h_{L_{Sección2}}$  "Igualdad de las pérdidas de carga por disposición paralela"  
 $h_{paralelo}=h_{L_{Sección1}}$

"!Caída de presión en Sección\_2: [2 tubería de entrada en paralelo +flujo en chaqueta+4 tubería similares de salida en paralelo]"

"Tubería de entrada: T2"

$A_{T2}=A_{T1}$  "A\_T2: área de la tubería de entrada a la chaqueta"  
 $V_{T2}=C_{T2}/A_{T2}$  "V\_T2: velocidad del fluido en la tubería de entrada de la chaqueta"  
 $D_{T2}=D_{T1}$  "D\_T2: Diámetro de tubería de entrada a la chaqueta"  
 $Re_{T2}=(\text{densidad\_aire\_Tprom} \cdot V_{T2} \cdot D_{T2})/(\text{viscosidad\_aire\_Tprom})$  "Re\_T2: Número de Reynolds en tubería de entrada de la chaqueta"  
 $E_{T2}=E_{T1}$  "E\_T2: Rugosidad del material de la tubería [PVC]"  
 $(1/f_{T2}^{(1/2)})=-2 \cdot \log_{10}(((E_{T2}/D_{T2})/3.7)+(2.51/(Re_{T2} \cdot f_{T2}^{(1/2))}))$  "ecuación de Colebrook para  $Re > 4000$ " "f\_T2: factor de fricción"  
 $h_{L_{T2}}=(f_{T2} \cdot L_{T2} \cdot V_{T2}^2)/(2 \cdot g \cdot D_{T2})$  "h\_L\_T2: pérdida de carga por fricción"  
 $L_{T2}=0.7$  [m] "L\_T2: Longitud de la tubería"  
"Pérdidas por accesorios en la tubería de entrada a la chaqueta"  
 $Kent_{T2}=0.5$  "Kent\_To: coeficiente de pérdida para las entradas de la tubería"  
 $Ksal_{T2}=1$  "Ksal\_To: coeficiente de pérdida para las salidas de la tubería"  
 $h_{Lacc_{T2}}=(Kent_{T2}+Ksal_{T2}) \cdot (V_{T2}^2/(2 \cdot g))$  "Pérdida de cargapor accesorios"  
  
 $h_{L2}=h_{L_{T2}}+h_{Lacc_{T2}}$

"Tubería de entrada: T3"

$A_{T3}=A_{T1}$  "A\_T3: área de la tubería de entrada a la chaqueta"  
 $V_{T3}=C_{T3}/A_{T3}$  "V\_T3: velocidad del fluido en la tubería de entrada a la chaqueta"  
 $D_{T3}=D_{T1}$  "D\_T3: Diámetro de tubería de entrada a la chaqueta"  
 $Re_{T3}=(\text{densidad\_aire\_Tprom} \cdot V_{T3} \cdot D_{T3})/(\text{viscosidad\_aire\_Tprom})$  "Re\_T3: Número de Reynolds en tubería de entrada a la chaqueta"  
 $E_{T3}=E_{T1}$  "E\_T3: Rugosidad del material de la tubería [PVC]"  
 $(1/f_{T3}^{(1/2)})=-2 \cdot \log_{10}(((E_{T3}/D_{T3})/3.7)+(2.51/(Re_{T3} \cdot f_{T3}^{(1/2))}))$  "ecuación de Colebrook para  $Re > 4000$ " "f\_T3: factor de fricción"  
 $h_{L_{T3}}=(f_{T3} \cdot L_{T3} \cdot V_{T3}^2)/(2 \cdot g \cdot D_{T3})$  "h\_L\_T3: pérdida de carga por fricción"  
 $L_{T3}=0.45$  [m] "L\_T3: Longitud de la tubería"  
"Pérdidas por accesorios en la tubería de entrada a la chaqueta"  
 $Kent_{T3}=0.5$  "Kent\_To: coeficiente de pérdida para las entradas de la tubería"  
 $Ksal_{T3}=1$  "Ksal\_To: coeficiente de pérdida para las salidas de la tubería"  
 $h_{Lacc_{T3}}=(Kent_{T3}+Ksal_{T3}) \cdot (V_{T3}^2/(2 \cdot g))$  "Pérdida de cargapor accesorios"  
 $h_{L3}=h_{L_{T3}}+h_{Lacc_{T3}}$   
 $h_{L3}=h_{L2}$  "Condición de igualdad de pérdida de carga por disposición paralela"

"Flujo por chaqueta"

