

**DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA PARA LA AUTOMATIZACIÓN  
DE UN BIORREACTOR USADO PARA LA FERMENTACIÓN DE CAFÉ DE LA  
EMPRESA PENAGOS HERMANOS**

**JENNIFER AGÁMEZ HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2017**

**DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA PARA LA AUTOMATIZACIÓN  
DE UN BIORREACTOR USADO PARA LA FERMENTACIÓN DE CAFÉ DE LA  
EMPRESA PENAGOS HERMANOS**

**JENNIFER AGÁMEZ HERNÁNDEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniera Electrónica**

**Director**

**JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ**

**Magister en Ingeniería Electrónica.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2017**

## **DEDICATORIA**

*Dedicado, primeramente, a Dios, por permitirme ésta oportunidad y en especial a mis padres Elder y Luz Mirta, por su gran ejemplo de firmeza ante los obstáculos y por el incondicional amor que me han brindado, a ellos les debo todo esto.*

*A mis hermanas Luz Teresa y María Fernanda, a quienes siempre llevo en mi corazón.*

*A mi novio Brayan, quien durante todo este proceso me ha brindado todo su apoyo y cariño.*

*Jennifer Agámez Hernández*

## **AGRADECIMIENTOS**

El resultado de lo que hoy soy y de lo que hasta ahora he hecho se lo debo en primera estancia a Dios nuestro creador y Señor, por eso le agradezco por permitirme tener fuerzas en los momentos más duros.

Al profesor Jaime Barrero, por su inmensa colaboración y su forma de guiarme durante este trabajo que me enseñó a ser autosuficiente. A los profesores que hicieron parte de mi formación durante toda la carrera.

Al equipo de trabajo de Penagos Hermanos, por la confianza brindada para la realización de este proyecto y todos mis amigos y compañeros que de alguna u otra forma formaron parte de la realización de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS.....	16
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
2. MARCO TEÓRICO .....	17
2.1. PROCESAMIENTO DEL CAFÉ .....	17
2.2. FERMENTACIÓN .....	20
2.3. INSTRUMENTACIÓN .....	22
2.3.1. Sensores de temperatura.....	22
2.3.2. Sensor de pH.....	24
3. ANTECEDENTES DEL PROYECTO .....	26
3.1. PROTOTIPO DEL REACTOR .....	27
3.1.1. Fermentador.....	27
3.1.2. Diseño mecánico del biorreactor.....	28
3.1.3. Sistema de Enfriamiento por agua (water chiller, por sus siglas en inglés). 30	
3.1.7. Tablero de control y dispositivo de adquisición de datos. ....	35
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	39
4.1. GENERALIDADES.....	39
4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	45
4.2.1. Análisis de correlación. ....	45

4.2.2. Desviación típica.....	46
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS.....	47
5.1. PRUEBAS DE PERFIL TÉRMICO.....	47
5.2. PRUEBAS DE TRAZABILIDAD DE LA FERMENTACIÓN.....	49
5.2.1. Efectos de la fermentación sobre la calidad sensorial del café.....	61
6. CONCLUSIONES.....	67
7. RECOMENDACIONES.....	69
8. REFERENCIAS.....	71
9. BIBLIOGRAFÍA.....	75

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Café cereza o café maduro.....	17
Figura 2. Partes de un grano de café.....	18
Figura 3. Etapas de procesamiento de café: a) Recolección de café cereza. b) Despulpado. c) Secado de café. ....	19
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de beneficiado del café en Colombia.....	19
Figura 5. Fermentación natural de café. Café de Colombia.....	21
Figura 6. Anatomía de un electrodo de pH. ....	25
Figura 7. Modelo 3D del fermentador. ....	29
Figura 8. Vista del interior del tanque de fermentación.....	30
Figura 9. Esquema de funcionamiento del ciclo de enfriamiento.....	34
Figura 10. Diagrama de flujo del funcionamiento de la regulación de temperatura.....	36
Figura 11. Gabinete de control del fermentador con controlador TZN4S.....	37
Figura 12. Registrador de datos de sensores. ....	38
Figura 13. Ruta técnica para pruebas de fermentación. ....	39
Figura 14. Corte transversal del fermentador para observar la ubicación de las termocuplas. ....	42
Figura 15. Vista superior del fermentador con Termocuplas.....	42
Figura 16. Proporción de puntajes en catación entre cafés comerciales y especiales según SCAA.....	44
Figura 17. Comportamiento térmico del café durante la fermentación.....	48
Figura 19. Comparación de variaciones del pH del grano, en prueba 2 y 3.....	58
Figura 20. Variabilidad de los puntajes obtenidos en cada prueba de fermentación.....	66

## LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Características técnicas del fermentador de café de Penagos Hermanos .....	27
Tabla 2. Características técnicas del compresor .....	31
Tabla 3. Características técnicas del ventilador del condensador .....	32
Tabla 4. Características técnicas de la bomba de recirculación .....	32
Tabla 5. Especificaciones técnicas controlador de temperatura TZN4S. ....	35
Tabla 6. Especificaciones de experimento de perfil térmico .....	40
Tabla 7. Coordenadas de ubicación de Termocuplas .....	41
Tabla 8. Clasificación de cafés según puntajes de catación. ....	44
Tabla 9. Indicadores de correlación .....	45
Tabla 10. Resultados primera prueba de fermentador.....	50
Tabla 11. Resumen estadística descriptiva prueba 1 .....	51
Tabla 12. Correlaciones entre variables medidas en Prueba 1.....	51
Tabla 13. Resultados prueba 2 de fermentación. ....	53
Tabla 14. Correlación de variables, prueba 2 .....	55
Tabla 15. Resultados prueba 3 de fermentación. ....	56
Tabla 16. Correlación de variables prueba 3. ....	57
Tabla 17. Resultados prueba 4 de fermentación. ....	59
Tabla 18. Tendencia de sabores en prueba 1. Con mejores puntajes de catación (>85) .....	63
Tabla 19. Tendencia de sabores en prueba 2 y prueba 3. Con mejores puntajes de catación (>80) .....	64

## LISTA DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 1. Variaciones de temperatura del café durante la fermentación. ....	48
Gráfico 2. Variación de la temperatura del café, prueba 1. <i>T</i> fermentación 15°C ..	52
Gráfico 3. Evolución de la temperatura durante la fermentación. Prueba 2 .....	54
Gráfico 4. Evolución de la temperatura durante la fermentación. Prueba 3 .....	57
Gráfico 5. Evolución de la temperatura, prueba 4 .....	60
Gráfico 6. Variabilidad de los puntajes obtenidos en catación. ....	60
Gráfico 7. Comparación entre pruebas 2, control a 12°C y prueba 3, control a 15°C.....	62
Gráfico 8. Proporción en porcentaje, de calificación de café de la prueba 3.....	64

## RESUMEN

**TITULO:** DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UN BIORREACTOR USADO PARA LA FERMENTACIÓN DE CAFÉ DE LA EMPRESA PENAGOS HERMANOS.\*

**AUTOR:** JENNIFER AGÁMEZ HERNÁNDEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Fermentación, Controlador, Automatización, Cafés Especiales, Análisis Sensorial del café, pH, Temperatura.

Este trabajo de grado comprende la realización de un diagnóstico técnico del funcionamiento y operatividad de un biorreactor de fermentación para café, donde se busca establecer si es posible la automatización de la máquina. Para llevar a cabo esto, se presenta una descripción del proceso de fermentación con el fin de comprender la importancia que tiene ésta en la cadena de producción de cafés especiales.

Así mismo, se muestran características y generalidades del equipo de fermentación, para la apropiación de los principios de funcionamiento del fermentador y de los elementos que hacen parte del mismo (sensores de temperatura, sensores de pH, bomba de circulación de agua, enfriador, controlador de temperatura y dispositivo de adquisición). Se muestran y se analizan los resultados de pruebas de campo ejecutadas con el prototipo industrial del biorreactor para la fermentación de café de la empresa Penagos Hermanos, donde se estudia el comportamiento térmico de la masa de café, con el objetivo de determinar si la disposición actual de los elementos de medición es la más adecuada para las exigencias del proceso. Finalmente, se llevó a cabo un análisis global de los resultados de las fermentaciones, partiendo del análisis sensorial del café. Con este trabajo se espera brindar una ayuda para facilitar la implementación de un sistema automatizado de fermentación, en donde el caficultor asegure la calidad de la bebida final y que a su vez lleve el control del proceso en todo momento.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director del Proyecto MSc. Jaime Guillermo Barrero Pérez

## ABSTRACT

**TITLE:** DETERMINATION OF THE TECHNICAL FEASIBILITY FOR THE AUTOMATION OF A BIOREACTOR USED FOR THE COFFEE FERMENTATION OF THE COMPANY PENAGOS HERMANOS.\*

**AUTHOR:** JENNIFER AGÁMEZ HERNÁNDEZ.\*\*

**KEYWORDS:** Fermentation, Controller, Automation, Special Coffee, Sensory analysis, Cup Evaluation, pH, Temperature.

This paper includes the realization of a technical diagnosis of the operation of a fermentation bioreactor for coffee, where it is sought to establish if it is possible to carry out the automation of the machine. A brief description of the fermentation process is presented, oriented to the compression of the realization of this important link that forms part of the special coffee production chain.

It shows the features and generalities of the fermentation equipment, for appropriation of the principles of operation of the fermentation system and the elements that are part of it (temperature sensors, pH sensors, water circulation pump, chiller, temperature controller and acquisition device). The results of field tests performed with the industrial prototype of the bioreactor for the coffee fermentation of the company Penagos Hermanos, where the thermal behavior of the coffee mass is studied, are shown and analyzed, to determine if the current layout of the measuring elements is the most suitable for the demands of the process. Finally, an overall analysis of the results of the fermentations is carried out, starting from the sensorial analysis of the coffee. With this work, it is hoped to provide an aid to facilitate the implementation of an automated fermentation system, where the coffee grower ensures the quality of the final beverage and in turn takes control of the process always.

---

\* Degree Work

\*\* Physico-Mechanical Engineering Faculty. School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: MSc. Jaime Guillermo Barrero Pérez.

## INTRODUCCIÓN

La civilización en la cual nos relacionamos, cada vez más urbana y en búsqueda de un mejor aprovechamiento de los recursos presentes, demanda constantemente el propósito de innovar en la prestación de servicios y en el desarrollo de procesos. Actualmente, la aplicación de instrumentación electrónica, la sistematización y control de procesos se ha convertido en una ventaja competitiva a nivel industrial, de tal forma que se permite lograr una diferenciación en la generación de productos y servicios innovadores; por otra parte, cuando las actividades son automatizadas, llevan implícito la realización de un monitoreo constante de las tareas que se desarrollan durante un proceso, destacando que se proporciona un procesamiento adecuado a los datos; lo que a su vez contribuye a brindar un servicio a nivel tecnológico, que sea útil a la sociedad [1].

Teniendo en cuenta lo anterior, el papel que juega la ingeniería en su búsqueda del equilibrio entre las necesidades del usuario y desarrollo del nivel tecnológico, es cada vez mayor y complejo. En consecuencia, es fundamental impulsar innovaciones tecnológicas que ayuden a brindar mayor satisfacción a los usuarios. Con esta perspectiva, Penagos Hermanos busca incorporar tecnologías de la información, que fomenten la optimización y especialización de los procesos de producción agroindustrial que se desarrollan durante la post-cosecha o beneficio del café. Es así como a través de la implementación de un sistema de automatización de una máquina para la fermentación café, se dará valor agregado al producto final, por tanto, se posibilita el ingreso de los caficultores al mercado de cafés especiales<sup>1</sup> [5].

---

<sup>1</sup> Un café es considerado especial cuando es percibido por alguna característica que lo diferencia y logra una puntuación en catación de 80 a 80,75.

Es necesario recalcar que, el cultivo de café en Colombia representa un sector de especial relevancia para la estabilidad económica y social del país, perfilándose como un eje articulador del desarrollo rural nacional. De igual manera, Colombia se encuentra ubicado entre los principales países productores y es miembro de países exportadores de café desde 1963 [4]; lo cual indica que es un verdadero motor de desarrollo de la economía rural colombiana [3, 14]. Considerando la importancia que constituye el café en la economía nacional, se hace de vital importancia sistematizar un proceso que ha venido realizándose básicamente de forma artesanal y con la experticia pura de los caficultores colombianos [3].

Actualmente Penagos Hermanos cuenta un prototipo industrial de un biorreactor de fermentación de café, en donde se pretende implementar un sistema de automatización para mejorar la operatividad del equipo y, en consecuencia, estructurar un proceso que en la mayoría de los casos se realiza de forma tradicional. Con el objetivo de materializar la idea de sistematización de este tratamiento de post-cosecha (fermentación), que le da tanto valor agregado al café, llegando incluso a determinar si entra en categoría de cafés especiales; en este trabajo se llevará a cabo un estudio y análisis del proceso, centrándose en la descripción de las características y generalidades que hacen parte del mismo. En este sentido, se espera con este trabajo contribuir a plantear alternativas para el mejoramiento del equipo, de manera que al final del proyecto se puedan tener bases para la implementación de un sistema de automatización del equipo fermentador de la empresa.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar pruebas a un biorreactor de fermentación para café, de la empresa Penagos Hermanos, para determinar si la instrumentación electrónica usada actualmente es la adecuada para la automatización del equipo de fermentación.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar estudio técnico de planos y protocolos de operatividad del biorreactor de fermentación para café, de la empresa Penagos Hermanos para comprender su funcionamiento.
- Estudiar las características y especificaciones técnicas de la instrumentación y del sistema actuador, para establecer si son los adecuados para el proceso.
- Ejecutar pruebas de campo para obtener un perfil del comportamiento térmico de la masa de café.
- Analizar los resultados obtenidos, validar la funcionalidad del equipo, y determinar si es posible su automatización.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 PROCESAMIENTO DEL CAFÉ

El café es sin lugar a dudas uno de los productos que más tiene relación con el ser humano. Aproximadamente 50 millones de familias lo cultivan en más de 50 países como Asia, África, y Latinoamérica. El trabajo y esfuerzo para producir un café de calidad no ocurre por completo en la preparación de un *espresso*<sup>2</sup>, sino en la dedicación y paciencia que le imprime el productor de café en las montañas de un país como Colombia [16]. Es por ello que se hace importante conocer los detalles del proceso de cosecha y post-cosecha del café, del éxito de dichos procesos dependerá en gran medida, si la bebida final alcanzará la calidad deseada [16].

Figura 1. Café cereza o café maduro.



