



Sistema de monitoreo de temperatura y tiempo de congelación para la estación *IQF* de *Lecho Fluidizado DIOFLUI-361* del Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Espinoza Sánchez, Christian Fabián

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica e Instrumentación.

Ing. Rivas Lalaleo, David Raimundo, PhD

01 de Septiembre de 2021



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Sistema de monitoreo de temperatura y tiempo de congelación para la estación IQF de Lecho Fluidizado DIOFLUI-361 del Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.**” fue realizado por el señor **Espinoza Sánchez, Christian Fabián**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 01 de Septiembre de 2021



Ing. Rivas Lalaleo, David Raimundo, PhD

C.C.: 1802445302



REPORTE URKUND

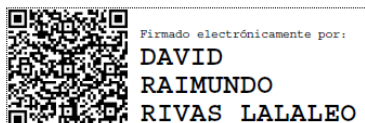


Document Information

Analyzed document	Christian Espinoza Tesis.pdf (D111892860)
Submitted	8/31/2021 11:21:00 PM
Submitted by	Lorena Ibarra
Submitter email	loretaibarra@yahoo.es
Similarity	5%
Analysis address	lorenadibarra.uta@analysis.orkund.com

Sources included in the report

SA	TESIS liofilizador.pdf Document TESIS liofilizador.pdf (D21077792)		1
W	URL: https://docplayer.es/78650591-Escuela-superior-politecnica-del-litoral-facultad-de-ingenieria-en-mecanica-y-ciencias-de-la-produccion-tesis-de-grado.html Fetched: 2/24/2020 10:15:30 PM		12
W	URL: https://redi.uta.edu.ec/handle/123456789/73832 Fetched: 9/1/2021 10:59:00 AM		1
W	URL: https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/32123 Fetched: 9/1/2021 10:59:00 AM		2
W	URL: https://r9.cl/hcnm1 Fetched: 9/1/2021 10:59:00 AM		2
W	URL: https://cLomega.com/prodinfo/instrumentacion.html Fetched: 9/1/2021 10:59:00 AM		1



Ing. Rivas Lalaleo, David Raimundo, PhD

C.C.: 1802445302



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Espinoza Sánchez, Christian Fabián**, con cédula de ciudadanía n° 1803994159, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Sistema de monitoreo de temperatura y tiempo de congelación para la estación IQF de Lecho Fluidizado DIOFLUI-361 del Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 01 de Septiembre de 2021



Espinoza Sánchez, Christian Fabián

C.C.: 1803994159



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Espinoza Sánchez, Christian Fabián**, con cédula ciudadanía n°1803994159, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Sistema de monitoreo de temperatura y tiempo de congelación para la estación IQF de Lecho Fluidizado DIOFLUI-361 del Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 01 de Septiembre de 2021



Espinoza Sánchez, Christian Fabián

C.C.: 1803994159

Dedicatoria

“Encomienda tus obras al Señor, y tus propósitos se afianzarán”.

Proverbios 16:3

Este trabajo es dedicado a Dios por su infinita misericordia, por siempre sostenerme, levantarme y bendecir mi vida todos los días. A mi familia por ser mi luz y fortaleza, por ser mi cable a tierra en los momentos difíciles. A mis padres Gina y Fabián por tanta paciencia, por haber sido mi apoyo incondicional en esta etapa y ser mi motivación e inspiración para culminar esta carrera y sé que con su bendición llegaré lejos, a mi hermana Stephanie con quien he compartido toda mi vida, pido a Dios nos permita permanecer mucho tiempo más juntos.

Christian Fabián Espinoza Sánchez.

Agradecimiento

Quiero agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a mis maestros del Departamento de Eléctrica y Electrónica y de manera especial al Ingeniero David Rivas por haber sido el conductor de este proyecto y hacer posible la culminación del mismo.

A la facultad de Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato, al proyecto de Canje de Deuda Ecuador-España ejecutado por la Unidad Operativa de Investigación en Tecnología de Alimentos y de manera particular a la Ingeniera Mónica Silva , Directora del Proyecto, por brindar las facilidades para la satisfactoria ejecución de este proyecto de investigación.

Christian Fabián Espinoza Sánchez.

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación	2
Reporte Urkund	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos.....	8
Índice de figuras.....	11
Índice de Tablas	14
Índice de Ecuaciones.....	16
Resumen... ..	18
Abstract.....	19
Introducción	20
Planteamiento del Problema	20
Antecedentes	21
Justificación e importancia	21
Objetivos	22
<i>Objetivo general</i>	<i>22</i>
<i>Objetivos específicos</i>	<i>22</i>
Variables de la investigación.....	23
<i>Variable independiente.....</i>	<i>23</i>
<i>Variable dependiente</i>	<i>23</i>
Hipótesis	23

Marco Teórico	24
Antecedentes Investigativos.....	24
Cultivo de Fragaria	24
Congelamiento rápido individual.....	27
Túnel de congelación rápida.....	29
<i>Tipos de túneles IQF</i>	<i>32</i>
Medición de temperatura	36
Instrumentación en la medición de temperatura.....	37
<i>Características de los instrumentos.....</i>	<i>40</i>
<i>Sensores de temperatura.....</i>	<i>42</i>
<i>Instrumentación Virtual.....</i>	<i>45</i>
Adquisición de datos	46
Interfaz Humano Máquina.....	47
Desarrollo e implementación	49
Túnel DIOFLUI-361	49
<i>Características técnicas y operativas</i>	<i>49</i>
<i>Características físicas del DIOFLUI-361</i>	<i>51</i>
<i>Procedimiento de puesta en marcha del DIOFLUI-361</i>	<i>52</i>
Procedimiento para congelar fragarias en el túnel DIOFLUI-361	53
Análisis y predicción del tiempo de congelación de la fragaria en el túnel DIOFLUI-361.....	56
Implementación del registrador de temperatura	69
<i>Selección de la instrumentación para el monitoreo de temperatura en alimentos.....</i>	<i>69</i>
<i>Selección de hardware y software para la adquisición de datos de temperatura.</i>	<i>73</i>

<i>Implementación del circuito electrónico para la medición de temperatura.</i>	79
<i>Lectura de datos de temperatura y diseño del HMI en Python</i>	83
<i>Diagrama P&ID de la estación DIOFLUI-361 con el sistema de monitoreo de temperatura implementado.</i>	99
Pruebas y análisis de resultados	102
Calibración del sistema de monitoreo y registro de temperatura	102
Obtención de datos de tiempo y temperatura	104
Validación del sistema de monitoreo y registro de temperatura	106
Validación de la hipótesis	113
Limitaciones	115
Conclusiones y recomendaciones	117
Conclusiones	117
Recomendaciones	119
Bibliografía	120
Anexos	127

Índice de figuras

Figura 1 <i>Formación de cristales en las paredes celulares durante la congelación</i>	28
Figura 2 <i>Partes Principales de un Túnel IQF</i>	32
Figura 3 <i>IQF de Lecho Fluidizado</i>	33
Figura 4 <i>IQF de Banda Transportadora</i>	34
Figura 5 <i>IQF de Superficie Fría</i>	35
Figura 6 <i>Equipo de Congelación por Fluido Criogénico</i>	36
Figura 7 <i>Sensores y Elementos Primarios</i>	37
Figura 8 <i>Transductor</i>	38
Figura 9 <i>Transmisores</i>	38
Figura 10 <i>Instrumentos Indicadores</i>	39
Figura 11 <i>Instrumentos Registradores</i>	40
Figura 12 <i>Arquitectura de un sistema de instrumentación virtual</i>	46
Figura 13 <i>Ubicación del equipo DIOFLUI-361 en el Laboratorio de Canje de Deuda de la FCIAB</i>	50
Figura 14 <i>Diagrama de flujo para congelamiento IQF de fragaria en la estación DIOFLUI-361</i>	55
Figura 15 <i>Modelamiento de la fragaria como un cilindro corto con conducción transitoria bidimensional</i>	60
Figura 16 <i>Conducción transitoria bidimensional para un cilindro corto</i>	61
Figura 17 <i>Sensor FTARP08-PT100-BD3L100M1</i>	71
Figura 18 <i>Transmisor de temperatura RTD PT100 SBW</i>	73
Figura 19 <i>Distribución de pines de un Arduino Nano</i>	75
Figura 20 <i>Características de la Raspberry Pi 3 B+</i>	77
Figura 21 <i>Esquema de implementación del sistema de temperatura</i>	78
Figura 22 <i>Lazo de corriente de 4 a 20mA</i>	79
Figura 23 <i>CHecktemp HI98501</i>	82