$C_{ch}=C_{T2}+C_{T3}$  "C\_ch: Caudal de aire que circula por la chaqueta"  
 $A_{ch}=(\pi \cdot D_{ext}^2/8)-(\pi \cdot D_{int}^2/8)$  "A\_ch: área de la chaqueta"  
 $D_{ext}=0.36$  [m] "Dext: diámetro de la parte externa de la chaqueta"  
 $D_{int}=0.3$  [m] "Dint: diámetro de la parte interna de la chaqueta"  
 $V_{ch}=C_{ch}/A_{ch}$  "V\_ch: velocidad del fluido en la chaqueta"  
 $Re_{ch}=(\text{densidad\_aire\_Tprom} \cdot V_{ch} \cdot Dh)/(\text{viscosidad\_aire\_Tprom})$  "Re\_ch: Número de Reynolds en la chaqueta"  
 $Dh=(4 \cdot A_{ch})/(\pi \cdot (D_{ext}+D_{int}))$  "Dh: diámetro hidráulico para el espacio anular por donde circula el aire en la chaqueta"  
 $E_{ch}=0.000002$  "E\_ch: Rugosidad del material de la chaqueta [Inox]"  
 $(1/f_{ch}^{(1/2)})=-2 \cdot \log_{10}(((E_{ch}/Dh)/3.7)+(2.51/(Re_{ch} \cdot f_{ch}^{(1/2))}))$  "ecuación de Colebrook para  $Re > 4000$ " "f\_ch: factor de fricción"  
 $h_{L_{ch}}=(f_{ch} \cdot L_{ch} \cdot V_{ch}^2)/(2 \cdot g \cdot Dh)$  "h\_L\_ch: pérdida de carga en la chaqueta"  
 $L_{ch}=0.6$  [m] "L\_ch: Longitud de la chaqueta"

"Tubería de salida: T5"  
 $C_{T5}=(C_{ch}/4)$  "C\_T5: Caudal que circula por cada una de las tuberías de salida de la chaqueta"  
 $A_{T5}=A_{T1}$  "A\_T5: Área de cada una de las tuberías de salida de la chaqueta"  
 $V_{T5}=C_{T5}/A_{T5}$  "V\_T5: velocidad del fluido en cada una de las tuberías de salida de la chaqueta"  
 $D_{T5}=D_{T1}$  "D\_T5: Diámetro de cada una de las tuberías de salida de la chaqueta"  
 $Re_{T5}=(densidad_{aire\_Tprom} * V_{T5} * D_{T5}) / (viscosidad_{aire\_Tprom})$  "Re\_T5: Número de Reynolds en tuberías de salida de la chaqueta"  
 $E_{T5}=E_{T1}$  "E\_T5: Rugosidad del material de la tubería [PVC]"  
 $(1/f_{T5}^{(1/2)}) = -2 * \log_{10}(((E_{T5}/D_{T5})/3.7) + (2.51/(Re_{T5} * f_{T5}^{(1/2)})))$  "ecuación de Colebrook para  $Re > 4000$ " "f\_T5: factor de fricción"  
 $h_{L\_T5} = (f_{T5} * L_{T5} * V_{T5}^2) / (2 * g * D_{T5})$  "hL\_T5: pérdida de carga en la tubería"  
 $L_{T5} = 0.3$  [m] "L\_T5: Longitud de la tubería"  
 "Pérdidas por accesorios en la tubería de entrada a la chaqueta"  
 $Kent_{T5} = 0.5$  "Kent\_To: coeficiente de pérdida para las entradas de la tubería"  
 $Ksal_{T5} = 1$  "Ksal\_To: coeficiente de pérdida para las salidas de la tubería"  
 $hLacc_{T5} = (Kent_{T5} + Ksal_{T5}) * (V_{T5}^2 / (2 * g))$  "Pérdida de carga por accesorios"  
 $hL5 = hL_{T5} + hLacc_{T5}$   
 $hL_{Sección2} = hL2 + hL_{ch} + hL5$  "Pérdida de carga para la sección 2"  
 $hL_{total} = hL_{paralelo}$  "hL\_Total: Pérdida de carga total para la descarga del sistema"  
 $\delta P_{total} = (hL_{total} * g * densidad_{aire\_Tprom}) / (3600^2)$  "Caída de presión del sistema en [mmca]"