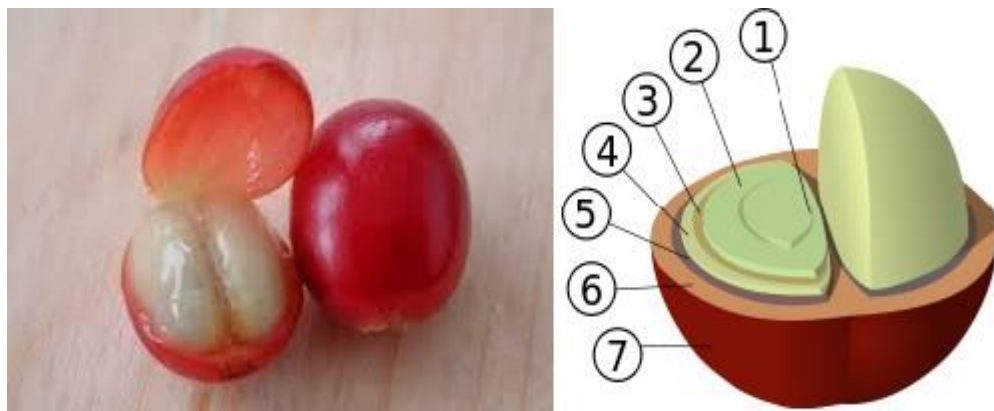
Fuente: Café de Colombia “Del árbol a la taza” [38].

---

<sup>2</sup> Espresso. Es un método de preparar café, este tipo de café es de sabor intenso.

Los granos de café son las semillas de frutos que parecen cerezas y tienen piel roja cuando están maduros, a la piel se le conoce como exocarpio (7). Por debajo la pulpa, el mesocarpio (6), se encuentran dos granos enfrentados el uno contra el otro, cada uno recubierto con una especie de pergamino llamada endocarpio (4).

Figura 2. Partes de un grano de café.



Fuente: Coffee Bean Structure [37]

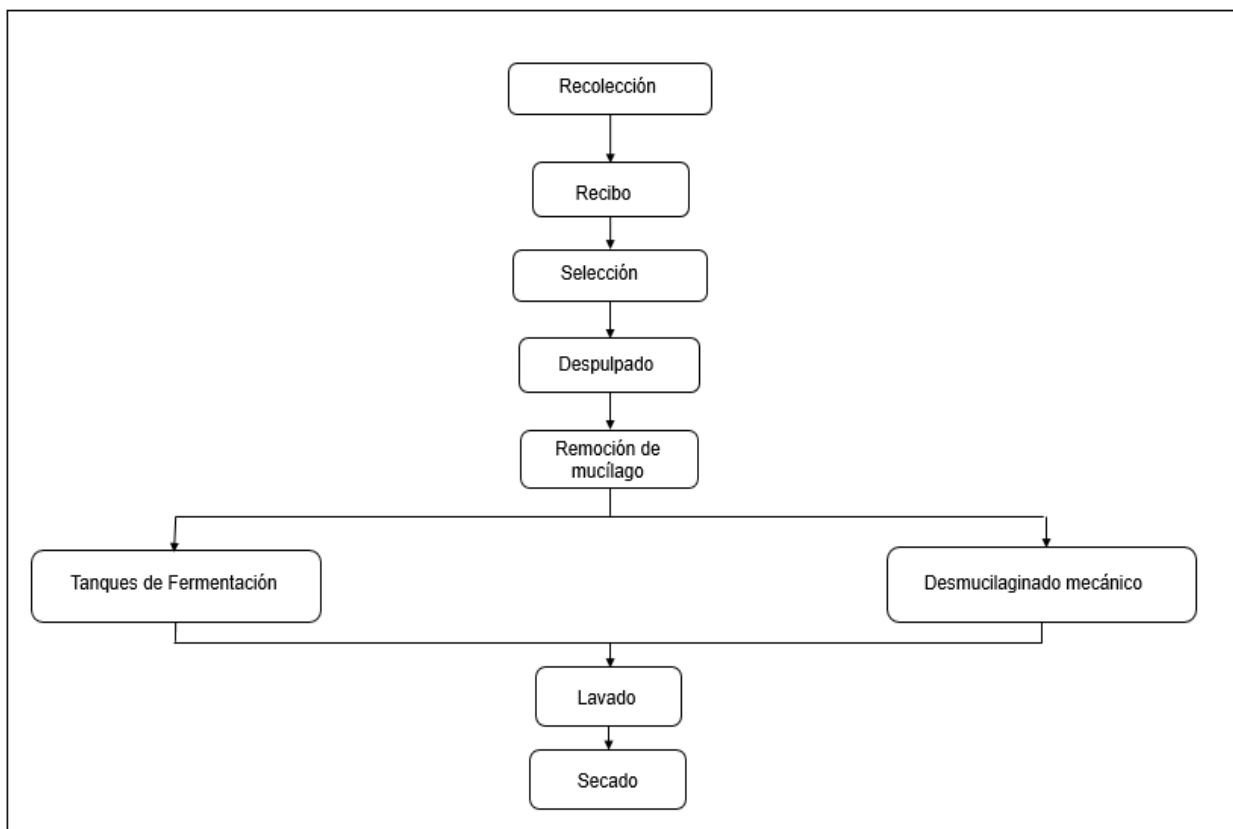
Cuando el fruto está maduro una capa delgada y viscosa (5) (mucílago) cubre el pergamino. Por debajo del pergamino los granos están revestidos de una piel más delgada, una membrana plateada llamada tegumento (3). Cada cereza contiene dos granos de café (2), generalmente; cuando hay uno sólo se llama caracol. Ahora bien, hay que quitar los granos de café del fruto y secarlos para poder tostarlos, y eso se puede realizar por dos métodos: por vía seca o beneficio seco y por vía húmeda o beneficiado húmedo [16].

Figura 3. Etapas de procesamiento de café: a) Recolección de café cereza. b) Despulpado. c) Secado de café.



Fuente: Café de Colombia “Del árbol a la taza” [38].

Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de beneficiado del café en Colombia.



## 2.2 FERMENTACIÓN

Desde el punto de vista bioquímico, la fermentación es un proceso en el cual las sustancias orgánicas (sustrato) sufren cambios químicos en los cuales se produce energía [31]. Esta energía es usada en el metabolismo de los microorganismos que hacen parte del proceso. La fermentación puede ser aerobia o anaerobia, es decir, con presencia o ausencia de oxígeno; es así, como durante la fermentación de café se degrada el mucílago que recubre el grano y consecuentemente, facilita el secado del mismo [3, 29, 31]. Existen dos formas de realizar la fermentación: *en seco*, y *húmedo*. En el proceso seco, el café maduro (cereza) recolectado, se esparce sobre delgadas capas en plataformas que permiten el secado que dura aproximadamente de 10 a 20 días. A lo largo de este tiempo, la fermentación natural microbiana ocurre dentro de la cereza, a su vez, se degradan la pulpa y el mucílago. El material sobrante, es removido mecánicamente y finalmente los granos son secados [3, 6].

En el proceso húmedo, la pulpa de la cereza es removida mecánicamente, posteriormente los granos son llevados a tanques con agua donde la fermentación natural se lleva a cabo en un período de 12 a 20 horas, durante el cual se remueven el mucílago que recubre el café, este método se puede observar en la figura 5 [36]. En ambos casos, la función principal de fermentar el café es remover el mucílago, sin embargo, el metabolismo de los microorganismos producido a lo largo del proceso puede afectar la fragancia, el aroma y el sabor del café (bebida final) [30, 31]. Por otra parte, en el desarrollo de la fermentación se genera calor como consecuencia del metabolismo de las células, si la temperatura del medio aumenta a valores perjudiciales puede llegar a producirse, por ejemplo, ácido acético, sabor que no es deseable en la bebida final; de manera que se debe remover el calor en exceso por medio de sistemas de alimentación de agua fría [3, 6, 7].

Figura 5. Fermentación natural de café. Café de Colombia



Fuente: Café de Colombia. "Beneficio del café" [36].

Por ser el tiempo de fermentación un factor decisivo en la calidad de café, es necesario realizar muestreos periódicos de la masa de café en el tanque de fermentación, para determinar el punto óptimo antes de iniciar el proceso de lavado final del grano [17, 30]. En la práctica, para saber el punto de fermentación frecuentemente se usan métodos tradicionales como introducir un madero y observar el orificio que es dejado por este, si la masa de café no se deforma se considera que el café está listo para lavar; de igual manera, la sensación, al tacto, áspera y de cascajo, es el método del tacto [34]. Sin embargo, en muchas ocasiones, aplicando ambos métodos, el tiempo determinado para lavar el café fue menor que cuando se obtuvo remoción de mucílago al 97% [34].

Si el café se sobre fermenta, se mancha, pierde peso, se avinagra la almendra y se afecta la calidad [17]. El proceso de fermentación en húmedo se conoce como beneficio húmedo. El beneficio húmedo constituye un trabajo artesanal que lleva

implícito la tradición cafetera colombiana y se establece como uno de los elementos que garantizan la calidad del café. A pesar de que las propiedades de la fermentación del café han sido estudiadas desde hace cerca de 50 años, aún es realizado de forma artesanal y con operaciones sin control [3, 7, 30].

## 2.3 INSTRUMENTACIÓN

La electrónica se ha convertido en una tecnología horizontal que sirve de complemento a todas las demás porque permite medir y controlar sus parámetros característicos, por ende, la medición y el control de procesos son fundamentales para generar los mejores resultados a nivel operacional de un equipo [18]. Es por ello que, en este proyecto se hace fundamental tener equipamientos y dispositivos electrónicos, que sean apropiados para medir y registrar las variables que son de interés para la correcta operación del equipo, durante todo el desarrollo de la fermentación.

En general, se suelen llamar sensores a dispositivos que se encuentran situados en un cierto medio, de modo que generan una señal a partir de una forma física (nivel, temperatura, presión, etc.), y la convierten en otra señal de una forma física diferente. Los elementos que realizan la conversión antes citada reciben el nombre de transductores [18].

**2.3.1 Sensores de temperatura.** Una de las magnitudes físicas en donde se presenta mayor interés es la temperatura [19]. La mayoría de los sensores necesitan un estrecho contacto directo del elemento sensible con el medio en cuestión. El comportamiento dinámico de un sensor de temperatura lo expresa la constante de tiempo  $\tau$ . Esta constante indica el tiempo necesario para que el sensor pueda llegar por ejemplo al 63%, 90% o 98% de su indicación final en caso de un cambio brusco de la temperatura.

Este tiempo, si bien depende de la capacidad térmica de la sonda, también se ve afectado por el coeficiente de transferencia de calor respecto al cuerpo medido, es decir, cuanto mayor es el coeficiente, con mayor rapidez el sensor indica su valor final. Existe gran variedad de sensores de temperatura, los cuales se encuentran clasificados en dos grandes grupos; sensores de contacto, algunos como: termopares, RTD y sensores de No-contacto.

**2.3.2 Termopares.** Puede ser considerado, esencialmente, como un dispositivo para la conversión de la energía térmica en energía eléctrica. Son tan populares por su simplicidad, facilidad de utilizar y rapidez de respuesta a los cambios de temperatura; adicional a esto, tienen un amplio rango de variación que puede bajar hasta los  $-200^{\circ}\text{C}$  y medir hasta los  $2000^{\circ}\text{C}$ . Puede ser considerado, esencialmente, como un dispositivo para la conversión de la energía térmica en energía eléctrica [21].

**2.3.3 Detectores de temperatura por resistencia.** RTD, por sus siglas en inglés, los detectores de temperatura por resistencia tienen un coeficiente de temperatura positivo (PTC), donde la salida es lineal, produciendo una medida de temperatura bastante exacta, ahí radica su principal ventaja, su exactitud puede ser tan pequeña como  $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$ . La RTD es un dispositivo pasivo, tiene una resistencia que varía linealmente con la temperatura, una forma adecuada de convertir los cambios de la resistencia a tensión es utilizar un puente de Wheatstone. La respuesta dinámica de un sensor RTD es relativamente baja comparada con otros sensores [23].

**2.3.4 Sensor de pH.** El pH indica la medida de la acidez o basicidad de una solución [25]. El pH, esencialmente, es la concentración de iones o cationes hidrógeno  $[H^+]$  presentes en una solución; la definición oportuna de pH es logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones de hidrógeno en una solución [25, 26]:

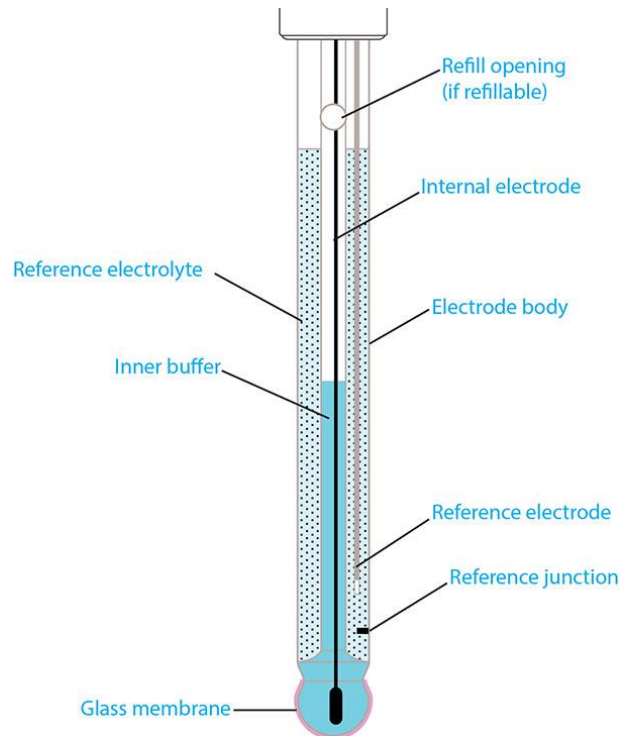
$$pH = -\log_{10}[a_{H^+}] \quad (1)$$

Los sensores de pH miden el pH midiendo la tensión o diferencia de potencial de la solución en la cual es sumergido. Por medio del voltaje medido, es posible determinar la concentración de iones de hidrógenos usando la ecuación de Nernst, en donde se relaciona la concentración de iones de Hidrógeno  $[H^+]$  y el voltaje [25, 26, 27]:

$$E_{cell} = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln(K_{eq}) \quad (2)$$

Para comprender de qué está hecho un sensor de pH, es necesario recordar que para que fluya electricidad a través de algo, se debe cerrar el lazo o completar el circuito. De manera que, para hacer fluir corriente eléctrica en una solución buffer se deben poner dos electrodos (terminales eléctricas) dentro de ésta. Generalmente se utiliza un electrodo de referencia y un electrodo de medición [26, 27]. El electrodo que permite hacer la medición se encuentra dentro de un cristal de vidrio particular, que contiene sodio y calcio, el cual es especialmente sensible a los iones de hidrógeno, por las cualidades del material del que está hecho su superficie [27].

Figura 6. Anatomía de un electrodo de pH.



Fuente: Glass pH Electrode Structure and Design [39].

### 3. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

El proyecto Fermentación Controlada surgió como una alternativa de solución tecnológica para el pequeño y mediano caficultor que, al producir cafés de categorías especiales, deben realizar fermentación del café. Los primeros prototipos de pruebas se fabricaron en el año 2014, estos consistían en acelerar la fermentación por medio de calentamiento del café llevando la temperatura hasta los 30°C; los resultados no fueron satisfactorios, debido a que, cuando se calientan los granos, la cinética de las reacciones de los microorganismos que fermentan, ocurre con mayor rapidez [31]. En consecuencia, se obtienen sabores no agradables en la bebida, como vinagre o ácidos.