Figura 24 <i>Descarga del sistema operativo Raspbian</i>	84
Figura 25 <i>Imagen recomendada para arrancar la Raspberry Pi</i>	84
Figura 26 <i>Escritura de la imagen de Raspbian a través de balenaEtcher</i>	85
Figura 27 <i>Activación del protocolo SSH y del VNC</i>	86
Figura 28 <i>Escritorio Raspberry Pi con sistema operativo Raspbian instalado y configurado</i>	86
Figura 29 <i>Comprobación de la instalación del IDE de Arduino en Raspbian</i>	87
Figura 30 <i>Curva de la temperatura en función de la corriente</i>	88
Figura 31 <i>Diagrama de flujo del programa de Arduino</i>	90
Figura 32 <i>Conexión entre una Raspberry Pi y un Arduino Vía USB</i>	91
Figura 33 <i>Diagrama de flujo del tratamiento de datos en la Raspberry Pi</i>	92
Figura 34 <i>Pantalla HDMI 5 pulgadas 800x480</i>	93
Figura 35 <i>Diagrama funcional del HMI</i>	95
Figura 36 <i>Pantalla de bienvenida al programa</i>	96
Figura 37 <i>Pantalla de monitoreo de temperatura</i>	96
Figura 38 <i>Funcionamiento del sistema</i>	97
Figura 39 <i>Conexión remota por medio de VNC Viewer en sistema operativo Windows98</i>	
Figura 40 <i>Escritorio de la Raspberry Pi visto remotamente</i>	98
Figura 41 <i>Lote de fragaria x anannasa</i>	105
Figura 42 <i>Resultado de la medición del tiempo de congelación a -18°C durante el primer experimento.</i>	105
Figura 43 <i>Gráfico de dispersión de la evolución de temperatura entre el modelo matemático vs la temperatura del experimento con tiempo 12 minutos, 50 segundos.</i>	107
Figura 44 <i>Diagrama de Bland-Altman para el experimento de 12 minutos con 50 segundos comparado con el modelo de predicción</i>	109
Figura 45 <i>Gráfico de dispersión de la evolución de temperatura entre el modelo matemático vs la temperatura del experimento con tiempo 12 minutos, 02</i>	

segundos.	110
Figura 46 <i>Diagrama de Bland-Altman para el experimento de 12 minutos con 02 segundos comparado con el modelo de predicción.....</i>	111
Figura 47 <i>Comparación gráfica del modelo experimental con el modelo matemático.</i>	113
Figura 48 <i>Consumo de energía eléctrica de la estación DIOFLUI-361 antes y después de haber implementado el sistema de monitoreo y registro de temperatura.</i>	115

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Taxonomía de la fragaria</i>	25
Tabla 2 <i>Composición Nutricional de la fragaria</i>	26
Tabla 3 <i>Tipos de termopares según su material</i>	43
Tabla 4 <i>Características principales del DIOFLUI-361</i>	51
Tabla 5 <i>Características de los elementos que componen el DIOFLUI-361</i>	51
Tabla 6 <i>Propiedades termo físicas del aire</i>	58
Tabla 7 <i>Propiedades de la fragaria</i>	61
Tabla 8 <i>Valores de $F_0(t)$ para la pared plana</i>	63
Tabla 9 <i>Coeficientes para la solución de conducción transitoria unidimensional para la pared plana</i>	64
Tabla 10 <i>Temperatura en el centro de la pared plana</i>	64
Tabla 11 <i>Valores de $F_0(t)$ para el cilindro infinito</i>	65
Tabla 12 <i>Coeficientes para la solución de conducción transitoria unidimensional para el cilindro infinito</i>	66
Tabla 13 <i>Temperatura adimensional en el centro del cilindro infinito</i>	67
Tabla 14 <i>Producto de las temperaturas de la pared plana y el sólido infinito</i>	67
Tabla 15 <i>Temperatura en el centro de la fragaria evaluada en cada tiempo</i>	68
Tabla 16 <i>Tabla comparativa de sensores de temperatura disponibles en el mercado</i> ...69	
Tabla 17 <i>Características del sensor FTARP08-PT100-BD3L100M1</i>	70
Tabla 18 <i>Características del transmisor de temperatura RTD PT100 SBW</i>	72
Tabla 19 <i>Características principales de un Arduino Nano</i>	74
Tabla 20 <i>Especificaciones Técnicas de la Raspberry Pi 3 B+</i>	76
Tabla 21 <i>Especificaciones del medidor de temperatura HI98501</i>	81
Tabla 22 <i>Resultados de la calibración del sensor FTARP08-PT100-BD3L100M1</i>	82
Tabla 23 <i>Descripción diagrama P&ID de la estación DIOFLUI-361</i>	100
Tabla 24 <i>Valores de calibración antes del ajuste del transmisor</i>	103

Tabla 25 <i>Valores de calibración después del ajuste del transmisor.....</i>	103
Tabla 26 <i>Parámetros obtenidos después de 5 experimentos.....</i>	112
Tabla 27 <i>Cálculo del consumo eléctrico de la estación DIOFLUI-361</i>	114

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 <i>Coeficiente de transferencia de calor por convección</i>	56
Ecuación 2 <i>Temperatura de película</i>	57
Ecuación 3 <i>Número de Reynolds</i>	58
Ecuación 4 <i>Condición para aplicar correlaciones de transferencia térmica por convección externa</i>	59
Ecuación 5 <i>Correlación de Churchill y Bernstein</i>	59
Ecuación 6 <i>Coeficiente de transferencia de calor por convección calculado</i>	59
Ecuación 7 <i>Solución para sistemas bidimensionales expresado como producto de resultados unidimensionales</i>	62
Ecuación 8 <i>Número de Biot para la pared plana</i>	62
Ecuación 9 <i>Número de Fourier para la pared plana</i>	62
Ecuación 10 <i>Temperatura en el plano medio</i>	63
Ecuación 11 <i>Obtención de temperatura en pared plana con distintos $Fo(t)$</i>	64
Ecuación 12 <i>Número de Biot para el cilindro infinito</i>	65
Ecuación 13 <i>Número de Fourier para el cilindro infinito</i>	65
Ecuación 14 <i>Temperatura en el cilindro infinito</i>	65
Ecuación 15 <i>Ecuación para determinar la temperatura en cualquier punto</i>	68
Ecuación 16 <i>Ecuación de la temperatura en función de la corriente</i>	88
Ecuación 17 <i>Ecuación de Ley de Ohm</i>	89
Ecuación 18 <i>Ecuación de Ley de Ohm para 4mA</i>	89
Ecuación 19 <i>Ecuación de Ley de Ohm para 20mA</i>	89
Ecuación 20 <i>Ecuación del voltaje en función de la lectura de bits</i>	89
Ecuación 21 <i>Ecuación para encontrar el error total en la medida de temperatura</i>	104
Ecuación 22 <i>Ecuación de la media aritmética de las diferencias</i>	107
Ecuación 23 <i>Ecuación de la desviación estándar</i>	108

Ecuación 24 <i>Ecuación del límite superior de la gráfica de Bland-Altman</i>	108
Ecuación 25 <i>Ecuación del límite inferior de la gráfica de Bland-AltmanE</i>	108
Ecuación 26 <i>Distribución T de Student</i>	112

Resumen

Este proyecto de investigación propone el diseño de un sistema de monitoreo de la temperatura y del tiempo de congelación de alimentos en donde se utilizará la fragaria de variedades cultivadas en la sierra centro del país, esto por ser una variedad de fruta comúnmente sujeta a experimentación y estudios dentro del proyecto de la Unidad Operativa de Investigación en Tecnología de Alimentos. Para desarrollar este sistema lo primero será recopilar información de la estación IQF DIOFLUI-361; luego se describirá el proceso de congelación rápida y sus ventajas, se desarrollará una estimación matemática y para esto se hará uso de principios físicos, ecuaciones y leyes las cuales serán utilizadas tomando en cuenta las propiedades físicas y químicas de la fruta. Posteriormente se hará uso de la instrumentación adecuada tomando en cuenta diversos criterios de selección y una vez seleccionados los elementos adecuados para medir las temperaturas delimitadas en el proceso, las señales serán acondicionadas para que puedan ser leídas por una tarjeta de adquisición de datos y la misma se comunique con otra tarjeta para el procesamiento de los mismos, posteriormente se diseñará una Interfaz Humano Máquina con sus correspondientes controles como variable de proceso e históricos y la misma estará disponible de manera local y remota. Este sistema se encontrará adjunto a la estación IQF. Finalmente, para validar el sistema se comprobará el ahorro de energía eléctrica tomando en cuenta el consumo energético antes y después de haber sido implementado el sistema.