## Resultados obtenidos para el sistema de ecuaciones

$A_{ch} = 0.01555$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{ferm} = 0.03534$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{T1} = 0.003167$ [m <sup>2</sup> ]
$A_{T4} = 0.003167$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{T5} = 0.003167$ [m <sup>2</sup> ]	$C_{aire} = 184.8$ [m <sup>3</sup> /h]
$C_{T1} = 53.557$ [m <sup>3</sup> /h]	$C_{T2} = 64.690$ [m <sup>3</sup> /h]	$C_{T3} = 66.553$ [m <sup>3</sup> /h]
$\delta P_{total} = 4.593$ [mmca]	$densidad_{aire\_Tprom} = 1.247$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$D_{ext} = 0.36$ [m]
$D_{int} = 0.3$ [m]	$D_{T1} = 0.0635$ [m]	$D_{T2} = 0.0635$ [m]
$D_{T5} = 0.0635$ [m]	$E_{ch} = 0.000002$ [m]	$E_{ferm} = 0.000002$ [m]
$E_{T3} = 0.0000015$ [m]	$E_{T4} = 0.0000015$ [m]	$E_{T5} = 0.0000015$ [m]
$f_{T1} = 0.02565$	$f_{T2} = 0.02452$	$f_{T3} = 0.02435$
$g = 1.270E+08$ [m/h <sup>2</sup> ]	$hL1 = 1.848$	$hL2 = 2.908$ [m]
$hL5 = 0.6917$	$hLacc_{ferm} = 0.01277$	$hLacc_{T1} = 1.689$
$hLacc_{T4} = 1.689$	$hLacc_{T5} = 0.6339$	$hL_{ferm} = 0.01335$
$hL_{ferm} = 0.0005769$ [m]	$hL_{Sección1} = 3.687$ [m]	$hL_{Sección2} = 3.687$ [m]
$hL_{T3} = 0.3$ [m]	$hL_{T4} = 0.1365$ [m]	$hL_{T5} = 0.05787$ [m]
$Kent_{T2} = 0.5$	$Kent_{T3} = 0.5$	$Kent_{T4} = 0.5$
$Ksal_{T2} = 1$	$Ksal_{T3} = 1$	$Ksal_{T4} = 1$
$K_{expansión,repentina} = 0.9124$	$L_{ch} = 0.6$ [m]	$L_{ferm} = 0.6$ [m]
$L_{T3} = 0.45$ [m]	$L_{T4} = 0.3$ [m]	$L_{T5} = 0.3$ [m]
$Re_{T1} = 20920$	$Re_{T2} = 25269$	$Re_{T3} = 25997$
$Tprom = 10$ [°C]	$viscosidad_{aire\_Tprom} = 0.064$ [kg/m h]	$V_{ch} = 8440$ [m/h]
$V_{T2} = 20427$ [m/h]	$V_{T3} = 21015$ [m/h]	$V_{T4} = 16911$ [m/h]
$A_{T2} = 0.003167$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{T3} = 0.003167$ [m <sup>2</sup> ]	
$C_{ch} = 131.243$ [m <sup>3</sup> /h]	$C_{ferm} = 53.557$ [m <sup>3</sup> /h]	
$C_{T4} = 53.557$ [m <sup>3</sup> /h]	$C_{T5} = 32.811$ [m <sup>3</sup> /h]	
$D_{ferm} = 0.3$ [m]	$D_h = 0.06$ [m]	
$D_{T3} = 0.0635$ [m]	$D_{T4} = 0.0635$ [m]	
$E_{T1} = 0.0000015$ [m]	$E_{T2} = 0.0000015$ [m]	
$f_{ch} = 0.03105$	$f_{ferm} = 0.03191$	
$f_{T4} = 0.02565$	$f_{T5} = 0.02899$	
$hL3 = 2.908$	$hL4 = 1.825$	
$hLacc_{T2} = 2.464$ [m]	$hLacc_{T3} = 2.608$	
$hL_{paralelo} = 3.687$ [m]	$hL_{ch} = 0.08705$ [m]	
$hL_{T1} = 0.1592$ [m]	$hL_{T2} = 0.4439$ [m]	
$hL_{total} = 3.687$ [m]	$Kent_{T1} = 0.5$	
$Kent_{T5} = 0.5$	$Ksal_{T1} = 1$	
$Ksal_{T5} = 1$	$K_{contracción,repentina} = 0.5$	
$L_{T1} = 0.35$ [m]	$L_{T2} = 0.7$ [m]	
$Re_{ch} = 9865$	$Re_{ferm} = 8856$	
$Re_{T4} = 20920$	$Re_{T5} = 12816$	
$V_{ferm} = 1515$ [m/h]	$V_{T1} = 16911$ [m/h]	
$V_{T5} = 10360$ [m/h]		