Más adelante, basados en investigaciones hechas por Cenicafé (Centro de Investigaciones de Café de Colombia) los prototipos se rediseñaron para llevar a cabo la refrigeración del café durante la fermentación, de manera que, el proceso se efectuaba de una forma más lenta, pero era posible lograr buena calidad del café [3, 5, 30]. Las pruebas continuaron y en la actualidad se cuenta con tres (3) prototipos que básicamente controlan la temperatura del grano, mediante un sistema que regula la temperatura del agua, que se suministra a la camisa de enfriamiento del reactor.

Las expectativas alrededor del proyecto de Fermentación, en la empresa Penagos Hermanos, han crecido con los años. El significado de este proyecto, como solución tecnológica para el caficultor es tan grande como el que tiene para la empresa realizar el primer equipo que incorpora elementos de control, automatización y electrónica. Esencialmente, sería como dar el primer paso para marcar un hito en la evolución tecnológica de la compañía.

### 3.1 PROTOTIPO DEL REACTOR

**3.1.1 Fermentador.** Un fermentador o biorreactor de fermentación, es un recipiente que provee las condiciones adecuadas a una cepa microbiana para que pueda generar eficientemente un determinado metabolito [24]. La eficiencia de un fermentador depende de la concentración de biomasa, el mantenimiento de las condiciones asépticas y del mantenimiento de las condiciones óptimas de operación [24].

Las características técnicas del equipo de fermentación de Penagos se muestran en la tabla 1. El tipo de operación que se llevará a cabo en el reactor, será un proceso por lotes o discontinuo, en donde se suministra el café despulpado sin lavar, se establece una temperatura deseada en el dispositivo de control y finalmente se extrae cuando haya concluido el tiempo de fermentación que el productor considere adecuado.

Tabla 1. Características técnicas del fermentador de café de Penagos Hermanos

PARÁMETRO	VALOR
Capacidad del reactor	350 kg de café despulpado
Capacidad de enfriamiento	2.2 kW / 7 506.71 BTU
Capacidad volumétrica del reactor	453.6 L
Capacidad volumétrica de tanque de almacenamiento de agua	246.3 L
Control de Temperatura	Regulación por camisa de enfriamiento
Temperatura máxima	100°C
Tiempo de fermentación	12 a 36 horas
Temperatura mínima de fermentación	12°C
Temperatura máxima de fermentación	18°C

Este fermentador opera, en épocas pico de cosecha de café, todos los días con los tiempos de fermentación que son sugeridos por el productor de café. En general, el proceso se realiza de la siguiente manera: se fermenta un lote, se saca, se lava el biorreactor y de nuevo se ingresa café en el mismo. Este equipo es un eslabón en la larga cadena de procesamiento de café, anteriormente explicada, es por ello que conlleva gran relevancia realizar el proceso de la forma más adecuada donde se obtenga buena calidad del café.

**3.1.2 Diseño mecánico del biorreactor.** El reactor de fermentación fue diseñado basado en estudios del estado del arte de equipos con la misma funcionalidad y en modelos similares de biorreactores usados en procesos de fermentación de distintas clases de sustratos. Sin embargo, el diseño fue adaptado a las necesidades que se requieren cuando se fermenta café en sustrato sólido, ejemplo de ello es la salida del café, que debe ser lo suficientemente grande para evitar que haya atascos del grano. El reactor es la suma de un cono truncado más un cilindro, todo el tanque es de acero inoxidable para mantener la inocuidad y no alterar la calidad del café con sabores ajenos al proceso. El modelo virtual 3D que se presenta en la figura 7, es parte del desarrollo del prototipo.

Figura 7. Modelo 3D del fermentador.



El interior del fermentador, posee ductos por donde también se conduce el agua que pasa por la camisa de enfriamiento, como se puede ver en la figura 8, los ductos están conectados por la chaqueta de enfriamiento; así mismo, se observa que en los ductos que están en la parte superior se encuentran adheridas unas “argollas” en donde son ubicados los sensores de temperatura (termocuplas).

Figura 8. Vista del interior del tanque de fermentación



**3.1.3 Sistema de Enfriamiento por agua (water chiller, por sus siglas en inglés).** La ganancia de calor del biorreactor es dada fundamentalmente, por dos maneras; la primera es el calor proveniente de los alrededores y la segunda es debido al calor generado por el proceso. Como se ha explicado en ítems anteriores, la fermentación de café es un proceso exotérmico debido a las reacciones que llevan a cabo los microorganismos responsables de este proceso, esto quiere decir que, a medida que transcurre el tiempo de fermentación, la temperatura tiende a aumentar hasta un máximo estudiado de 26°C [3, 29, 31, 33].

Por ello, para evitar alteraciones de la calidad final de la bebida lo más recomendable es controlar la temperatura del grano [3, 6, 7]. Lo que hace indispensable implementar un sistema de enfriamiento [3, 24]. El equipo actual de fermentación, cuenta con una camisa de enfriamiento. Es por esta camisa que fluye el líquido refrigerante (en este caso es agua), que absorbe el calor generado del proceso. La camisa de enfriamiento tiene definida las siguientes características:

- I. Bajos requerimientos de energía
- II. Disminución de costos de material
- III. Volumen del reactor
- IV. Fácil limpieza

Un proceso de enfriamiento por enfriador remueve el calor de una fuente objetivo. El calor removido se basa en éste principio: el calor se transfiere desde una fuente más caliente hacia otra más fría. Un enfriador está compuesto de dos partes principales, un fluido y un circuito de refrigeración. El enfriador transfiere el calor del proceso al circuito del fluido y luego al circuito de refrigeración.

Los componentes básicos de un sistema de refrigeración son los siguientes:

- **Compresor**

Tabla 2. Características técnicas del compresor

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Referencia</b>	NJ6220Z
<b>Voltaje de alimentación</b>	208 – 230 V a 60Hz
<b>Corriente del compresor en funcionamiento</b>	8 A
<b>Potencia nominal</b>	1664 W
<b>Corriente con rotor bloqueado</b>	42 A
<b>Fase de voltaje (PH)</b>	1

El compresor es el corazón del circuito de refrigeración, allí el refrigerante en estado vapor es comprimido a una alta presión, de esta manera, se convierte en líquido. Es de tipo hermético, es decir, el motor y el compresor se encuentran dentro de una carcasa sellada, son más económicos, pero ofrecen una desventaja grande y es

que, al estar sellados se dificulta su reparación en caso de estar en mal funcionamiento.

- **Condensador**

Tabla 3. Características técnicas del ventilador del condensador

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Voltaje de alimentación</b>	208/230 V a 60Hz
<b>Potencia</b>	¼ HP
<b>Velocidad</b>	1300 – 1550 RPM
<b>Corriente nominal</b>	0.52

El condensador es un intercambiador de calor, en donde el refrigerante pierde calor y se convierte en líquido. Este condensador emplea un ventilador para sacar el calor del refrigerante y pasa al ambiente.

- **Bomba de recirculación**

Tabla 4. Características técnicas de la bomba de recirculación

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Potencia</b>	0.5 HP/ 0.37 KW
<b>Voltaje de alimentación</b>	110/220 V
<b>Velocidad</b>	3560 RPM
<b>Caudal máximo (Qmáx)</b>	35 /min

La bomba es la que realiza la circulación del fluido de enfriamiento, que en este caso es agua. La bomba se encarga de mover el agua, desde el tanque de almacenamiento hacia la válvula de ingreso de agua de la camisa de enfriamiento,

que se encuentra en la parte inferior del tanque. El agua sigue su recorrido por la chaqueta del biorreactor y también por los ductos que atraviesan el tanque. Finalmente, el agua sale por la parte superior del reactor de vuelta al enfriador para que se enfríe de nuevo. En el fermentador, la bomba de recirculación funciona todo el tiempo, es decir, ésta se encuentra moviendo constantemente el agua del tanque a la camisa.

En general, la potencia del sistema de enfriamiento está determinada por lo siguiente:

$$P_{Enfriamiento} = P_{compresor} + P_{Vent. Condensador} + P_{Motobomba} = 2220.425 = 2.22 [k\omega]$$

Teniendo en cuenta el mayor tiempo de fermentación, 36 horas, en el que permanece encendido el equipo; se obtiene lo siguiente:

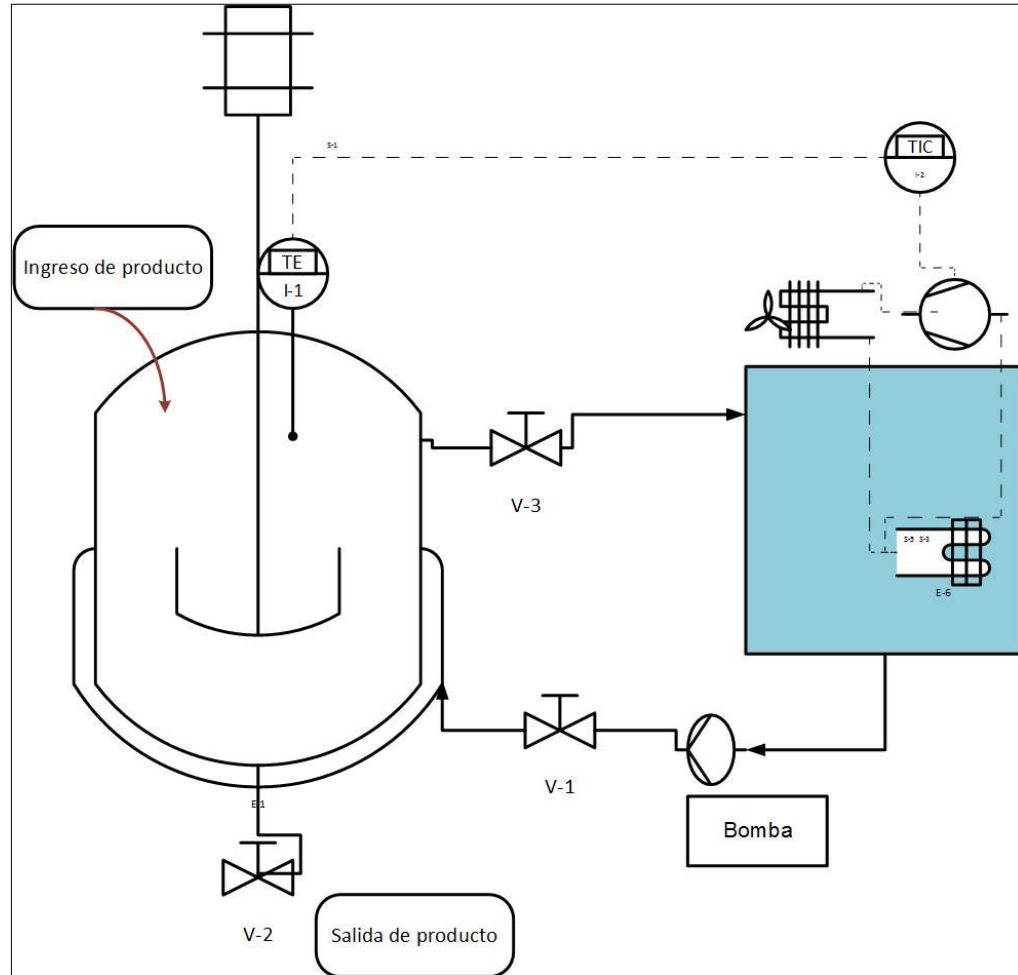
$$P_{Enfriamiento} = 2.22[k\omega] * 36 h = 79.92 [k\omega - h]$$

Para establecer el precio del consumo del sistema de enfriamiento, funcionando durante una corrida de fermentación de 36 horas, simplemente se multiplica la potencia de enfriamiento por el valor del kw-h, donde el precio es de \$374,42. Por tanto, se obtiene el costo de operación del sistema de enfriamiento:

$$Costo de operación_{36 horas} = P_{Enfriamiento} * Precio k\omega - h$$

$$Costo de operación_{36 horas} = 79.92 * 374.42 = \$29 924.046$$

Figura 9. Esquema de funcionamiento del ciclo de enfriamiento



En la figura 9, se presenta la explicación del esquema de funcionamiento del ciclo de enfriamiento con el cual se regula la temperatura. Está compuesto de un compresor, una bomba que hace circular el agua desde el tanque de almacenamiento de agua, y un serpentín por donde pasa refrigerante R134a, el cual se encarga de enfriar el agua contenida en el tanque de almacenamiento.

El proceso de enfriamiento ocurre básicamente de la siguiente manera: una vez se energiza el equipo, lo primero que ocurre es que, la bomba empieza a mover el agua del tanque de almacenamiento hacia la camisa del reactor; el agua fría ingresa por la parte inferior del reactor pasando por la válvula V-1, llena toda la camisa y sale

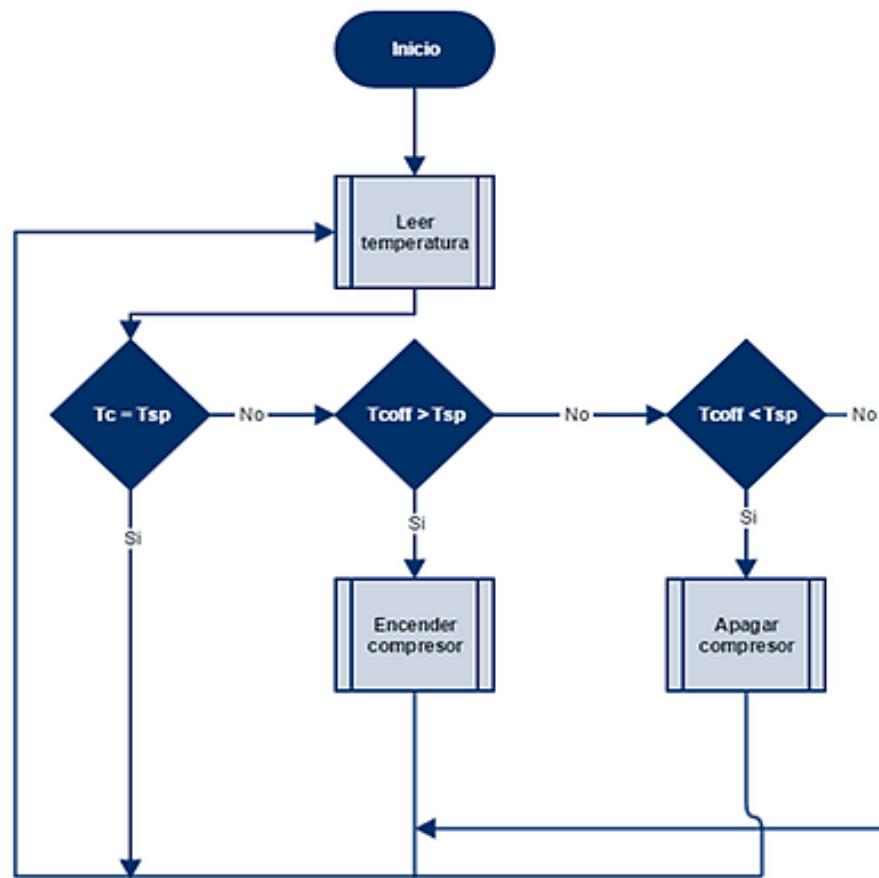
agua por la válvula V-3 regresando al tanque de almacenamiento, no sin antes haber pasado por el compresor y el condensador. En este tanque, está contenida el agua que el evaporador (serpentín) está enfriando y nuevamente se repite el proceso.