Palabras Clave:

- **CONGELAMIENTO RÁPIDO INDIVIDUAL**
- **REGISTRADOR DE TEMPERATURA**
- **INTERFAZ HUMANO MÁQUINA**
- **MODELAMIENTO MATEMÁTICO**

Abstract

This project proposes the design of a monitoring system for the temperature and time of food freezing where fragaria will be used, as it is a common variety subject to experimentation and studies regarding the project of Food Technology Research. To develop this system, the first thing to do will be collecting information concerning the IQF DIOFLUI-361 station. Then the quick freezing process and its advantages will be discussed, a mathematical estimation will be developed using physical principles and Thermodynamics equations taking into consideration physical and chemical properties of the fruit. Subsequently, the appropriate instrumentation will be used taking into account various selection criteria and once the appropriate elements have been selected to measure the temperatures defined in the process, the signals will be conditioned so that they can be read by a data acquisition system and subsequently a Human Machine Interface will be designed with its corresponding controls as process and historical values and it will be available locally as well as remotely. This system will be attached to the IQF station. Finally, the saving of electrical energy will be verified considering the energy consumption before and after the implementation of the monitoring system.

Keywords:

- **INDIVIDUAL QUICK FREEZING**
- **TEMPERATURE DATALOGGER**
- **HUMAN MACHINE INTERFACE**
- **MATHEMATICAL MODELING**

Capítulo I

1. Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

Actualmente la estación IQF que pertenece al Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato se encuentra en operación y a disposición de los participantes del proyecto ejecutado por la Unidad Operativa de Investigación en Tecnología de Alimentos. Esta estación consta de un túnel de lecho fluidizado lo que significa que durante el congelamiento IQF existe una aspersión de aire frío a alta velocidad la cual evita que los productos se adhieran y es comúnmente utilizada para tiempos cortos de congelación, es decir entre 5 y 15 minutos.

Para que el proceso se cumpla con éxito existen dos fases la primera que se conoce como fase de enfriamiento en donde la superficie de los alimentos llega desde la temperatura ambiente que normalmente esta entre 18 y 20°C hasta los 0°C, después de esto los alimentos reposan sobre una malla o placa perforada por donde circula el aire frío lo cual facilita la suspensión de las partículas de los alimentos evitando que se adhieran los productos hasta llegar a temperaturas tan bajas como -18°C que es la temperatura sugerida por la Norma del Codex para fresas congeladas. (Codex Alimentarius Commission, 2019)

Un problema que se ha generado durante la realización del proyecto de fortalecimiento tecnológico por parte de la UOITA es la falta de certeza del tiempo de congelación IQF cuando un producto está siendo sometido a dicho proceso. Esto significa un mayor consumo de energía eléctrica debido al uso desproporcionado de la misma trayendo como resultado un incremento en el pago de las planillas eléctricas del laboratorio en donde se aloja la estación. Además la estación no cuenta con un sistema

de alerta y de una interfaz de usuario la cual proporcione datos relevantes y donde también se pueda observar la evolución de la temperatura con el tiempo.

1.2. Antecedentes

La preservación de alimentos por congelación es una técnica que siempre ha estado presente a lo largo de la historia de la humanidad. De igual manera se han ideado varias formas de congelar los alimentos, pero a quien se le atribuye la invención del congelamiento rápido es a Clarence Birdseye en el año de 1924. Esta invención dio lugar al método de congelación que la industria alimenticia emplea hasta la actualidad. (Science Reference Section, Library of Congress, 2019)

El Laboratorio de Canje de Deuda de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología al momento se encuentra en plena ejecución del proyecto:

Fortalecimiento de la UOITA para la investigación, tecnología e innovación en el área de alimentos, con el fin de promover la generación y el desarrollo de empresas agroindustriales en la zona 3 del país; y monitorear el contenido de metales pesados en los cultivos afectados por las cenizas provenientes de las erupciones volcánicas del Tungurahua. (Honorable Consejo Universitario, 2019) Dentro del cual se ha propuesto la realización de un sistema de monitoreo de la temperatura y tiempo de congelación de la fragaria de variedades cultivadas en la zona centro del país.

1.3. Justificación e importancia

La ejecución de este proyecto permitirá el fortalecimiento y apoyo a la innovación en el área de alimentos, pues actualmente se está sobredimensionando el tiempo de congelación IQF de los alimentos lo cual trae consigo problemas como el desperdicio de energía eléctrica y un menor rendimiento en el procesamiento de lotes de alimentos. Para conocer con precisión el tiempo de congelación IQF se realizará experimentaciones con especies de fragaria cultivadas en la zona central del país

tomando en cuenta criterios de manejo de alimentos considerados en el Codex Alimentarius. Gracias a la implementación de este sistema de monitoreo y alerta se pretende ahorrar considerablemente el consumo energético, reducir el pago en la planilla eléctrica y en casos de en donde se trabajará con varios lotes de frutas también mejoraría la eficiencia de producción de la estación IQF, lo cual podría aumentar significativamente el rendimiento en kg/h del equipo.

Es crucial el desarrollo de un modelo matemático que tome en cuenta las propiedades físico-químicas de la fragaria, esto con el fin de fortalecer la investigación e innovación en el área de alimentos y promover la aplicación de nuevos métodos de conservación de alimentos en agroindustrias pertenecientes a la zona central del país.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

- Implementar un sistema de monitoreo de tiempo y temperatura en la estación IQF de Lecho Fluidizado DIOFLUI-361 durante los procesos de congelación rápida de la fragaria en el Laboratorio de Canje de Deuda de la FCIAB-UTA.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Diagnosticar las condiciones técnicas y operativas de la cámara de congelación rápida IQF.
- Obtener un modelo matemático que permita conocer el tiempo de congelación aproximado de la fragaria, tomando en cuenta sus propiedades físico-químicas.
- Diseñar e implementar del sistema de monitoreo.
- Realizar pruebas que permitan evaluar la mejora de la eficiencia energética de la estación IQF con el sistema implementado.

1.5. Variables de la investigación

1.5.1. *Variable independiente*

Medición del tiempo del proceso de congelación rápida de la fragaria.

1.5.2. *Variable dependiente*

Consumo energético de la estación IQF

1.6. Hipótesis

El prototipo de monitoreo a implementarse permitirá una mejora en el uso eficiente de la energía eléctrica de la estación IQF del Laboratorio de Canje de Deuda perteneciente a la FCIAB-UTA.

Capítulo II

2. Marco Teórico

2.1. Antecedentes Investigativos

Los sectores de agroindustria y agro exportación se encuentran en constante innovación y crecimiento, pues siempre se busca la manera de conservar y preservar alimentos como frutas y verduras a través de mejoras en la tecnología de congelación. (Boulangier Tambini, et al., 2020). Entre algunos trabajos de investigación, se puede mencionar *Dimensionamiento y selección de un túnel de congelación para el procesamiento de banano*; en donde en base a cálculos matemáticos se determina el consumo energético de los elementos que conforman un túnel IQF, tiempo aproximado de congelación del banano, entre otras características. (Lucas Hidalgo, 2016)

En *Evaluación de los efectos de la precocción, prefritura y congelación IQF* se toman en cuenta las propiedades fisico-químicas de la yuca y se evalúan los efectos de la congelación IQF para una mejor conservación y preservación de los alimentos. (Ulloa Paredes, 2018). Finalmente en el trabajo de investigación *Evaluación del efecto de la congelación rápida individual (IQF) en las características fisicoquímicas y sensoriales de pitahaya amarilla en rodajas* se analizan las virtudes de la congelación IQF en la preservación de dicha fruta cuyas propiedades, cuidados y forma de cultivo son comparables con las de la fragaria. (Pichuasamín Rivera, 2021)

2.2. Cultivo de Fragaria

El cultivo de fresa o fragaria es una alternativa productiva que ha permitido a distintos sectores mantenerse activos económicamente, es una fruta que puede ser exportada ya sea recién cultivada o procesada mediante técnicas de conservación. Gracias a la presencia de distintas variedades de fragaria, la oferta de la misma está disponible durante todo el año y cuyo principal mercado es la industria alimentaria en

donde se producen derivados como saborizantes, lácteos, conservas, etc. (Escalante Varona, 2015) Las especies mixtas como la *Fragaria x ananassa* son las que se más se cultivan y han desplazado a especies locales como la *Fragaria vesca*. (Mejía, 2013 citado por Pérez Guerrero , 2018) Ecuador posee las condiciones apropiadas para que se cultive la fragaria, en la región Interandina es en donde mas hectáreas se producen de esta fruta. Las provincias con más producción son Pichincha, Tungurahua y Azuay. (Verdugo González, 2012) En los últimos años Tungurahua ha cobrado protagonismo en la producción de la fragaria, prácticamente es cultivada en todos los cantones y su producción es constante. La temperatura en las zonas donde se cultiva oscila entre 15° y 20° C, la mayoría de productores poseen certificación de Buenas Prácticas Agrícolas la cual garantiza la inocuidad alimentaria. En la provincia existen tres centros de acopio y según datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería los cultivos de esta fruta bordean las 350 hectáreas, sin contar la producción de pequeños agricultores no certificados. (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2020). En la Tabla 1 se describe la taxonomía de esta fruta.