**3.1.4 Tablero de control y dispositivo de adquisición de datos.** El prototipo del fermentador que se tiene actualmente en la empresa, cuenta con un controlador de temperatura electrónico de gama baja, de marca Autonics referencia TZN4S (ver figura 11), las especificaciones técnicas del controlador de temperatura se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones técnicas controlador de temperatura TZN4S.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Alimentación</b>	110/240 V
<b>Pantalla Visualización</b>	Display 7 segmentos
<b>Parámetros que se muestran</b>	Rojo: PV (Valor de proceso), Verde: SV (Valor establecido)
<b>Tipos de entrada</b>	4 - 20mA, RTD, Termocuplas (tipo J, tipo K), 0-10 V
<b>Tipos de control</b>	ON/OFF, Control P, PI, PD, PIDF, PIDS

Figura 10. Diagrama de flujo del funcionamiento de la regulación de temperatura.



Este controlador tiene como señal de entrada la información que recibe del sensor de temperatura (Termocupla tipo K), ubicada en el interior del tanque de fermentación en contacto con el café, el esquema de funcionamiento se muestra en la figura 10. La señal de salida del controlador TZN4S va dirigida al actuador que en este caso es el compresor (Encender o apagar el compresor), pasando antes por una protección eléctrica que consiste en contactores de marca Chint.

Si el valor de proceso (PV) es mayor que el valor preestablecido (SV) por el usuario o el productor de café, el controlador enviará la señal de activación o encendido al compresor, para que éste a su vez inicie el proceso de enfriar el agua que está contenida en el tanque de almacenamiento de agua. La bomba, que funciona

constantemente, mueve el agua que está siendo enfriada, hacia la chaqueta del reactor, como consecuencia, la temperatura del café empezará a descender. De manera que, cuando el sensor del controlador detecte que la temperatura del café (PV) es menor que el valor de temperatura preestablecido (SV), el controlador enviará la señal de apagado del compresor; manteniéndolo así hasta que vuelva a subir PV en el cual se iniciará el ciclo, ya descrito, nuevamente.

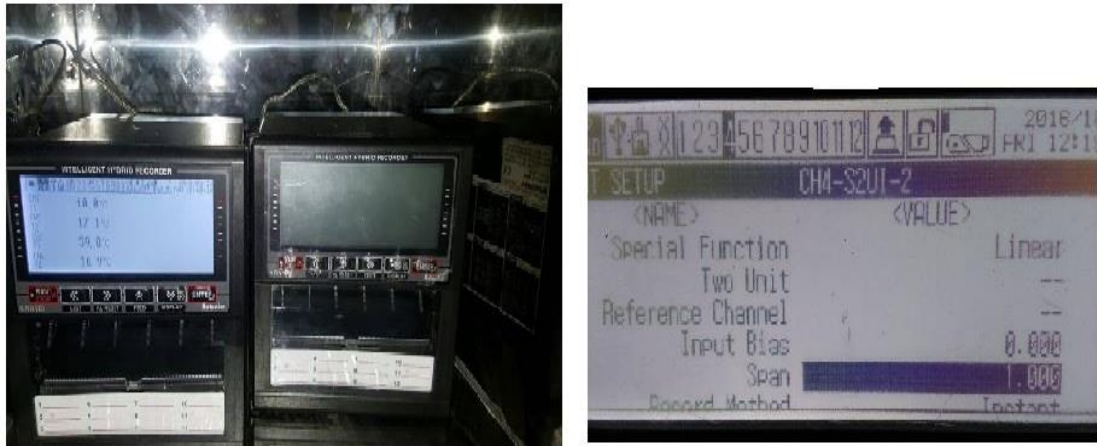
Figura 11. Gabinete de control del fermentador con controlador TZN4S.



Las mediciones registradas por los sensores se adquieren a través de un dispositivo electrónico de adquisición de datos, que, además, tiene almacenamiento, no es una memoria volátil. Este dispositivo de Autonics (ver figura 12), tiene una tarjeta de adquisición universal y es capaz de registrar datos con salidas tipo RTD (Pt100), termocuplas (tipo k, J...), 4 - 20 mA, 0 – 10 V. Una vez que se haya configurado el tipo de entrada que se desea leer de un elemento de medición, se empieza a mostrar su valor y a su vez, la información medida queda almacenada en el dispositivo, para su posterior extracción por medio de una memoria USB.

El *registrador de datos*, únicamente adquiere, registra y guarda datos, pero no efectúa mandos de control. Mientras el dispositivo siempre esté encendido se van a estar registrando las variables que se estén midiendo, de lo contrario no se tendrá ninguna información registrada.

Figura 12. Registrador de datos de sensores.



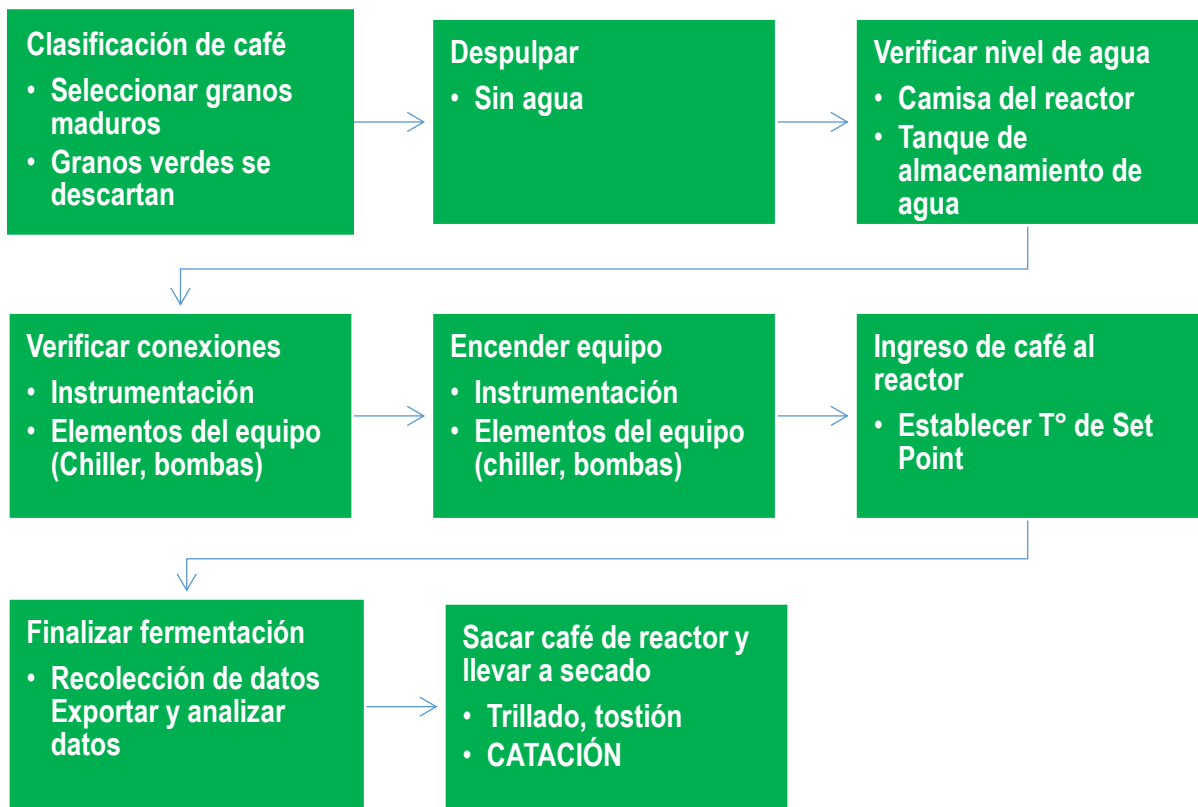
Los datos que son registrados, se pueden extraer del dispositivo y exportarlos a Microsoft Excel; lo que es una gran ventaja cuando se requiere hacer análisis de las mediciones hechas por los sensores. El archivo que se exporta es tipo .txt

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1 GENERALIDADES

Para llevar a cabo las pruebas experimentales de fermentación en el equipo, se siguió el procedimiento plasmado en la ruta técnica presentada en la figura 13; de manera que, el procedimiento para la realización de estas pruebas se efectuara estructuradamente y de forma que se puedan obtener datos fiables del proceso.

Figura 13. Ruta técnica para pruebas de fermentación.



En general, se llevaron a cabo dos tipos de experimentos, el **primer experimento**, tuvo como objetivo determinar el comportamiento térmico del café durante la fermentación, para conocer si existen variaciones de temperatura o si, por el contrario, la fermentación se está efectuando de manera uniforme. Para el experimento de perfil térmico se utilizaron cuatro (4) lotes de café para fermentar, es decir, se hicieron cuatro corridas de fermentación. Pero en este trabajo se presenta la validación de los resultados finales. Se diseñó el experimento para tener lectura de ocho (8) sensores de temperatura, incluido el sensor que va hacia el controlador, es decir, hay siete sensores (7), cuyos datos son adquiridos por medio del registrador de datos y otro más (1) es del controlador, en la tabla 6 se muestran las especificaciones para la realización de este experimento, teniendo en cuenta también la ruta técnica señalada anteriormente. Los sensores de temperatura fueron ubicados sobre alambres de acero inoxidable, en las partes que se opinó, eran las más críticas del fermentador, ya que no estaban muy cercanas a los ductos de enfriamiento.

Tabla 6. Especificaciones de experimento de perfil térmico

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Tipo de material a procesar</b>	Café despulpado clasificado y sin lavar
<b>Cantidad</b>	350 kg
<b>Tiempo de fermentación</b>	18 horas
<b>Hora de inicio</b>	5 pm
<b>Hora de finalización</b>	11 am
<b>Temperatura de <i>set point</i></b>	12°C
<b>Número de sensores de temperatura en el registrador</b>	7 Termocuplas tipo K
<b>Número de sensores de temperatura en el controlador</b>	1 Termocupla tipo K
<b>Lugar</b>	Mesa de Los Santos

La disposición de las termocuplas en el tanque, se realizaron de la siguiente forma: se ató cada Termocupla a un tubo PVC de ½” a una altura determinada, este tubo se colgó sobre alambre de acero inoxidable para poder variar el radio de ubicación del tubo, esto se hizo con el fin de obtener información térmica de la mayor parte del volumen del reactor; las coordenadas de ubicación de los sensores se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Coordenadas de ubicación de Termocuplas

<b>SENSOR</b>	<b>Radio [cm]</b>	<b>Altura [cm]</b>
T1	24	54
T2	22	39
T3	24	44
T4	14	59
T5	12	39
T6	12	44
T7	14	50
TCont.	22	59

En la figura 14 y 15, se puede observar un esquema de cómo es la disposición final de los sensores de temperatura al momento de realizarse la prueba. Durante la realización del experimento se evidenció que, el montaje de estos sensores representaba un inconveniente, en vista de que, cuando el tanque se llenaba completamente de café, habían termocuplas que, debido a la profundidad de la ubicación, quedaban sumergidas dentro de la masa de café, por lo que, en algunos momentos se visualizaban lecturas erróneas de temperatura en el registrador.

Figura 14. Corte transversal del fermentador para observar la ubicación de las termocuplas.

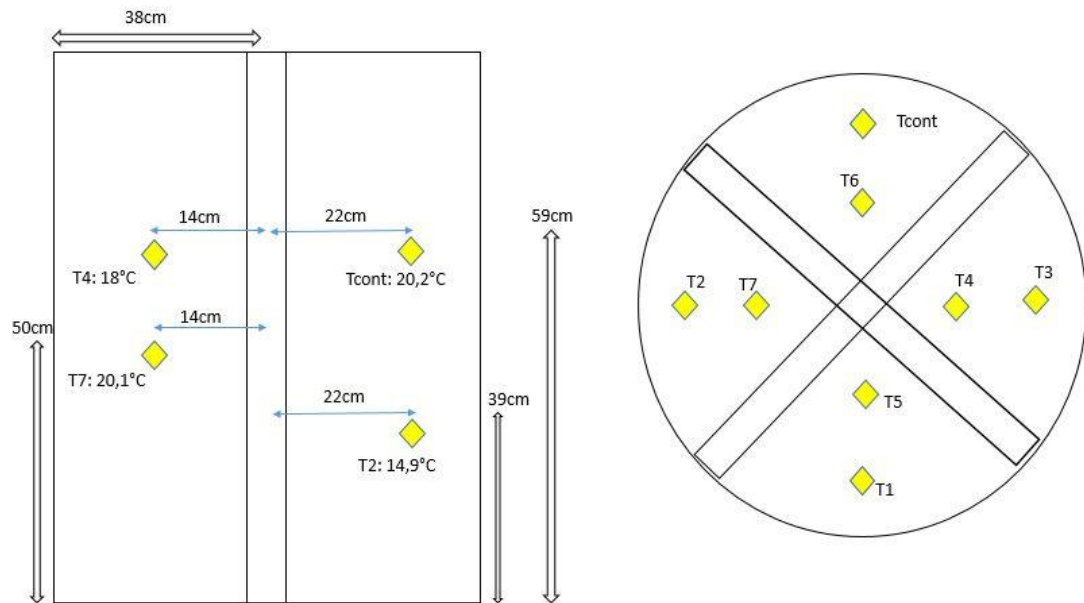
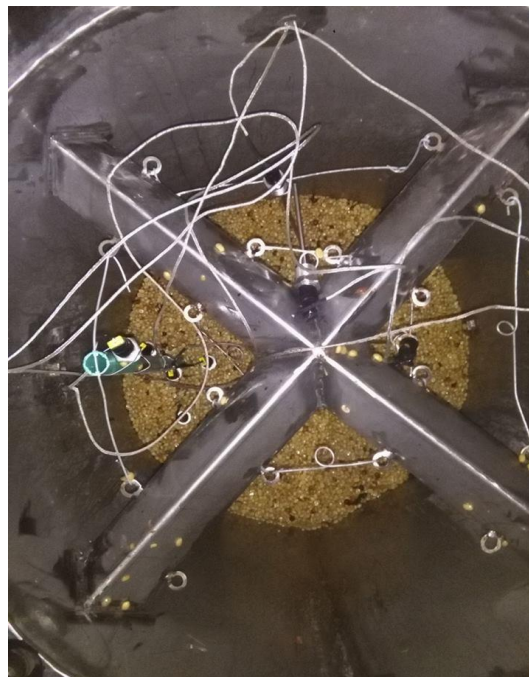


Figura 15. Vista superior del fermentador con Termocuplas



El **segundo experimento** tuvo como finalidad conocer con mayor profundización el proceso de fermentación del café, donde lo que se busca es determinar la trazabilidad de las variables que intervienen en el proceso: tiempo de fermentación, temperatura de fermentación del café y pH. Así mismo, a partir de estos resultados se buscaba poder establecer correlaciones entre ellas:

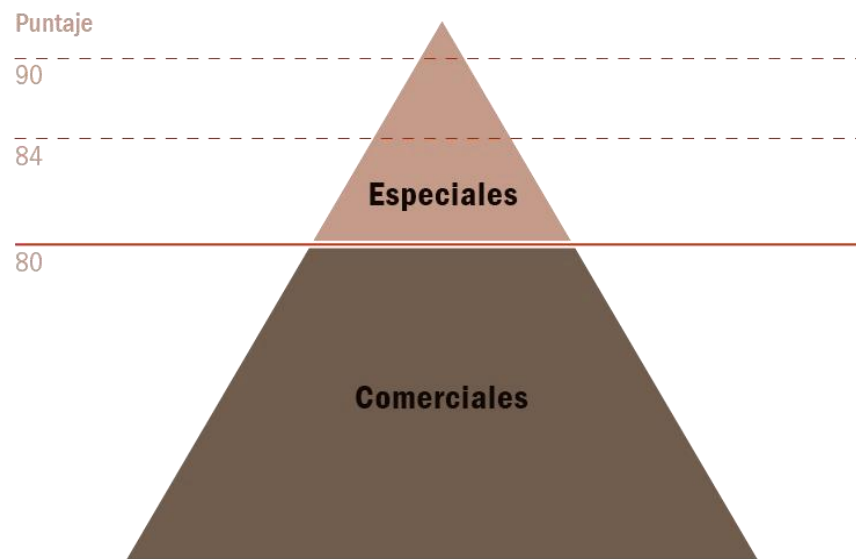
- I. Temperatura del café vs tiempo de fermentación
- II. Temperatura del café vs pH
- III. Temperatura del café vs Calificación en catación
- IV. pH vs Calificación en catación
- V. Tiempo de fermentación vs Calificación en catación

Se realizaron tres (3) corridas para este experimento en tres lugares diferentes: La Mesa de Los Santos (Santander), Cañasgordas (Antioquia), Santuario (Risaralda); esto debido a que, se buscaba probar con diferentes variedades de café de cosecha, para validar si había repetitividad en el proceso. Para cada prueba de fermentación se midieron las variables antes mencionadas en diferentes tiempos: 0, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36; con estas mediciones se llevó la continuidad del proceso y se monitoreó desde el inicio de la fermentación, hasta puntos que resultaran esenciales para la calidad del café.

Dentro de cada uno de los tiempos, previamente establecidos, se extrajeron muestras de café de lugares aleatorios del biorreactor, para la realización de pruebas de análisis físicos y sensoriales del café (catación). Estas muestras fueron marcadas, separadas, llevadas a secado en el sol, después se trillaron y finalmente se tostaron. El café que ya ha pasado por la etapa de tostón se le realizó el análisis sensorial, donde el experto le asigna el puntaje final para determinar la clasificación del café. Este mismo procedimiento se realizó con todos los lotes de café que se fermentaron. Durante la catación se les asignó una calificación dada por un panel de expertos en el tema; donde el puntaje máximo es cien (100) y mínimo es cero

(0). En la figura 16 y en la tabla 8, se muestran la clasificación según la calificación dada por el catador. El tamaño de la muestra tomada en cada hora fijada, es de 2 kilos.

Figura 16. Proporción de puntajes en catación entre cafés comerciales y especiales según SCAA.



Fuente: Segmentación de cafés según SCAA (Specialty Coffee Association of America) [40].

Tabla 8. Clasificación de cafés según puntajes de catación.

<b>Puntaje</b>	<b>Clasificación</b>	
90 – 100	Excepcional	
85 – 89,99	Excelente	Especiales
80 – 84,99	Muy bueno	
<80	Estándar	Por debajo de calidad especial

Fuente: SCAA [40]

## 4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

**4.2.1 Análisis de correlación.** El análisis de correlación se realiza para medir el grado de asociación entre dos variables dependientes una de otra. La correlación es un indicador estadístico definido por el coeficiente de correlación  $-R-$  y es medido en una escala que varía  $-1$  a  $+1$ . De forma tal que, es posible en algunos casos, establecer relación de causa - efecto de un fenómeno. Esencialmente se usa para conocer lo siguiente:

- I. Si la relación es positiva o negativa
- II. La fuerza de la relación

Tabla 9. Indicadores de correlación

<b>Valor de r</b>	<b>Fuerza de relación</b>
<b>-1 a -0.5 o 1 a 0.5</b>	Fuerte
<b>-0.5 a -0.3 o 0.5 a 0.3</b>	Moderada
<b>-0.3 a -0.1 o 0.1 a 0.3</b>	Débil
<b>-0.1 a 0.1</b>	Ninguna o muy débil

A pesar de ser una herramienta muy útil a la hora de obtener inferencias de las variables en objeto, se debe tener precaución, ya que sólo mide la relación lineal entre las variables; en tal caso, un diagrama de dispersión puede indicar aproximadamente si existe relación lineal o no.

**4.2.2 Desviación típica.** La desviación típica indica la dispersión de los datos respecto al valor de la media, de modo que a medida que se incrementa su valor, mayor será la dispersión de los datos. En la mayoría de los casos es representada por la letra S (por la inicial de su nombre en inglés):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

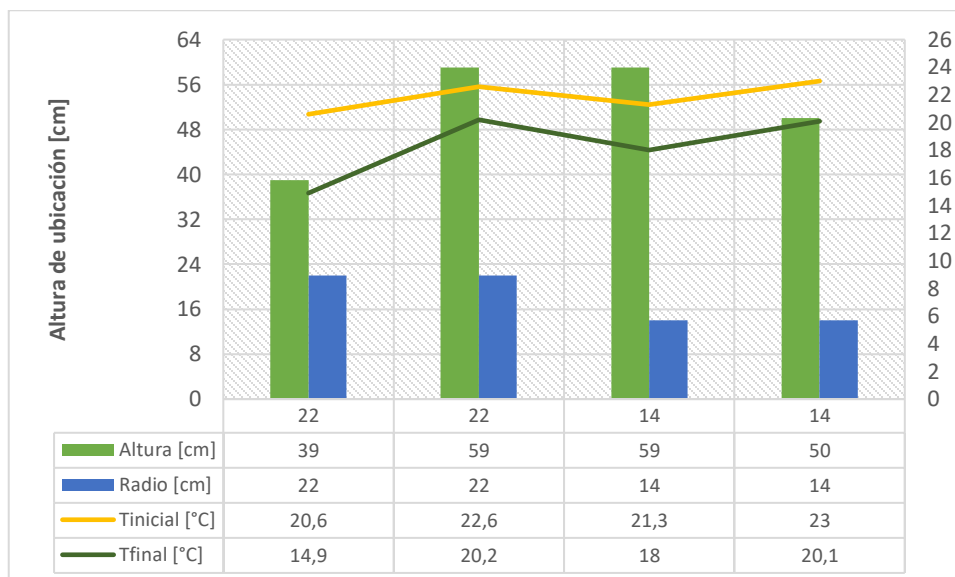
## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS

### 5.1 PRUEBAS DE PERFIL TÉRMICO

A partir de los experimentos para determinar el comportamiento de la temperatura del café durante la fermentación, se permitió reconocer que existen variaciones de temperatura, las cuales fueron registradas por los sensores. Para efectos de determinar las mayores variaciones de temperatura que se tenían en el biorreactor, se tomaron los sensores marcados en la figura 16, como T2, T4, T7, Tcont (sensor del dispositivo controlador de temperatura).

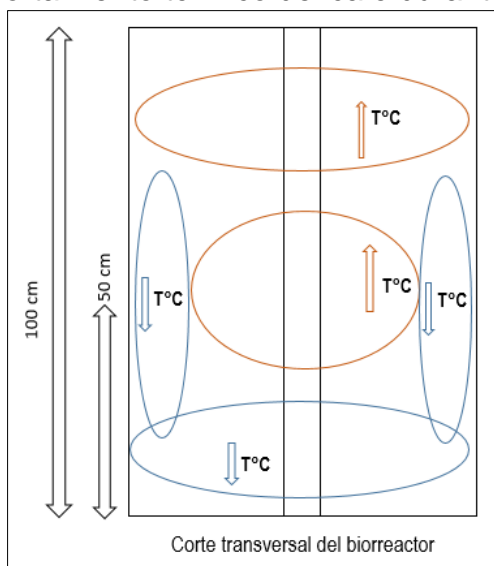
Como resultado, se evidenció que existen variaciones de temperatura verticales decrecientes, desde la parte superior del tanque hacia la base del mismo, los datos obtenidos de esta prueba se encuentran tabulados en el gráfico 1. Allí se observa que hay una disminución de la temperatura, pasado el tiempo de fermentación, que fue de 18 horas. Este experimento arrojó que existen puntos fríos cercanos a la periferia (cercanos a la pared del tanque) y base del fermentador. En contraste, los puntos calientes están hacia el centro y en la parte superior del tanque; como se muestra en la figura 17.

Gráfico 1. Variaciones de temperatura del café durante la fermentación.



Cabe señalar que, a lo largo del experimento, 18 horas, el sistema de enfriamiento permaneció encendido todo el tiempo; lo que indica que, durante el total de horas de fermentación, no se alcanzó la temperatura de referencia fijada en el dispositivo controlador de temperatura (12°C).

Figura 17. Comportamiento térmico del café durante la fermentación.



En cuanto a los sensores de temperatura ubicados a la misma altura, por ejemplo, 59 cm (medidos desde la base hasta la parte superior del tanque) y a diferentes radios (22 cm y 14 cm), la diferencia de temperatura era de aproximadamente 2°C. De forma análoga, los sensores que estaban a la misma distancia de radio, pero, diferentes alturas (59 cm y 39 cm) la diferencia de temperatura registrada fue de cerca de 6°C en 20 cm.

Teniendo en cuenta, que la fermentación es un proceso bioquímico y con presencia de microorganismos, lo ideal es que las variaciones de temperatura presentadas durante la fermentación fueran tendientes a cero. Sin embargo, y como es de notar se presentan variaciones considerables. Por ello, se resalta la importancia de conocer lo siguiente:

- I. Dinámica de crecimiento de los microorganismos
- II. Coeficiente de rendimiento en conversión de biomasa a sustrato
- III. Velocidad de formación de células muertas

En consecuencia, es posible que se pueda hallar el punto donde no haya sobrepoblación de microorganismos, para que las características organolépticas del café no se vean afectadas.

## **5.2 PRUEBAS DE TRAZABILIDAD DE LA FERMENTACIÓN**

Con el objeto de evaluar la trazabilidad del proceso, se les realizó seguimiento a las variables ya nombradas, durante todo el transcurso de la fermentación, que para todas las pruebas fue de 36 horas.

- **Prueba 1**
  - i. Temperatura de fermentación: 15°C
  - ii. Tiempo de fermentación: 36 horas

Tabla 10. Resultados primera prueba de fermentador

<b>Prueba 1 – 15°C – Variedad Castillo</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Horas</b>	<b>Temperatura café [°C]</b>	<b>Temperatura amb<sup>3</sup> [°C].</b>	<b>pH</b>	<b>Puntaje</b>
1	0	24.283104	16.970638	5.325443	80.75
2	12	24.518003	15.102144	4.511629	77.75
3	14	24.428479	16.426295	4.354661	81
4	16	24.335156	15.601241	4.129486	82.25
5	18	24.214219	14.350426	4.031329	81
6	20	24.025028	16.374288	3.952866	84.25
7	22	23.756035	15.404409	3.866097	77.5
8	24	23.585406	12.912589	3.844187	81.75
9	26	23.404082	14.387706	3.844336	79.5
10	28	23.13607	15.606193	3.831456	78
11	30	22.912123	15.814721	3.830372	80
12	32	22.634225	13.378114	3.803606	79.75
13	34	22.434036	14.880355	3.819385	86.5
14	36	22.293476	15.391257	3.805345	86.5

Los resultados mostrados en la tabla 10, hacen parte de los datos medidos en la primera corrida de fermentación. Allí se indica el valor de temperatura de *Set Point* en 15°C (temperatura de fermentación), es relevante aclarar que el sensor del controlador se hallaba mal ubicado, dado que no se encontraba en contacto directo con el café. Sin embargo, se realizó un análisis estadístico, por efectos de estudiar lo que ocurre cuando no se realiza control de temperatura directamente al café.

Se ha realizado un análisis estadístico básico en Excel (Tabla 11), que presenta las desviaciones correspondientes a cada variable, así como los valores máximos y mínimos medidos durante la prueba.

<sup>3</sup> Temperatura amb.: Temperatura ambiente dentro del reactor de fermentación.