Tabla 1

Taxonomía de la fragaria

Jerarquía	Nombre
Reino	Plantae
Subreino	Viridiplantae
Infrarreino	Streptophyta
Superdivisión	Embryophta
División	Tracheophyta
Subdivisión	Spermatophytina
Clase	Magnoliopsida

Jerarquía	Nombre
Superorden	Rosanae
Orden	Rosales
Familia	Rosaceae
Género	Fragaria L.
Especies	X ananassa
	X bringhurstii
	Fragaria chiloensis
	Fragaria vesca
	Fragaria virginiana

Nota. Reproducido de Taxonomic Serial No.: 24624, de ITIS, 2021, <https://n9.cl/xv15v>

Así mismo la fragaria es una fruta rica en composición nutricional a continuación en la Tabla 2 se detallan algunos de sus componentes por cada 100g:

Tabla 2

Composición Nutricional de la fragaria

Composición	Valor por cada 100g
Energía (kcal)	40
Proteínas(g)	0.7
Colesterol(mg/1000kcal)	0
Hidratos de carbono(g)	7
Fibra(g)	2.2
Agua(g)	89.6
Calcio(mg)	25
Hierro(mg)	0.8

Composición	Valor por cada 100g
Yodo(μ g)	8
Magnesio(mg)	12
Zinc(mg)	0.1
Sodio(mg)	2
Potasio(mg)	190
Fósforo(mg)	26
Tiamina(mg)	0.02
Riboflavina(mg)	0.04
Equivalentes niacina(mg)	0.6
Vitaminas B6(mg)	0.06
Folatos(μ g)	20
Vitamina B12(μ g)	0
Vitamina C(mg)	60
Vitamina A(mg)	1
Vitamina D(μ g)	0
Vitamina E(mg)	0.2

Nota. Reproducido de Tablas de Composición de Alimentos, Fundación Española de la Nutrición, s.f., <https://n9.cl/hcnm1>

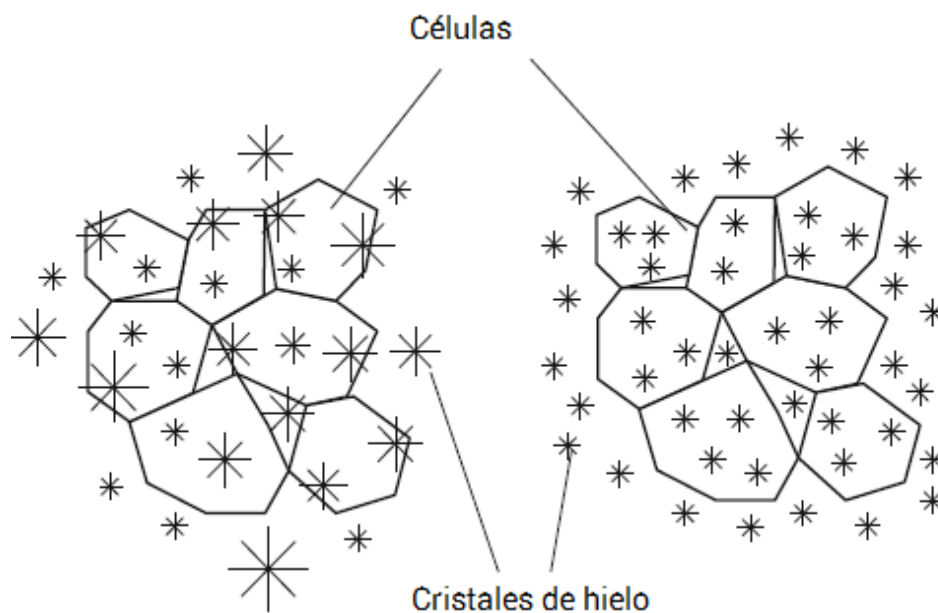
2.3. Congelamiento rápido individual

El método de congelamiento denominado IQF, del inglés Individual Quick Freezing, es una técnica desarrollada con el fin de congelar alimentos conservando sus propiedades tanto físicas como nutritivas. Esto ocurre gracias a la formación de micro cristales de hielo alrededor de las paredes celulares como se ilustra en la Figura 1, los mismos que evitan derrames de fluidos celulares al momento de descongelar los

alimentos para su consumo. En contraste con la congelación lenta en la cual los cristales de hielo son mucho más grandes provocando que los alimentos pierdan textura, forma y valor nutritivo. (Eurofrits, 2016) Además, al ser congelados los productos de manera individual, esto hace que las partículas no se adhieran y no formen un solo bloque sólido como ocurre con la congelación convencional. Dentro de la congelación IQF existen diversos túneles los cuales emplean distintos métodos, la selección de los mismos depende de varios factores como el producto a congelar, el tipo de producción e incluso el factor económico. (Singh, 2021) En la Figura 1 se ilustra la formación de cristales durante la congelación.

Figura 1

Formación de cristales en las paredes celulares durante la congelación



Nota. Tomado de Ice crystals in freezing of food cells, de Saravacos & Kostaropoulos, 2016, Handbook of Food Processing Equipment, pág. 470.

La congelación IQF consta de distintas etapas desde que el producto está en su estado natural, a temperatura ambiente, hasta que el proceso haya cumplido su propósito. Estas etapas son:

- **Etapas de formación de cristales de hielo**

También se conoce como cristalización y consiste en la formación de cristales a partir de núcleos ya formados. Cuanto más baja es la temperatura más fácilmente se forman y de menor tamaño son los cristales, para esto se necesita de partículas o sales insolubles actuando como núcleos de cristalización. (Martin, 2015)

- **Nucleación**

En esta etapa se formarán pequeñas partículas estables, las cuales se desarrollan rápidamente, esto sucede cuando las partículas alcanzan un tamaño mínimo, partiendo de un radio crítico. En esta etapa se controla la distribución y tamaño de los cristales que rodean al producto, factores que dependen de la velocidad de congelación. (Robles Quintana, 2014)

- **Crecimiento de cristales de hielo**

En esta etapa las moléculas viajan hacia la superficie de los núcleos, el crecimiento de los cristales depende en gran medida por la tasa de calor latente de la nucleación, a medida que la temperatura disminuye la densidad de cristales de hielo en la superficie aumenta. (Robles Quintana, 2014)

2.4. Túnel de congelación rápida

Un túnel IQF o túnel de congelación rápida es utilizado principalmente en la agroindustria y en la industria alimenticia con el fin de preservar de mejor manera los alimentos manteniendo la calidad y la inocuidad de los mismos. (Cosmos, s.f.) Asimismo estos túneles son capaces de procesar grandes lotes de alimentos en relativamente corto tiempo. (SF Technology, 2021). Las ventajas de los túneles de

congelación rápida son: flexibilidad, se pueden usar para una gran variedad de alimentos; facilidad de limpieza; simplicidad del proceso. (Saravacos & Kostaropoulos, 2016,pág. 475), otras ventajas con respecto a la calidad de los alimentos una vez procesados en túneles de congelación rápida son: durabilidad; inocuidad; higiene; conservación de textura y nutrientes; reducción de preservantes artificiales. (Cosmos, s.f.). Los túneles IQF son instalaciones frigoríficas y como la mayoría tienen el mismo principio de funcionamiento, consecuentemente los mismos componentes. A continuación se detallan las partes principales de estas instalaciones, su función y de igual manera se muestra una ilustración de todo en la Figura 2.

- **Compresor**

Es el elemento principal, en él se produce la diferencia de presiones para que se cumpla el ciclo de refrigeración. A su entrada recibe el gas refrigerante a baja presión y baja temperatura, lo comprime y a su salida lo expulsa a alta presión y alta temperatura, estas condiciones dan paso a la etapa de condensación. (Universidad Miguel Hernández, 2016)

- **Condensador**

Es una tubería por donde circula el gas a presión que es expulsado por el compresor reduce su volumen, gana calor y por su diseño aquí mismo pierde calor el cual es disipado al ambiente y se transforma en líquido. (Universidad Miguel Hernández, 2016)

- **Evaporador**

Se trata de un intercambiador de calor en forma de serpentina por donde ingresa el refrigerante en forma de líquido y es expulsada en forma de gas, luego de este proceso la cavidad a ser refrigerada se enfría y el refrigerante en forma de gas se calienta. (Refrigeración NER, s.f.)