Tabla 11. Resumen estadística descriptiva prueba 1

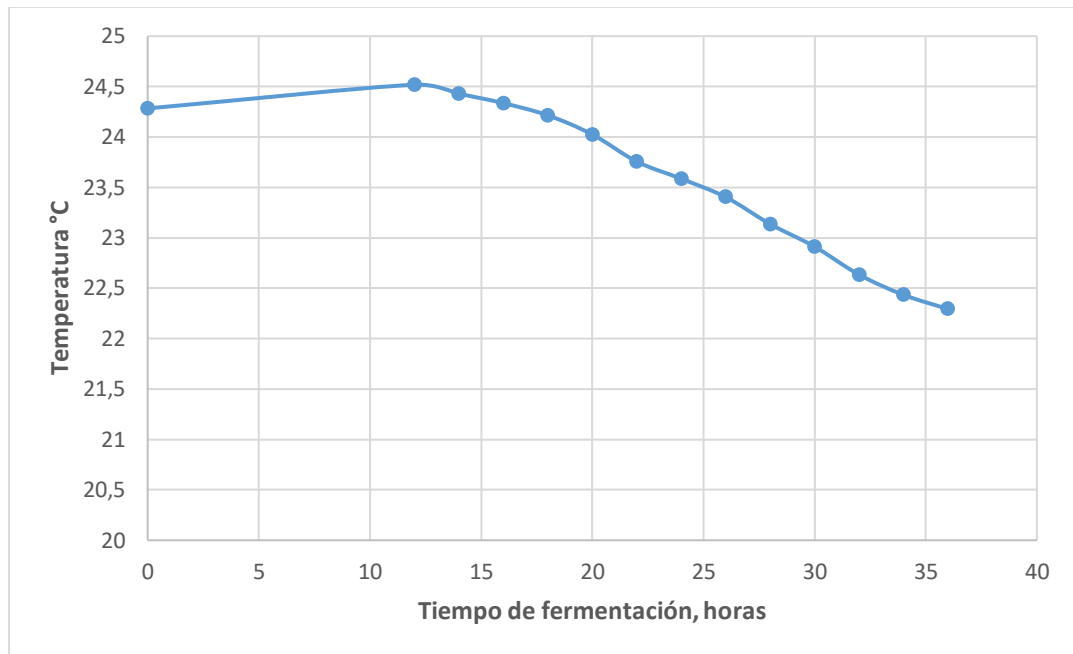
<b>Variable</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Estándar</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
Temp. Ambiente	14	15.18574	1.138223	12.91259	16.97064
pH	14	4.067871	.4235862	3.803606	5.325443
Puntaje	14	81.17857	2.901307	77.5	86.5
Temp. Café	14	23.56853	.7761238	22.29348	24.518
Horas	14	22.28571	9.856108	0	36

Con el propósito de obtener más información a partir de los resultados de las mediciones realizadas, se analizó la correlación de las variables de interés: Temperatura, pH, Puntaje de catación, Tiempo de fermentación y Temperatura del ambiente dentro del tanque. De esta manera, se puede establecer si existe relación entre variables del proceso. El objeto de este análisis es conocer el comportamiento de una variable frente a modificaciones de otras variables, por lo que en algunas ocasiones se busca predecir el comportamiento o inclusive extrapolar una variable objetivo [28]. Los resultados se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Correlaciones entre variables medidas en Prueba 1

	<b>Temperatura Amb.</b>	<b>pH</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Temp. Café</b>	<b>Horas</b>
Temp. Ambiente	1				
pH	0.5387	1			
Puntaje	0.0642	-0.1698	1		
Temp. Café	0.3393	0.6211	-0.3877	1	
Horas	-0.4727	-0.8909	0.3316	-0.8997	1

Gráfico 2. Variación de la temperatura del café, prueba 1.  $T_{fermentación} 15^{\circ}C$



Asimismo, con los datos presentados en la tabla 12 se pudo validar con la literatura [3], que el valor de pH tiene una tendencia marcada a disminuir su valor, a medida que aumentan las horas de fermentación del café. También fue posible establecer que existe una correlación negativa alta entre la temperatura del café y el tiempo de fermentación (-0.8997); lo que indica que, el sistema de refrigeración está surtiendo su efecto, a medida que transcurre el tiempo de fermentación, la temperatura del café disminuye. De este experimento también se destacó que el tiempo que tardó el sistema de refrigeración en lograr una reducción de 2°C en la temperatura del café, es de aproximadamente 36 horas, esto también se vio reflejado en el gráfico 2.

- **Prueba 2**

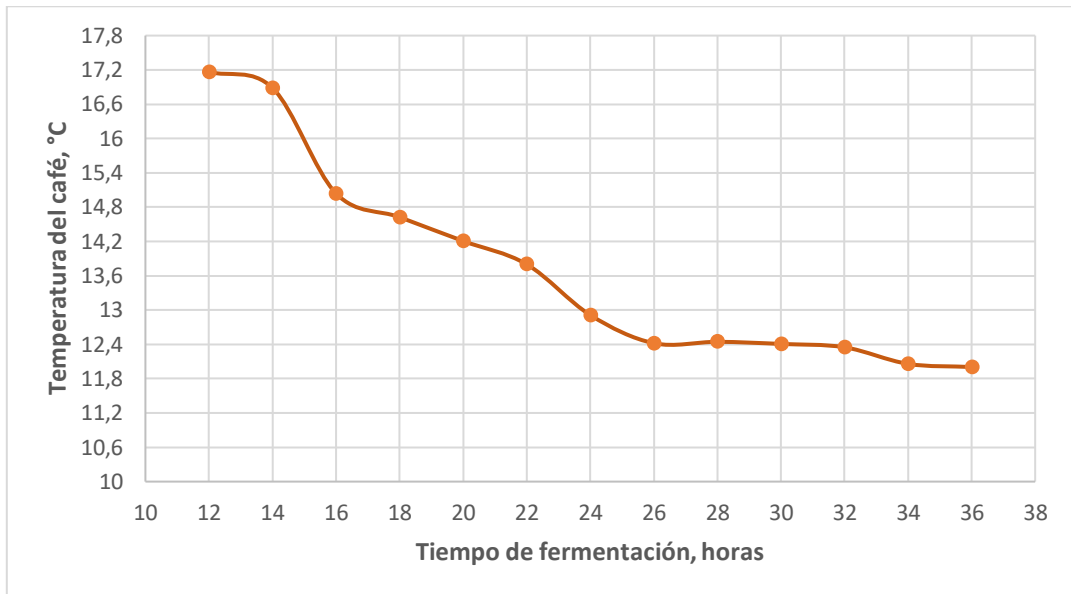
- I. Temperatura de fermentación: 12°C
- II. Tiempo de fermentación: 36 horas

En la tabla 13, se presentan los resultados de la prueba 2, utilizando la misma variedad de café que la prueba anterior; en este experimento la  $T_{fermentación}$  es de 12°C.

Tabla 13. Resultados prueba 2 de fermentación.

<b>Prueba 2 – 12°C – Variedad Colombia F6</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Horas</b>	<b>Temperatura café [°C]</b>	<b>Temperatura amb. [°C]</b>	<b>pH</b>	<b>Puntaje</b>
<b>1</b>	12	17.163691	11.778466	4.977275	81
<b>2</b>	14	16.884024	12.515618	5.036965	83
<b>3</b>	16	15.039094	13.042243	4.907908	82.5
<b>4</b>	18	14.624314	11.664317	4.92008	83
<b>5</b>	20	14.206878	12.368438	4.800862	82
<b>6</b>	22	13.80001	11.604965	4.722727	80
<b>7</b>	24	12.912126	12.493896	4.470156	83
<b>8</b>	26	12.419997	11.702109	4.266166	81
<b>9</b>	28	12.444424	11.652879	4.127523	82.5
<b>10</b>	30	12.40701	12.498457	3.801754	84.75
<b>11</b>	32	12.348881	12.104472	3.706575	80
<b>12</b>	34	12.058715	11.388738	3.734376	83.75
<b>13</b>	36	12.003606	12.187099	3.684699	82.5

Gráfico 3. Evolución de la temperatura durante la fermentación. Prueba 2



En esta segunda prueba es importante señalar que, el sensor del controlador de temperatura se encontraba en contacto con el café. Igualmente se muestra que hubo mayor disminución de temperatura del café con respecto prueba 1. Esto se evidencia en la tabla 14, donde la correlación de la temperatura del café con respecto a las horas de fermentación transcurridas es alta, por tanto, se tiene indicios del efecto que tiene la camisa de enfriamiento del biorreactor.

La evolución de la temperatura (gráfico 3) durante la fermentación en esta prueba muestra que la temperatura de fermentación se alcanzó al cabo de las 25 horas de haberse iniciado el proceso. Es decir, que durante aproximadamente el 64,44% del tiempo total de fermentación del lote, el sistema de enfriamiento permaneció encendido hasta lograr llegar a la temperatura de fermentación establecida; por tanto, el café se fermenta, ciertamente a 12°C, durante sólo el 30.5% del tiempo total de fermentación.

Tabla 14. Correlación de variables, prueba 2

	Temperatura Amb.	pH	Puntaje	Temp. Café	Horas
Temp. Ambiente	1				
pH	0.2082	1			
Puntaje	0.2781	-0.1682	1		
Temp. Café	0.2325	0.8685	-0.1215	1	
Horas	-0.2531	-0.9708	0.1523	-0.9313	1

Según estudios aquí citados, en una fermentación llevada a cabo naturalmente, la temperatura del café aumentaría con el paso de las horas de fermentación; pero en esta prueba mediante el análisis de la correlación (-0.9313) se puede corroborar que el sistema de enfriamiento surte efecto sobre el café, al lograr disminuir su temperatura [3,6, 29, 30]. La correlación entre el pH y la temperatura de café, en la prueba 2, es mayor (0.8685), debido a que en esta prueba el café se fermentó a una temperatura más baja.

- **Prueba 3**

- I. Temperatura de fermentación: 15°C
- II. Tiempo de fermentación: 36 horas

Los resultados que se muestran en la tabla 15 corresponden a la prueba 3 de fermentación. Al igual que en el experimento 2, la variabilidad de los puntajes obtenidos en catación fue menor que en la primera prueba. Es decir, el rango de variación del puntaje es menor; todas las muestras que fueron catadas están por encima de los 80 puntos, pero menor a 85. Adicional, al análisis de la evolución de la temperatura del café, se muestra una comparación, de la prueba 2 y prueba 3 (figura 20), del comportamiento del pH del grano, el cual siempre tiende a disminuir;

es decir, a medida que transcurren horas de fermentación el mucílago, que es el sustrato donde se fermenta el café, se vuelve más ácido [3, 29, 30].

Tabla 15. Resultados prueba 3 de fermentación.

<b>Prueba 3 – 15°C – Variedad Colombia F6</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Horas</b>	<b>Temperatura café [°C]</b>	<b>Temperatura amb. [°C]</b>	<b>pH</b>	<b>Puntaje</b>
<b>1</b>	12	15.287	11.73	5.03	81
<b>2</b>	14	15.564	13.61	4.95	83
<b>3</b>	16	16.125	15.30	4.93	79
<b>4</b>	18	14.887	14.05	5.04	83
<b>5</b>	20	15.129	14.11	4.98	83
<b>6</b>	22	14.833	14.31	5.11	83
<b>7</b>	24	14.367	13.41	4.94	81
<b>8</b>	26	14.541	13.79	4.93	80
<b>9</b>	28	13.504	12.96	4.74	83.75
<b>10</b>	30	13.437	13.31	5.50	82
<b>11</b>	32	13.169	13.02	4.48	82.75
<b>12</b>	34	12.361	11.93	4.44	82.5
<b>13</b>	36	13.563	13.82	4.38	74.5

Tabla 16. Correlación de variables prueba 3.

	Horas	Temp. del café [°C]	Temp. amb. [°C]	pH	Puntaje
Horas	1				
Temp. del café [°C]	-0.90	1			
Temp. amb. [°C]	-0.2241	0.5582	1		
pH	-0.5289	0.4772	0.2477	1	
Puntaje	-0.2656	-0.0300	-0.2312	0.3362	1

Gráfico 4. Evolución de la temperatura durante la fermentación. Prueba 3

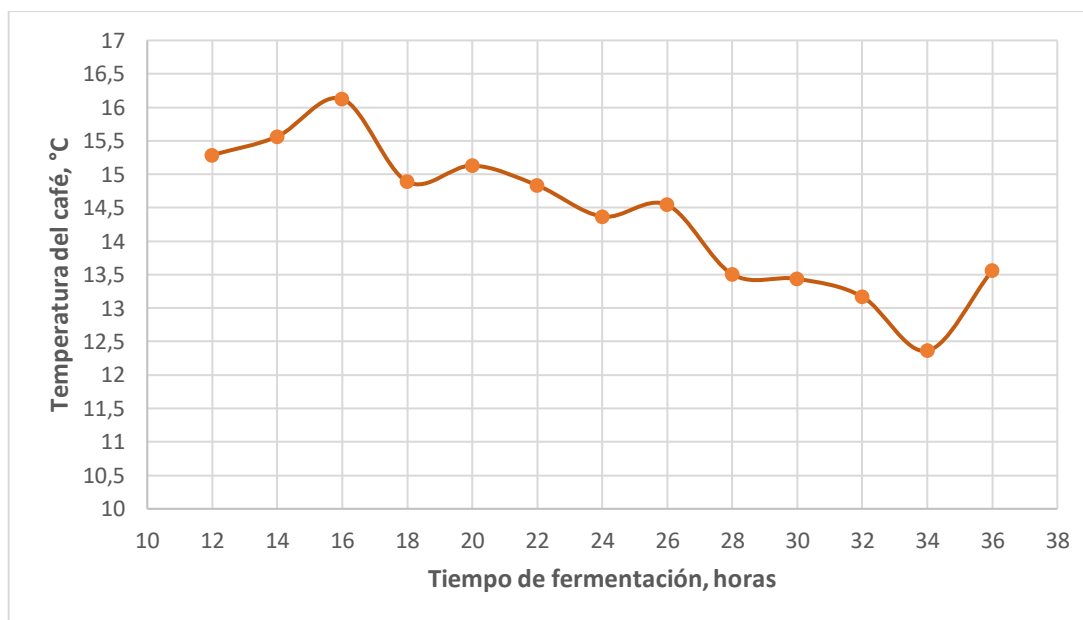
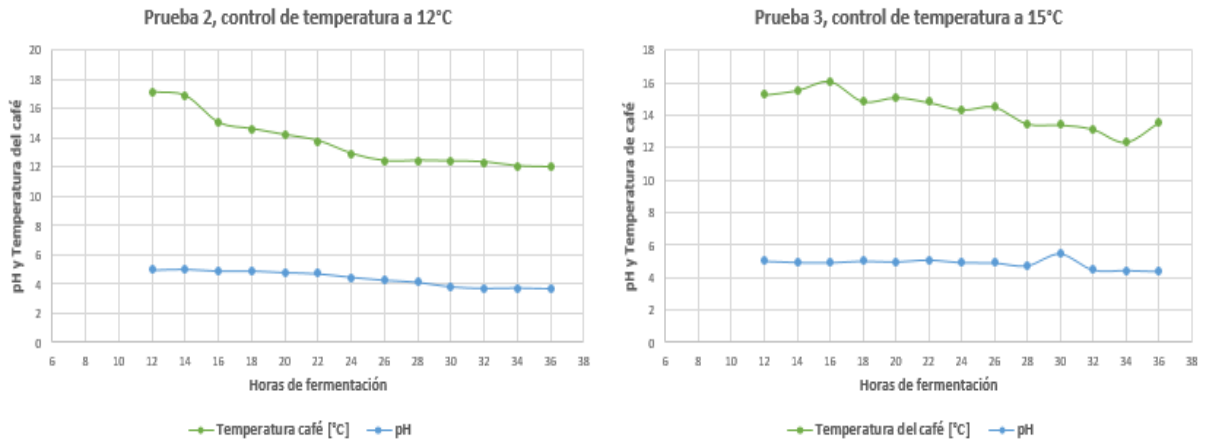


Figura 18. Comparación de variaciones del pH del grano, en prueba 2 y 3



Por otro lado, el comportamiento o evolución de temperatura durante las 36 horas de fermentación, se presenta en el gráfico 4. Allí se observa que, a lo largo del proceso hay oscilaciones alrededor de la temperatura de fermentación que en este caso es 15°C. Esto se reporta probablemente debido al encendido y apagado del sistema de refrigeración o a la cadena de reacciones metabólicas producidas por las enzimas que fermentan el café [3].

- **Prueba 4**
  - I. Temperatura de fermentación: 12°C
  - II. Tiempo de fermentación: 36 horas

Nota: Durante la ejecución de la prueba 4, el sensor de pH presentaba inconvenientes de medición, por consiguiente, en la tabla

Tabla 17. Resultados prueba 4 de fermentación.