- **Válvula de expansión**

Esta válvula se encuentra al final del ciclo de refrigeración, aquí se controla el caudal de gas refrigerante que sale del condensador y que el mismo tenga la presión y temperatura adecuadas para continuar extrayendo calor de la cavidad. (Universidad Miguel Hernández, 2016)

- **Gas refrigerante**

Es un compuesto químico el cual a lo largo del ciclo de refrigeración sufre de transformaciones físicas para lograr el objetivo de extraer calor. (Gallardo, 2021)

- **Ventilador centrífugo**

Es un equipo empleado para generar flujos de aire y en donde se transforma energía mecánica dentro de una turbina a energía cinética y potencial lo que se conoce también como fuerzas centrífugas. El flujo de aire expulsado es perpendicular al flujo de aire recolectado. (Ballesteros Hernández, 2017)

- **Variador de velocidad**

Son dispositivos utilizados en máquinas giratorias, especialmente motores con la finalidad de variar su velocidad y su momento de fuerza. (Compañía Levantina de Reductores, s.f.). En un túnel IQF se utilizan variadores de velocidad para controlar la velocidad y flujo del aire frío que ingresa a la cámara.

- **Presostato**

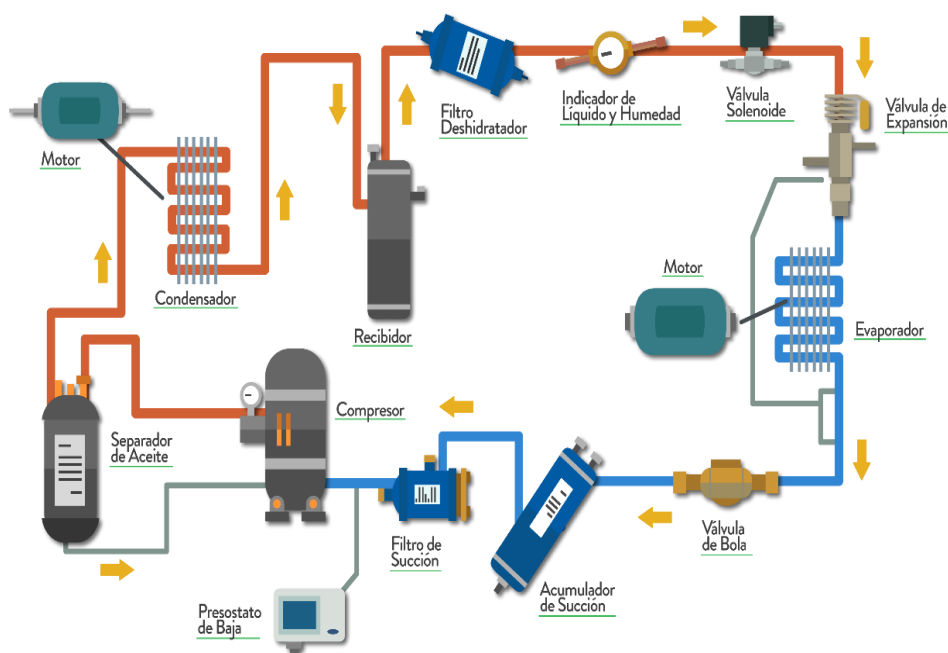
Son instrumentos que trabajan a la par del compresor y se activan o desactivan cuando la presión está fuera de límites establecidos. Generalmente existe un presostato de baja presión el cual abre el circuito del ciclo de refrigeración cuando la presión ha descendido a cierto nivel lo cual indica que la temperatura también ha descendido. (Dártico, 2018)

- **Electroválvulas**

Son dispositivos capaces de regular el paso o no de un fluido, en este caso del refrigerante cuando este se encuentra bajo alguna condición. Funcionan gracias al accionamiento de un solenoide. (ARCO, 2020)

Figura 2

Partes Principales de un Túnel IQF



Nota. Tomado de Componentes principales de un túnel IQF e ilustración del ciclo de refrigeración. Reproducido de García, 2020, <https://n9.cl/lea8b>

2.4.3. Tipos de túneles IQF

Los equipos IQF se clasifican de acuerdo a:

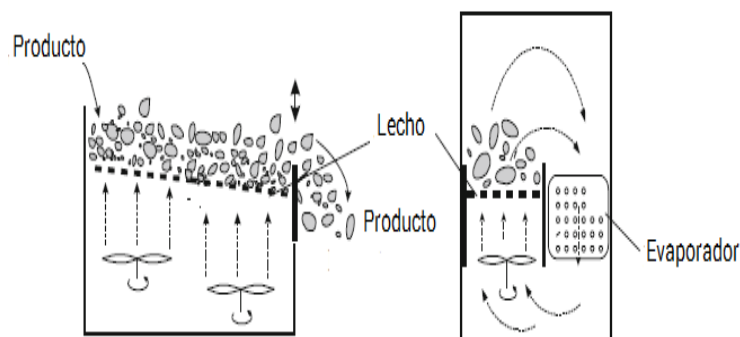
- La temperatura empleada en el proceso;
- El estado del producto a procesar (sólido o líquido);
- El medio de congelación (superficial, líquido a aire);
- La forma de procesar los productos (continua o por lotes). (Saravacos & Kostaropoulos, 2016, pág. 474)

- **Túnel de lecho fluidizado**

Estos túneles son empleados cuando se requiere congelar alimentos de tamaño limitado, es decir diámetro de hasta 3 cm y largo hasta 12 cm. En estos túneles los alimentos son congelados uno a uno por el aire helado que fluye desde el lecho en que reposan. En estos equipos el lecho, el cual es una placa de acero perforada, se encuentra de manera inclinada, por debajo de este se encuentran ventiladores centrífugos que empujan el aire hacia arriba a través de los agujeros del camastro, mientras los intercambiadores de calor congelan el aire hasta $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. La razón por la cual el lecho se encuentra de forma inclinada es porque el aire que fluye desde abajo a la vez que congela los alimentos forma un colchón el mismo que facilita que el transporte de los mismos desde un punto inicial hasta un punto final. El producto se congela de manera rápida al estar rodeado de aire helado lo cual facilita la transferencia de calor entre el aire y el producto. Hay que destacar que durante este proceso el producto final pierde entre el 1.5 y 2% de su peso inicial. (Saravacos & Kostaropoulos, 2016) En la Figura 3 se ilustra este tipo de túnel.

Figura 3

IQF de Lecho Fluidizado



Nota. Ilustración del proceso de congelamiento por lecho fluidizado. Tomado de Fluidized bed freezing, de Saravacos & Kostaropoulos, 2016, Handbook of Food Processing Equipment, pág. 475.

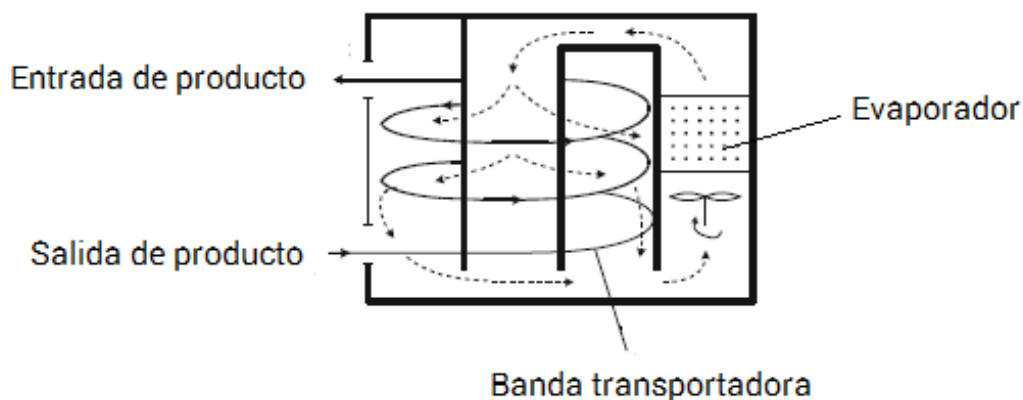
- **Túnel con banda transportadora**

Este tipo de túneles se emplea para congelar alimentos de mayor longitud y peso, los equipos cuentan con bandas transportadoras que se mueven a través de una corriente de aire. Las bandas son hechas de plástico o acero con agujeros que permiten que el aire fluya hacia los alimentos. Las bandas transportadoras pueden disponerse de a manera de elevador, espiral o en forma recta. Estos túneles se utilizan cuando se requiere procesar grandes volúmenes de alimentos. Una desventaja de los mismos es el mayor consumo energético al tener una mayor cantidad de máquinas rotativas (motores) como elementos constitutivos. (Saravacos & Kostaropoulos, 2016)

En la Figura 4 se muestra como es el proceso de congelamiento en este túnel.