<b>Cañas gordas – 12°C – Cañasgordas</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Horas</b>	<b>Temperatur a del café [°C]</b>	<b>Temperatur a ambiente [°C]</b>	<b>pH</b>	<b>Puntaje</b>
1	0	23.913876	15.62306	-	0
2	12	22.975785	8.711781	-	81.5
3	14	22.478383	10.532854	-	84
4	16	21.847414	10.342421	-	76.5
5	18	19.466471	8.696338	-	82.5
6	20	16.981011	10.817326	-	83
7	22	15.589016	8.989073	-	67.25
8	24	14.789307	10.631899	-	55
9	26	14.300384	11.969676	-	81.75
10	28	13.758638	12.453004	-	84
11	30	13.804418	11.227466	-	47.5
12	32	13.652	12.896895	-	62.5
13	34	13.491238	11.123999	-	54
14	36	13.487449	12.584032	-	82.5

Gráfico 5. Evolución de la temperatura, prueba 4.

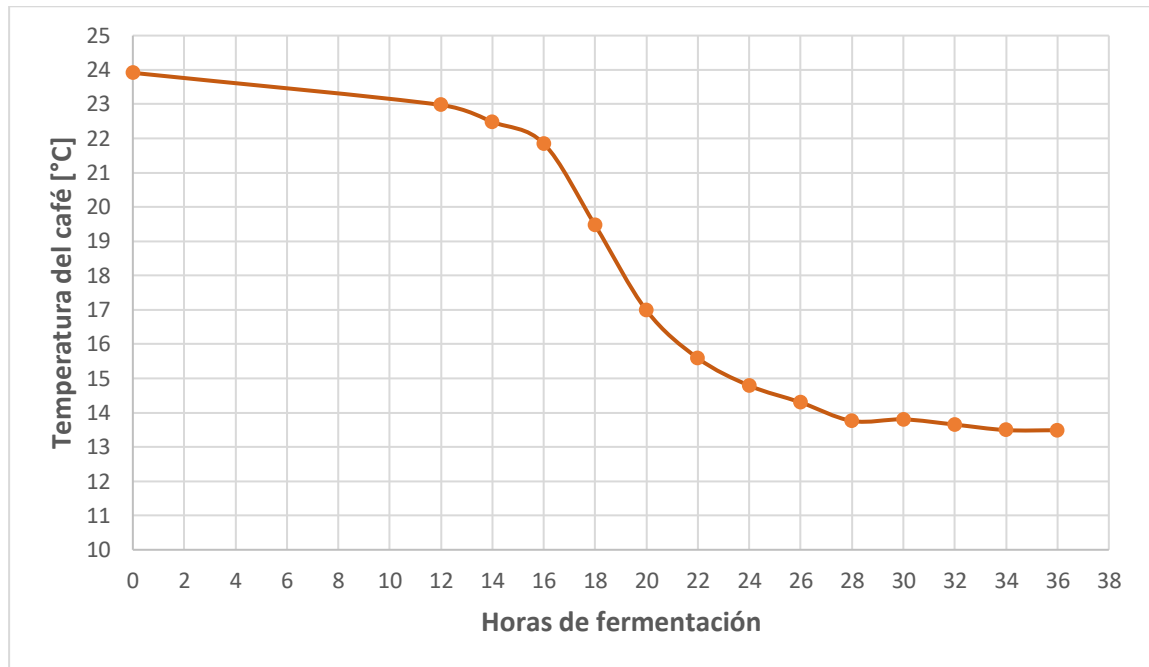
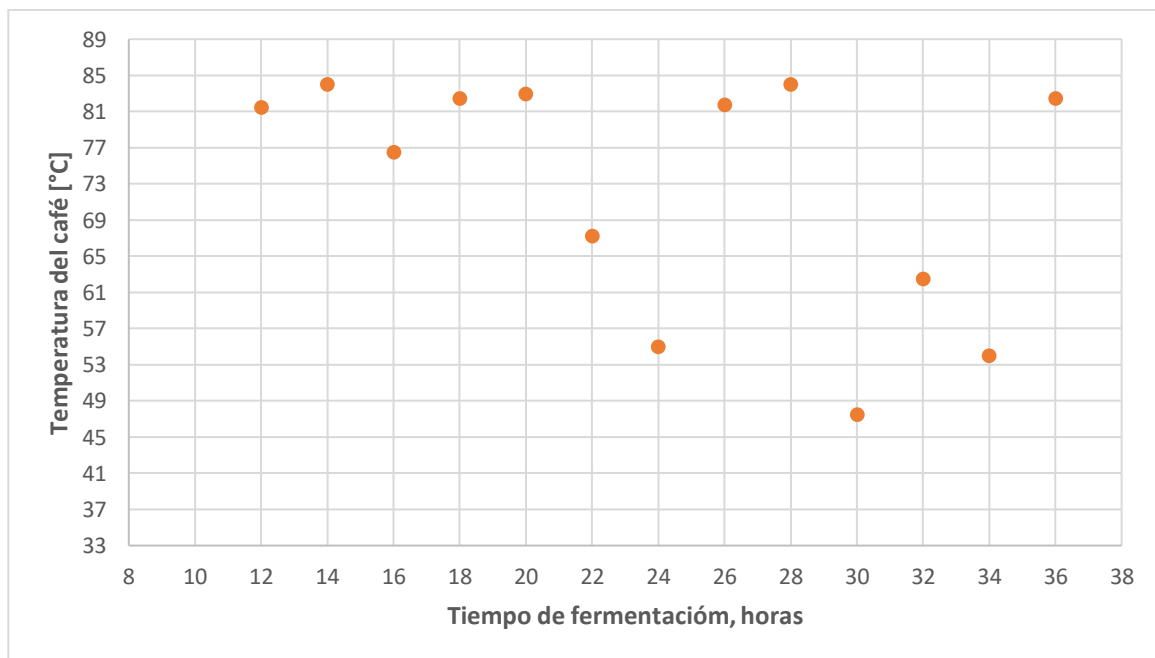


Gráfico 6. Variabilidad de los puntajes obtenidos en catación.



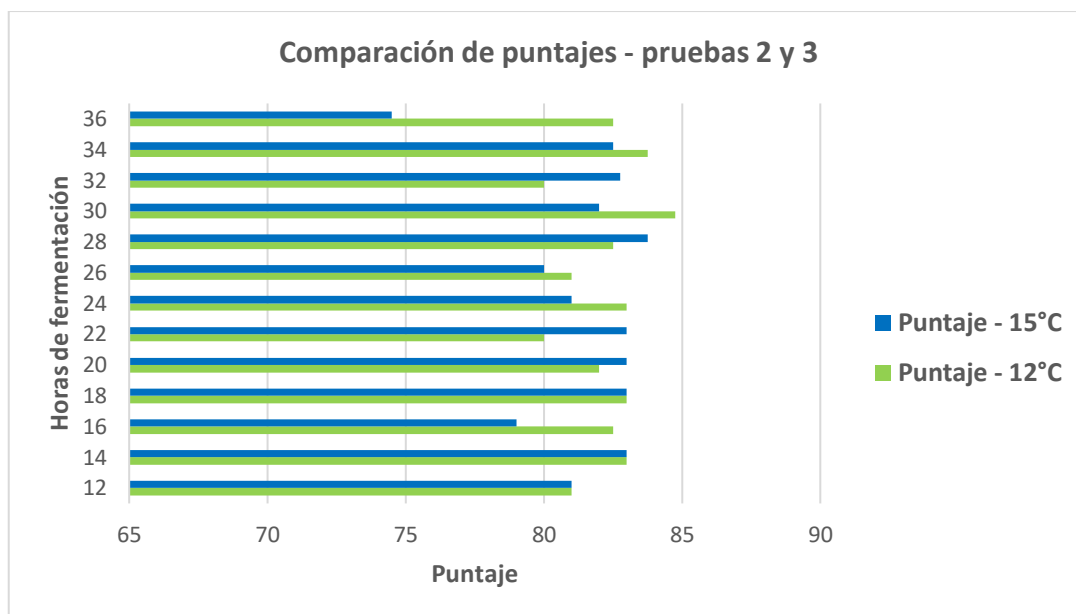
Durante la ejecución de la prueba 4, de nuevo el sistema de enfriamiento se mantuvo en funcionamiento durante todo el desarrollo de la prueba de fermentación (gráfico 5). Si se lograra reducir el tiempo en el que el sistema alcanza la temperatura de fermentación establecida en un 50%, aproximadamente en esa misma proporción se reduciría la potencia que consume sólo el equipo de refrigeración.

**5.2.1 Efectos de la fermentación sobre la calidad sensorial del café.** En el análisis sensorial del café se evalúan la intensidad y calidad de los atributos que conforman la bebida, estos atributos son calificados por un panel de catadores; de los cuales algunos se encuentran en procesos de entrenamiento. Esta manera de medir la calidad del café es muy subjetiva, depende de la habilidad que posea el catador, de la experticia y del entrenamiento que tiene [32].

Por otro lado, no todos los que hacen parte del panel de catación son capaces de encontrar todos los defectos en una taza de café; debido a estos inconvenientes se pueden causar pérdidas de dinero para caficultor y/o productor de café [32]. A pesar de que existe un proceso estandarizado en la forma en cómo se cata una taza de café, el análisis organoléptico del mismo se puede ver afectado por factores externos.

Una de las características principales que hacen parte del análisis sensorial es la Impresión Global, en donde se califica la calidad de la bebida en forma general. En consecuencia, se considera uno de los factores más relevantes para la evaluación de la taza; se califica por medio de una escala numérica de 1 a 9, donde (1) es bajo, y (9) es alto.

Gráfico 7. Comparación entre pruebas 2, control a 12°C y prueba 3, control a 15°C.



Del gráfico 7, se hace una comparación con la misma variedad del café, pero a diferentes temperaturas, de ahí se puede evidenciar lo siguiente:

- En total se analizaron 13 muestras para ambas pruebas.
- En el **46.15%** del total de muestras, la fermentación llevada con control de temperatura a 12°C, obtuvo mayores puntajes.
- El **23%** de las muestras obtuvieron puntajes iguales en ambas pruebas.
- En el **30.76%** de las muestras, la fermentación llevada con control de temperatura a 15°C logró puntajes mayores que la realizada a 12°C.

En la prueba 1, en los puntajes se obtuvo mayor a 85 unidades (café especial), se notaron en común los siguientes sabores:

Tabla 18. Tendencia de sabores en prueba 1. Con mejores puntajes de catación (>85)

<b>Puntaje</b>	<b>Sabores en común</b>	<b>Tiempo de fermentación [horas]</b>
88.25		20
85.75	Arándanos, vainilla,	22
86.5	canela, chocolate blanco,	34
86.5	caramelo, ciruela	36

Como se observa en la tabla 18, las características de los sabores que se analizaron en común, en estas muestras tomadas de la prueba 1 y la prueba 2. Es importante resaltar que, en estas dos pruebas sólo se lograron obtener cuatro (4) puntajes mayores a 85, los cuales entran dentro de la clasificación de cafés especiales y excelentes.

- En total se analizaron 14 muestras para la prueba 1.
- En el **50%** de las cataciones, se obtuvieron puntajes  $\geq 80$  pero  $< 85$ ; lo cual significa que 7 muestras de café estaban dentro de la categoría café especial.
- El **14.28%** de las muestras obtuvieron puntajes  $\geq 85$ ; categoría de cafés Excelentes.
- En el **35.71%** de las cataciones, se obtuvieron puntajes por debajo de 80 puntos, los cuales entran dentro de la categoría de café comercial o estándar.

Si se hiciera el análisis correspondiente al experimento 2, arrojaría que el 100% de las muestras estaban dentro de la categoría de cafés especiales. Es decir, en la prueba 2, todas las muestras que fueron catadas obtuvieron puntaje  $> 80$ , pero no

lograron superar los 85 puntos para clasificarse como cafés excelentes. De igual manera, para la prueba 3, el 86% de las muestras catadas estaban dentro de la categoría especial y sólo el 15% se encuentran dentro de la categoría estándar (ver gráfico 8).