Figura 4

IQF de Banda Transportadora



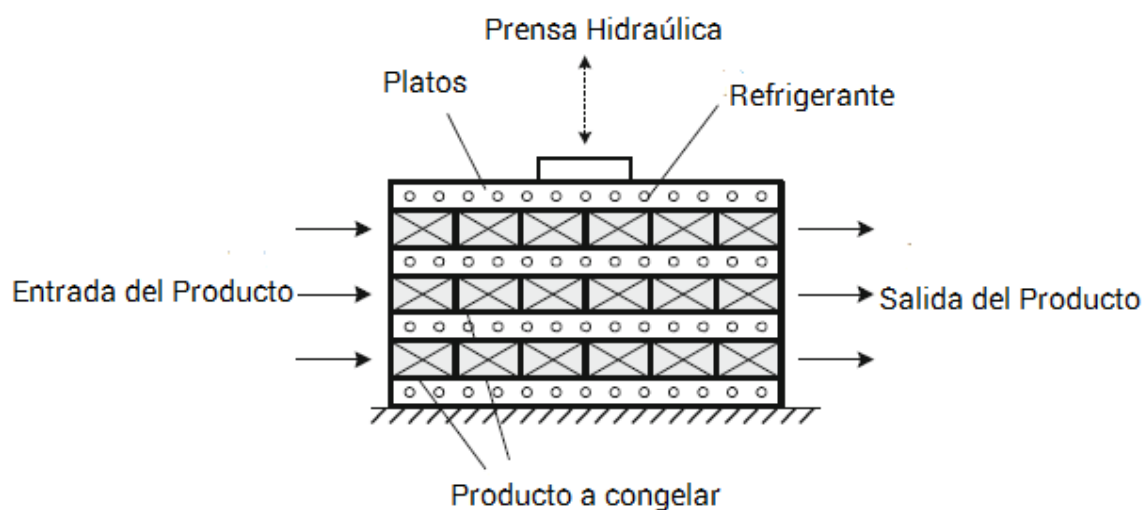
Nota. En la figura se muestra un túnel con banda transportadora en espiral. Tomado de Curved (spiral) belt freezing equipment, de Saravacos & Kostaropoulos, 2016, Handbook of Food Processing Equipment, pág. 477.

- **Túnel de superficie fría**

Estos túneles son utilizados para congelar filetes de carne, especialmente de pescado y consiste de unos platos de doble pared por los que circula el refrigerante y estos a su vez son accionados por una prensa hidráulica que trabaja a baja presión contra las piezas de alimento a congelar. Los platos y la superficie son hechos de aleaciones especialmente de aluminio, metal ampliamente utilizado en la industria alimentaria. (Saravacos & Kostaropoulos, 2016) Como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

IQF de Superficie Fría



Nota. Ilustración de un equipo de congelación rápida de superficie fría. Tomado de Horizontal plate freezing equipment, de Saravacos & Kostaropoulos, 2016, Handbook of Food Processing Equipment, pág. 478.

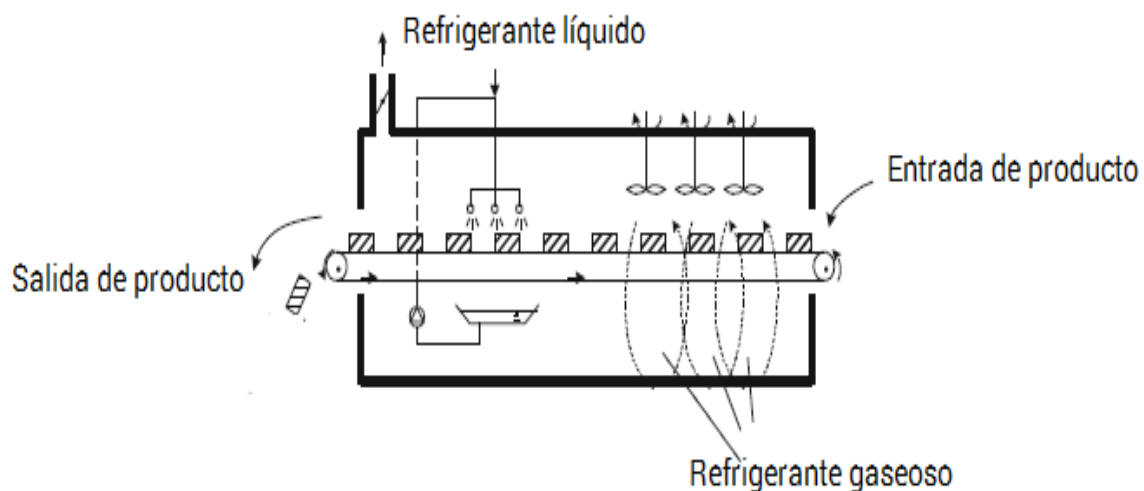
- **Túnel de congelación líquida**

En estos túneles se utilizan fluidos criogénicos como nitrógeno líquido, dióxido de carbono entre otros líquidos no tóxicos al contacto con los alimentos. La congelación se realiza por aspersión o por inmersión en estos fluidos y es mucho más rápida que en los túneles mencionados anteriormente al existir contacto directo. Frecuentemente estos

túneles constan de una banda transportadora recta. En la Figura 6 una ilustración del proceso de congelamiento en este túnel.

Figura 6

Equipo de Congelación por Fluido Criogénico



Nota. Representación gráfica de un equipo de congelación por líquido el cual emplea una banda transportadora. Tomado de Cryogenic liquid freezing equipment, Saravacos & Kostaropoulos, 2016, Handbook of Food Processing Equipment, pág. 481.

2.5. Medición de temperatura

La temperatura es el grado de energía térmica que desprende un cuerpo. “Esta variable es muy importante para la industria pues puede identificar las ganancias o pérdidas de calor en las sustancias empleadas en un proceso para obtener resultados óptimos en los productos...” (Omega, s.f., párr. 13). La medición de temperatura es una de las mediciones mas importantes que se realizan en los procesos industriales, frecuentemente se utiliza la temperatura para inferir en la variación de otras variables.

Las restricciones en los instrumentos que cuantifican la temperatura se determinan por:

- La aplicación del proceso;
- La evolución de la temperatura;

- La distancia entre el proceso y el receptor;
- El tipo de indicador o registrador;

Es crucial distinguir las ventajas y desventajas de los distintos procedimientos de medición de temperatura, de esta manera se podrá elegir con eficacia un sistema que se adapte a nuestras necesidades. (Escuela Industrial "San José")

2.6. Instrumentación en la medición de temperatura

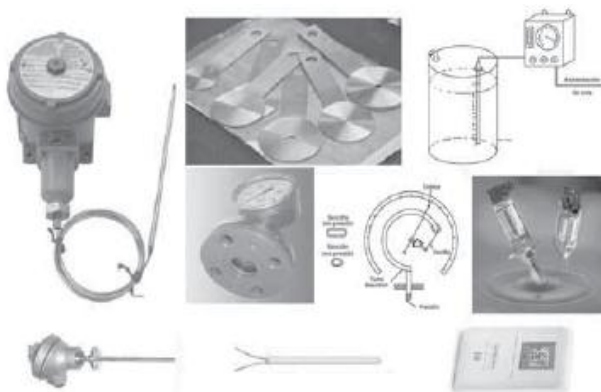
La instrumentación tiene por objeto la medición de variables físicas, que son transformadas a variables eléctricas para posteriormente ser procesadas y mostradas a un operador humano, todo esto apoyado por instrumentos electrónicos. (Drake Moyano, 2005)

- **Sensores**

Son instrumentos que están en contacto con la variable a medir, como se muestra en la Figura 7, la captan y envían una señal a su salida. (Creus Solé, 2011)

Figura 7

Sensores y Elementos Primarios



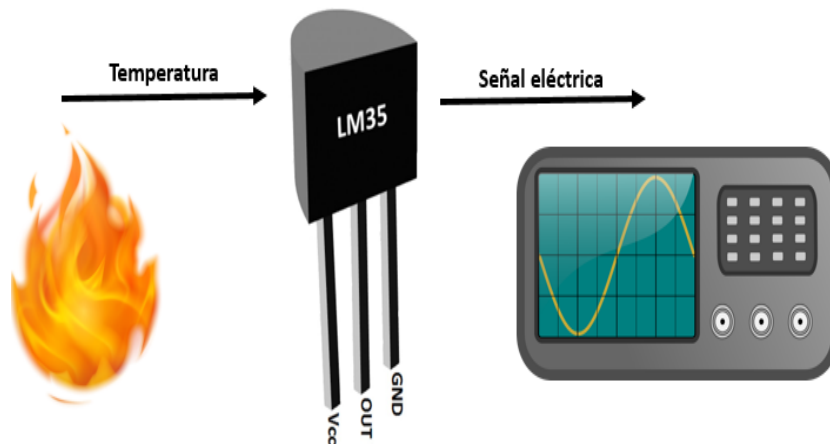
Nota. También se los conoce como elementos primarios al estar en contacto directo con la variable. Tomado de Sensores y elementos primarios, de Creus Solé, 2011, Instrumentación Industrial, pág. 23.

- **Transductores**

Un transductor como se muestra en la Figura 8 generalmente transforma una señal física en una señal eléctrica. (Creus Solé, 2011)

Figura 8

Transductor



Nota. Tomado de Ejemplo Transductor, de Cuadros Acosta, 2020, <https://n9.cl/ioesx>

Transmisores

Los transmisores, como se muestran en la Figura 9, captan la variable procedente generalmente de un transductor y la envían como una señal estándar. (Creus Solé, 2011)

Figura 9

Transmisores



Nota. Se ilustra distintos tipos de transmisores. Reproducido de Transmisores, Creus Solé, 2011, Instrumentación Industrial, pág. 24.

- **Receptores**

Un instrumento receptor es aquel que recibe la señal proveniente de un transmisor con el fin de registrarla, regularla o manipularla según la necesidad del proceso. (Autycom, 2021)

- **Indicadores**

Se consideran como instrumentos auxiliares ya que los mismos proveen de información visual de alguna señal para un operador o encargado de supervisar un proceso. Pueden ser analógicos y digitales. (Inst Tools, 2021) En la Figura 10 se ilustran dos tipos de instrumentos indicadores.

Figura 10

Instrumentos Indicadores



Nota. Se ilustra un indicador analógico y otro digital respectivamente. Tomado de Instrumentos Indicadores, Creus Solé, 2011, Honeywell, pág. 22.

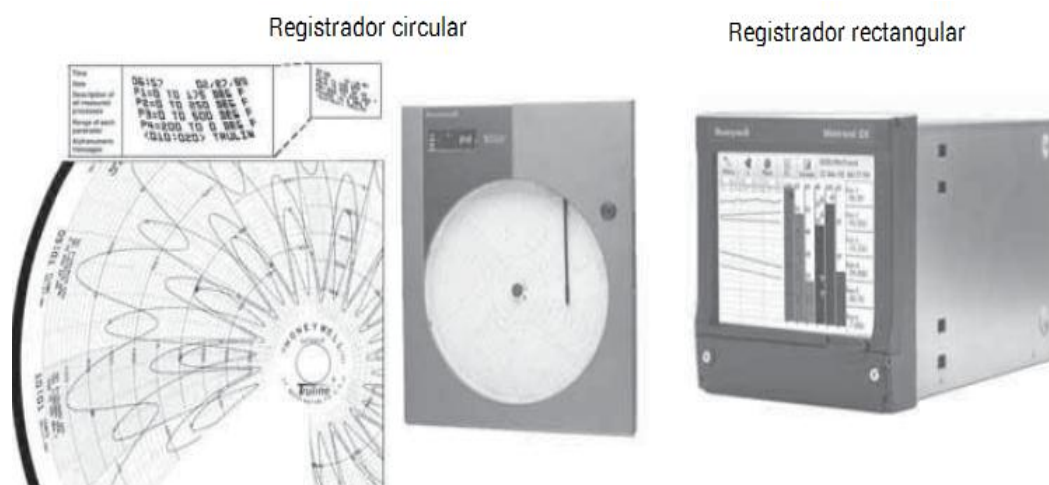
- **Registradores**

Son instrumentos que consignan una variable en forma de trazos, de manera continua o con puntos, dependiendo de su naturaleza, así también la forma geométrica

del registro de la variable depende de la misma. (Creus Solé, 2011). A continuación en la Figura 11 se ilustran a estos instrumentos con sus formas.

Figura 11

Instrumentos Registradores



Nota. Tomado de Instrumentos registradores (circular y rectangular sin papel), de Creus Solé, 2011, Honeywell, pág. 23.

2.6.1 Características de los instrumentos

Usualmente los instrumentos cuentan con especificaciones de fábrica las mismas que caracterizan su funcionamiento y se detallan a continuación:

- **Rango**

Se define como la distancia entre el valor mínimo y máximo dentro de la cual el instrumento puede medir, transmitir, registrar, etc. (Gutiérrez Hinstroza & Iturralde Kure, 2017)

- **Alcance**

Es la diferencia entre el valor mínimo y el valor máximo del rango. También se lo conoce como Span.

- **Exactitud**

Es la capacidad de un instrumento de mostrar resultados de mediciones cercanas a un valor patrón. (Creus Solé, 2011)

- **Precisión**

Parámetro de un instrumento que indica el grado de dispersión que existe entre mediciones. La precisión es directamente proporcional a la dispersión de estos valores. (Gutiérrez Hinstroza & Iturralde Kure, 2017)

- **Zona muerta**

Se define como una banda para la cual una variación en la variable de entrada no causa variación en la respuesta del instrumento. (Creus Solé, 2011)

- **Sensibilidad**

Es una proporción resultante de la señal de respuesta de un instrumento y la variable que ocasiono aquella reacción. (Creus Solé, 2011)

- **Repetibilidad**

Cualidad de un instrumento de reincidir en mediciones resultantes de una variable bajo las mismas condiciones y a lo largo de todo el rango del mismo. Una buena repetibilidad viene dada por una gran precisión y una baja dispersión. (Creus Solé, 2011)

- **Histéresis**

Se puede definir como la diferencia de dos mediciones aisladas tomadas en el mismo punto. La primera se toma en una serie de valores crecientes y la otra en una serie de valores decrecientes. Este fenómeno es causado por la renuencia o reluctancia de un material a volver a su estado original después de haber sufrido estrés mecánico, eléctrico, etc. (Sensors One, 2021)

- **Resolución**

Es “la menor diferencia de valor que el instrumento puede distinguir” (Creus Solé, 2011, pág. 18). Dicho de otra manera es el incremento mínimo que un instrumento puede detectar y mostrar, transmitir, etc.

- **Linealidad**

Es la proximidad de la relación de los valores de entrada y salida de un instrumento comparada con una línea recta determinada. (Creus Solé, 2011)

- **Temperatura de servicio**

Es el “Campo de temperaturas en el cual se espera que trabaje el instrumento dentro de unos límites de error especificados.” (Creus Solé, 2011, pág. 19)

2.6.2 Sensores de temperatura

- **Termopar**

Un termopar es un conjunto de dos conductores metálicos de distintas características unidos en un extremo y cuyas uniones se encuentran a distintas temperaturas, bajo estas condiciones se produce un pequeño voltaje producto de un efecto termoeléctrico conocido como Efecto Seebeck, este no es el único efecto que se produce en la formación de un termopar hay otros dos efectos de igual importancia que ayudan a comprender de mejor manera como funcionan los sensores de temperatura basados en termopar, el siguiente efecto es el efecto Peltier, que fue descubierto por el físico Jean Charles Peltier en 1834 el cual observó que en una juntura por donde circula corriente existe liberación o absorción de calor dependiendo del sentido de flujo de la corriente. En 1854, el físico William Thomson descubrió que en un conductor cuyos extremos están sometidos a una variación de temperatura por unidad de distancia, lo que también se conoce como gradiente térmico, la densidad de electrones también será distinta de punto a punto desde ahí ese fenómeno se conoce como el efecto Thomson.

Para medir temperatura con un termopar es indispensable que la suma algebraica de las fuerzas electromotrices de los Efectos Peltier y Thomson sea suficiente como para cuantificar una variación de voltaje cuando la temperatura también varíe. (Acedo Sánchez, 2003)

- ***Tipos de Termopares***

En la Tabla 3 se detallan los principales tipos de termopares.

Tabla 3

Tipos de termopares según su material

Tipo de termopar	Material	Rango normal (°C)
J	Hierro-Constantan	-190 a 760
T	Cobre-Constantan	-200 a 370
	Cobre-(Cobre-Niquel)	
K	Cromel-Alumel	-190 a
	(Cromo-Niquel)-	1260
	(Aluminio-Niquel)	
E	Cromel-Constantan	-100 a
		1260
S	90% Platino + 10% Rodio)-Platino	0 a 1480
R	87% Platino + 13% Rodio)-Platino	0 a 1480

Nota. De acuerdo a los metales y aleación de metales utilizados para su construcción se han asignado letras a cada tipo de termopar, cada tipo tiene sus propias características.

Tomado de Acedo Sánchez, 2003, Control Avanzado de Procesos, pág.73.