Gráfico 8. Proporción en porcentaje, de calificación de café de la prueba 3

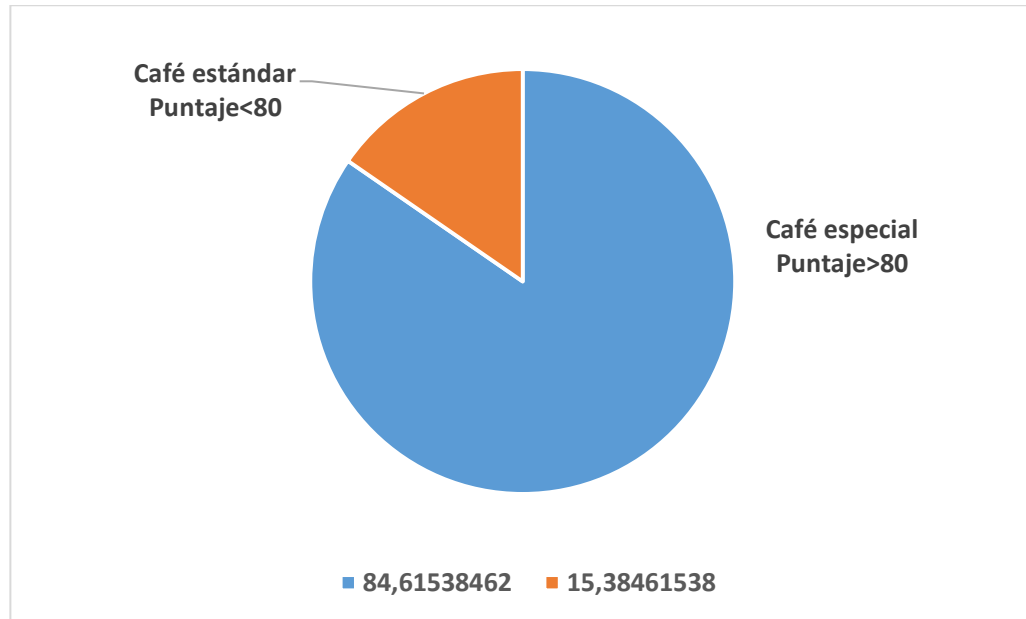


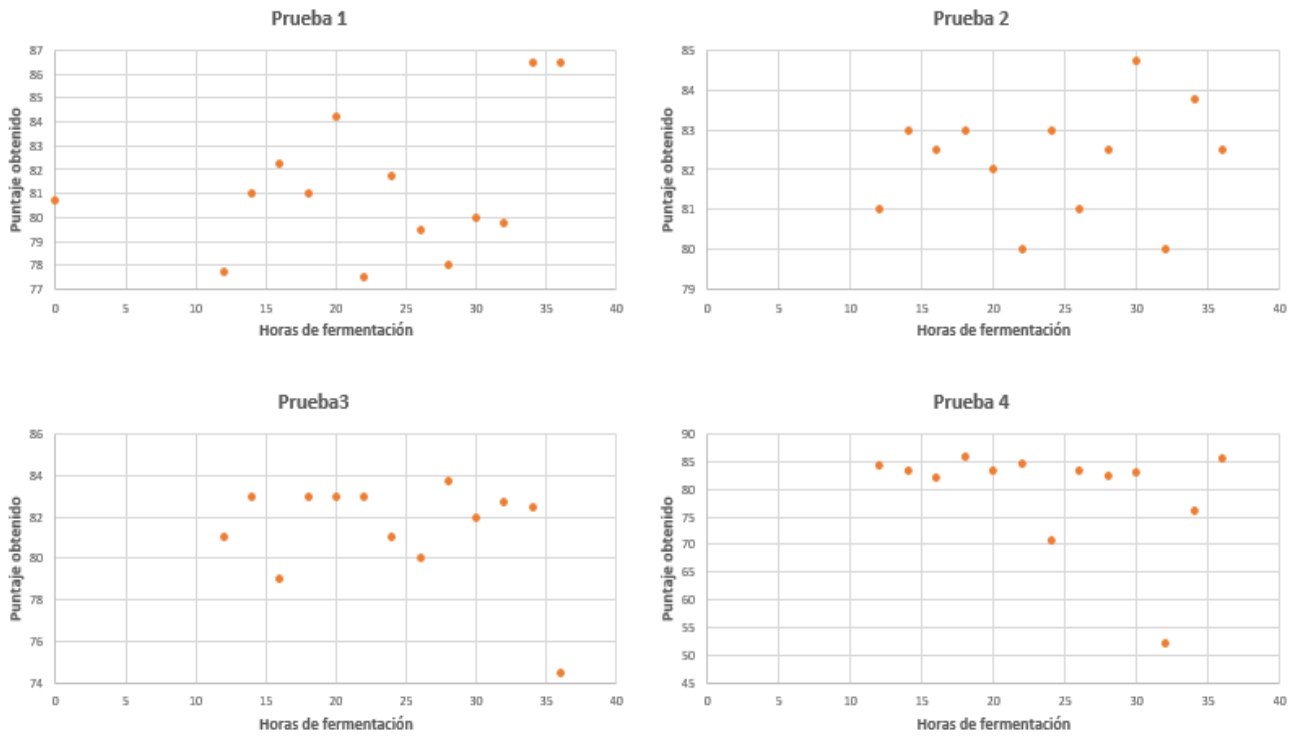
Tabla 19. Tendencia de sabores en prueba 2 y prueba 3. Con mejores puntajes de catación (>80)

Puntaje	Sabores en común	Tiempo de fermentación [horas]
83		24
84.75		30
83.75		34
83		20
83	Uvas, azúcar morena	22
83.75		28

En la tabla 19, se muestran los sabores en común en ambas pruebas (2 y 3), todas las muestras que se encuentran registradas en esta tabla caben dentro de la categoría especiales, pero no Excelentes, ya que para ningún caso superan los 85 puntos. Sin embargo, es importante señalar que el número total de cafés especiales fue mayor que en la prueba 1.

Dentro de los análisis realizados de trazabilidad, también se verificó que en la prueba 1, donde el sensor del controlador no quedó en contacto con el café, se obtuvo mayor variabilidad de puntajes, es decir, puntajes de cafés especiales, estándar y bajos. Pero para las siguientes pruebas (2,3) en las cuales la Termocupla del controlador estaba midiendo directamente la temperatura del café, la variabilidad de puntos fue menor; sin embargo, la cantidad de muestras clasificadas como cafés excelentes fue más baja con respecto a la primera prueba. Este resultado se puede observar en la figura 21, donde se hace una comparación de las 4 pruebas, teniendo en cuenta la calificación obtenida en el análisis sensorial y físico. Allí se puede notar que el rango de calificaciones es mayor en las dos primeras pruebas, en contraposición, en las pruebas 2 y 3, la variabilidad de puntajes fue menor.

Figura 19. Variabilidad de los puntajes obtenidos en cada prueba de fermentación



## 6. CONCLUSIONES

- Se estudiaron las características y especificaciones técnicas de la instrumentación y del sistema actuador. Igualmente, se encontró que la disposición de los sensores de temperatura no es la adecuada, ya que el cableado de conexión y el cabezote quedan en contacto con el café; de manera que algunas ocasiones se tienen lecturas erróneas de temperatura.
- Por otro lado, también se verificó mediante el análisis de trazabilidad que el sistema de refrigeración, tiene un ciclo de enfriamiento con tiempos que se extienden a casi la totalidad del tiempo de fermentación para poder alcanzar la temperatura de fermentación. Esto puede ocurrir por lo siguiente: i) sistema de refrigeración tiene capacidad de enfriamiento por debajo de lo que requiere. ii) La cantidad de café suministrada para fermentar es muy grande iii) Diseño térmico no adecuado para el proceso.
- Con las pruebas de campo también se evidenció que la temperatura del café durante la fermentación no es uniforme en todo el biorreactor. Es decir, existen puntos fríos localizados hacia la parte inferior y hacia la periferia del reactor. Asimismo, se hallaron puntos calientes, que se encontraban hacia la parte superior y centro del tanque (Ver prueba de perfil térmico), estas variaciones son de hasta 6°C en una diferencia de altura de 20 cm y de 2°C en una diferencia de radio de 8 cm.
- Se analizaron los resultados de pruebas de trazabilidad de la fermentación, en estos se evidencia que existe gran variabilidad/dispersión, entre la calificación obtenida de la catación y el tiempo de fermentación. Tampoco se registra una correlación significativa entre el puntaje del café y la temperatura de fermentación, ni entre el puntaje de catación y el valor de pH. Por lo que se

concluye que no es contundente el efecto que tiene la temperatura ni el pH en la calificación obtenida con la catación del café.

## 7. RECOMENDACIONES

- Es recomendable buscar alternativas para la evaluación de la funcionalidad del equipo, que complementen el análisis sensorial del café realizado por el panel de catadores. De modo que, la evaluación de la calidad del café se haga de forma más estandarizada. Esto debido a que actualmente es un proceso que se realiza de manera cualitativa o subjetiva, en el que no siempre se obtienen las mismas calificaciones.
- En las pruebas donde se estudió el comportamiento de la temperatura del café durante la fermentación, se evidenciaron variaciones considerables de temperatura; por lo que se recomienda profundizar en alternativas de formas para extraer el calor de los granos, inclusive contando con un sistema de agitación controlada, de modo que, el café se fermente uniformemente.
- Realizar el diseño conceptual del biorreactor de fermentación, teniendo en cuenta el balance de masa y energía del sustrato. Por otro lado, también se propone determinar y analizar la cinética de las reacciones de los microorganismos para establecer el rango de crecimiento óptimo de estos, sin que se afecte la calidad de la bebida final.
- El modelamiento de sistemas de fermentación en simuladores permite proyectar el comportamiento de bioprocesos a un nivel de planta, de manera que posteriormente se pueda evaluar su desempeño real a escala industrial; por lo que, se hace fundamental la realización de simulaciones tanto del sistema de control seleccionado, como del modelo del biorreactor.

- Empezar investigaciones con el fin de establecer el efecto que tendría en el funcionamiento del equipo de fermentación, si el controlador recibiera señales de entradas de más de un sensor de temperatura.
- Es importante resaltar que, aunque el proceso requiere mejoras para obtener beneficios significativos, su implementación inicial es costosa, factor que se debe tener en cuenta cuando se está realizando la fase de la planeación del proyecto.

## 8. REFERENCIAS

- [1] U. S. Dixit, M. Hazarika, J. P. Davim, "A Brief History of Mechanical Engineering". Springer 2016. ISBN 3319429167
- [2] M. P. García, "Instrumentación electrónica". Ediciones Paraninfo, S.A., 2014. ISBN 8428337020, 9788428337021
- [3] Cenicafé. "Factores, Procesos Y Controles En La Fermentación Del Café". Programa de Investigación Científica Fondo Nacional del Café, Gerencia Técnica. Agosto de 2012.
- [4] International Coffee Organization, "Latest facts and figures about the global coffee trade from the International Coffee Organization". Última revisión febrero 2016. Disponible en: [https://infogr.am/\\_/27Blb6ddDvHnRAVT1AKy](https://infogr.am/_/27Blb6ddDvHnRAVT1AKy)
- [5] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, "Fermentación controlada abre amplio abanico de matices de taza". Editorial Innovación y Mercado. No 37. octubre 2014
- [6] R. F. Schwan, G. H. Fleet. "Cocoa and Coffe Fermentations – Fermented Foods and Beverages Series". CRC Press, 2014. ISBN 1439847916, 9781439847916
- [7] D. Montet, R. C Ray. "Fermented Foods, Part I: Biochemistry and Biotechnology – Food Biology Series". CRC Press, 2016. ISBN 1498740812, 9781498740814
- [8] A. Abramovici, J. Chapsky, "Feedback Control System: A Fast Track Guide for Scientists and Engineers". Editorial Springer Science& Business Media 2012. ISBN 1461543452, 9781461543459.
- [9] H. B. Verbruggen, Robert Babuška, "Fuzzy Logic Control: Advances in Applications". Volumen 23, World Scientific, 1999.
- [10] G. Chen, T. T. Pham, "Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems".CRC Press, 2000.
- [11] UNAD, "Programación de PLC". Disponible en: <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/2150512/ContenidoLinea/index.html>
- [12] C. T. Jones, "Programmable Logic Controllers: The Complete Guide to the Technology". Brilliant-Training, 1998. ISBN 1889101001, 9781889101002.

- [13] S. R. Schmid, "Manufactura, ingeniería y tecnología". Pearson Educación, 2002. ISBN: 9702601371, 9789702601371.
- [14] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, "Ensayos sobre economía cafetera". Editorial Caficultura sostenible, Moderna y Competitiva. No 30, Enero – diciembre 2014.
- [15] P. F. Stanbury, A. Whitaker, S. J. Hall, "Principles of Fermentation Technology". Third Edition, Butterworth-Heinemann, 2016. ISBN 0444634088, 9780444634085.
- [16] Café de Colombia, "Clasificaciones de calidad". Disponible en: [http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre\\_el\\_cafe/el\\_cafe/clasificaciones\\_de\\_calidad/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/clasificaciones_de_calidad/)
- [17] Café de Colombia, "Post-cosecha". Disponible en: [www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre\\_el\\_cafe/el\\_cafe/post-cosecha/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/post-cosecha/)
- [18] E. Mandado Pérez, P Mariño, A. Lago. "Instrumentación electrónica". Marcombo, 1995. ISBN 8426710115, 9788426710116.
- [19] C. Pérez Conde, "Sensores ópticos". Universitat de València, 1996. Vol. 30. ISBN 8437023262, 9788437023267
- [20] Serie Amarilla, "Los sensores en el automóvil". Reverte, 2002. ISBN 3934584578, 9783934584570.
- [21] Electronics Tutorials. "Temperature sensors". Disponible en: [http://www.electronics-tutorials.ws/io/io\\_3.html](http://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html)
- [22] B. Liptak, "Temperature Measurement". CRC Press, 1993. ISBN 0801983851, 9780801983856
- [23] Sabri Centinkunt. "Mechatronics with Experiments". Illustrated, reimpresso. Publicado por John Wiley & Sons, 2015.
- [24] C. Rojas, N. González. "Diseño conceptual de un fermentador para la producción de n-Butanol a partir de glucose empleando Clostridium acetobutylicum ATCC 824". Universidad Industrial de Santander, 2011
- [25] Elizcom S.A.S, "Experimentos de Química Orgánica". ISBN 9589774466, 9789589774465. Capítulo 3, p23.

- [26] A. Burrows, J. Holman, A. Parsons, G. Pilling, G. Price, "Chemistry. Introducing Organic, Organic and Physical Chemistry". OUP Oxford, 2013. Capítulo 11, p520.
- [27] Quora. "How do pH probes work?". Disponible en: <https://www.quora.com/How-do-pH-probes-work>
- [28] A. Ramírez, "Metodología de la Investigación Científica: Enfoque teórico epistemológico, Enfoque práctico, Estadísticas de análisis". Universidad Pontificia Javeriana, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Pág. 42-44
- [29] Cenicafé. "Fundamentos del proceso de fermentación del café". Programa de Investigación Científica, Fondo Nacional del Café. Diciembre de 2010.
- [30] G. Puerta, Cenicafé. "Fermentaciones Controladas del Café: proceso para agregar valor a la calidad del café". Fondo Nacional del Café. 2014
- [31] Café de Colombia, "Cinética Química de la Fermentación del Mucílago de Café a Temperatura Ambiente". 2013
- [32] J. Rodríguez, C. Durán, A. Reyes. "Electronic Nose for Quality Control of Colombian Coffee Through the Detection of Defects in "Cup Tests"". Universidad de Pamplona. Diciembre 2009
- [33] S. Jackels, C. Jackels, "Characterization of the Coffee Mucilage Fermentation Process Using Chemical Indicators: A Field Study in Nicaragua". Journal of Food Science. Vol. 70, No 5. 2005.
- [34] Cenicafé. "MÉTODO FERMAESTRO: para determinar la finalización de la Fermentación del mucílago de café". Programa de Investigación Científica, Fondo Nacional del café. Mayo 2013.
- [35] YSI. "Anatomy of a pH electrode | Glass Probes". Disponible en: <https://www.ysi.com/ysi-blog/water-blogged-blog/2015/03/anatomy-of-a-ph-electrode-glass-ph-probes-part-1-of-4>
- [36] Cenicafé, "Cultivemos café/Beneficio". Programa de Investigación Científica, Fondo Nacional del café. Disponible en: [http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/beneficio](http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/beneficio).
- [37] "Coffee Bean Structure". Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Coffee\\_Bean\\_Structure.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Coffee_Bean_Structure.png).

- [38] Café de Colombia. “Del árbol a la taza”. Disponible en: [http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el\\_cafe\\_de\\_colombia/del\\_arbol\\_a\\_la\\_taza/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el_cafe_de_colombia/del_arbol_a_la_taza/).
- [39] PEER, “Manual Técnico: Refrigeración Comercial”. Programa de Eficiencia Energética Regional en los Sectores Industrial y Comercial en Centroamérica. Disponible en: <http://bunca.org/publicaciones/manuales/ManualesTecnicos03Agosto2011/Refrigeracion.pdf>
- [40] Franco, J. “Manual de refrigeración”. Reverte, 2006. ISBN8429180117, 9788429180114. Cap. 1. Pág. 1-6.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Abramovici, J. Chapsky, "Feedback Control System: A Fast Track Guide for Scientists and Engineers". Editorial Springer Science& Business Media 2012. ISBN 1461543452, 9781461543459.

A. Ramírez, "Metodología de la Investigación Científica: Enfoque teórico epistemológico, Enfoque práctico, Estadísticas de análisis". Universidad Pontificia Javeriana, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Pág. 42-44.