- **Sensores resistivos**

La medición con este tipo de sensores se realiza aprovechando la propiedad de los materiales de cambiar su resistencia eléctrica con la variación de temperatura. Existen dos tipos de sensores los RTD y los termistores, los primeros constan de un arrollamiento metálico y son de respuesta casi lineal y los segundos basan su funcionamiento en el cambio de resistencia de un semiconductor y tienen una respuesta que decae de manera no lineal con la variación de la temperatura. (Omega Engineering, s.f.)

- **Sensores bimetalicos**

Estos dispositivos aprovechan la tasa de dilatación existente en los metales, generalmente son dispuestos en pequeñas tiras cuando existe variación de temperatura un metal se dilata mas que otro y esa diferencia es cuantificada por algun mecanismo hacia un indicador en forma de aguja, generalmente estos dispositivos son portátiles y no se prestan para trabajos donde el registro de la temperatura sea necesario. (Omega Engineering, s.f.)

- **Medición con sensores por dilatación de fluidos**

Estos dispositivos dilatan un líquido de características conocidas con la variación de temperatura y son los más comunes especialmente para uso doméstico, el mas conocido de estos es el termómetro de mercurio aunque debido a su toxicidad existen otros de material orgánico con estos termómetros es imposible registrar la temperatura. (Omega Engineering, s.f.)

- **Sensores por cambio de estado**

La medición de temperatura por medio de estos sensores consiste en etiquetas, pellets o gránulos, crayones, lacas o cristales líquidos que cambian de características visibles como por ejemplo el color, una vez que estos alcancen cierta temperatura, su respuesta es bastante lenta, no son aptos para detectar cambios súbitos de temperatura y carecen de precisión. (Omega Engineering, s.f.)

- **Pirómetros de radiación.**

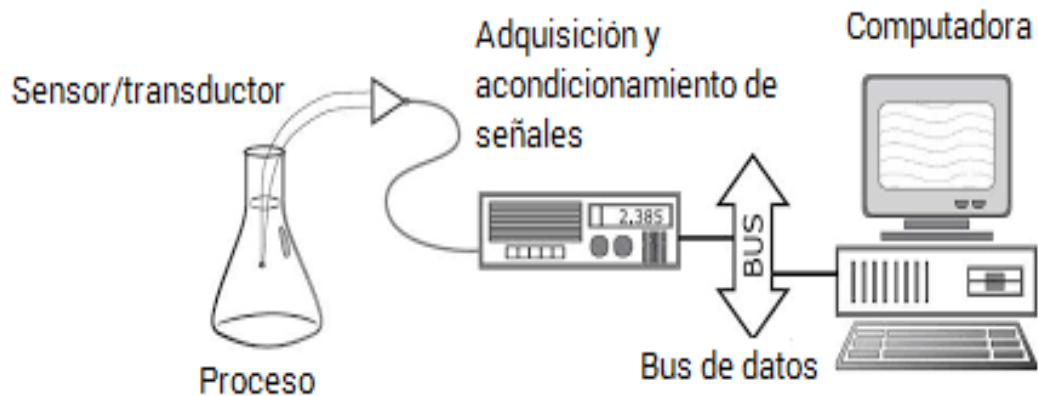
Utilizados para medir la temperatura superficial de un cuerpo, “los pirómetros de radiación se fundan en la ley de Steffan-Boltzmann, que dice que la intensidad de energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin) del cuerpo,...” (Creus Solé, 2011, pág. 299)

2.6.2 Instrumentación Virtual

Es una rama de la Electrónica que combina software con hardware para representar instrumentos virtuales a través de la adquisición y procesamiento de señales. Gracias a la instrumentación virtual tanto desarrolladores como usuarios son capaces de construir y adaptar instrumentos acordes a sus necesidades. Algunas ventajas de estos instrumentos son funcionalidad, costo, escalabilidad y flexibilidad. Un sistema de instrumentación virtual se compone de una computadora equipada con un software lo suficientemente potente para la aplicación a desarrollarse, un sistema de adquisición de datos encargado de acondicionar las señales provenientes de instrumentos de medida, drivers o intermediarios para comunicar el hardware con el software y buses que comunican los datos mediante el empleo de algún tipo de protocolo. (National Instruments, 2019) A continuación en la Figura 12 se muestra la arquitectura básica de un sistema de instrumentación virtual:

Figura 12

Arquitectura de un sistema de instrumentación virtual



Nota. Tomado de Esquema general de un sistema de medición informatizado, de Borrero Serrano, s.f., Biblioteca de Ingeniería Universidad de Sevilla, <https://n9.cl/0nsvk>

2.7 Adquisición de datos

La adquisición de datos consiste en medir por medio de algún sistema embebido variables provenientes de fenómenos eléctricos o físicos como corriente, voltaje, temperatura, presión, etc. Un sistema de adquisición de datos consta de sensores, hardware de lectura de datos, una computadora con software dedicado para esta tarea. Los sistemas de adquisición de datos que cuentan con unidades de procesamiento generalmente son más potentes, fiables y son industrialmente más aceptados debido a su versatilidad y productividad. (National Instruments, s.f.)

- **Sistemas embebidos**

Son sistemas integrados todo en una misma tarjeta madre o placa base capaces de realizar tareas específicas, normalmente incluyen una unidad central de procesamiento, interfaces de entrada y salida y algún tipo de memoria. (Luchetti, 2021)

- **Computadoras de placa única**

Son placas que poseen los mismos componentes y funcionalidad de una computadora personal, pero en una placa de tamaño reducido. Su ventaja es que son compatibles con múltiples sistemas operativos y sus distribuciones, poseen conectividad de red y pese a su limitada potencia, se puede realizar casi lo mismo que con una computadora normal. (García Cobo, s.f.)

2.8. Interfaz Humano Máquina

Una interfaz humano máquina (HMI) es la interfaz existente entre un proceso y un usuario humano, donde el usuario generalmente puede monitorear y visualizar partes importantes del proceso. Esta herramienta traduce variables de procesos complejos en información entendible y relevante. El objetivo principal de una HMI es mostrar por medio de gráficos y en tiempo real información importante sobre el estado de las variables del proceso.

En resumen un HMI debe ser capaz de permitir dos cosas: operar y observar.

(Autycom, 2018) Los HMIs se clasifican en función de su configuración;

- **Terminal de operador**

Diseñados y construidos para ser operados bajo ambientes de acceso limitado o de difíciles condiciones. (Edimar, 2019)

- **PC-Software**

Se trata de una PC con algún tipo de software dedicado para el monitoreo y control de variables de proceso. (Edimar, 2019)

Y en función de su funcionalidad;

- **De botón**

Son accionadores en forma de botones o selectores e indicadores luminosos que muestran el estado actual de alguna variable. (Edimar, 2019)

- **De micro panel**

Permiten visualizar datos alfanuméricos y se componen de pequeñas pantallas de cristal líquido, su interacción con el proceso es limitada. (Edimar, 2019)

- **De panel**

Permiten visualizar el comportamiento de un proceso de forma dinámica, se componen de pantallas táctiles e interactúan mejor con el proceso. (Edimar, 2019)

- **Multipanel**

En estos HMIs se permite la visualización de varios procesos ubicados en distintas zonas, permiten operar y supervisar. (Edimar, 2019)

Capítulo III

3. Desarrollo e implementación

En este capítulo se describen las características más importantes de la estación DIOFLUI-361 alojada en la FCIAB, estas características son de suma importancia para obtener un modelo de predicción del tiempo de congelación rápida de la fragaria y permiten también desarrollar el sistema de monitoreo cuyos resultados luego serán contrastados con el modelamiento matemático y dirán que tan eficaz es el mismo. Asimismo para el modelamiento matemático se toman en cuenta las características físico-químicas tanto del fluido refrigerante como las de la fragaria y el mismo será desarrollado gracias a ecuaciones y principios elementales de la Termodinámica. Para la implementación del sistema de monitoreo se hace un análisis de la instrumentación electrónica y se decide cual es la que mejor se adapta al proceso de congelación rápida que junto con la selección de software y hardware adecuados brindan al usuario información relevante del proceso a través de un instrumentos virtuales e interfaces humano-máquina.

3.1. Túnel DIOFLUI-361

3.1.1 *Características técnicas y operativas*

El túnel IQF de lecho fluidizado DIOFLUI-361 es un equipo de aplicación experimental con capacidad de 30kg/h en donde se puede realizar estudios de congelación por lecho fluidizado para procesos industriales. Dentro de una cámara aislada se encuentran alojadas las secciones de congelador por aire forzado y lecho fluidizado junto con el ventilador y el evaporador. Las puertas del equipo cuentan con ventanas de observación las cuales incorporan resistencias calentadoras para evitar su congelamiento. Un ventilador transporta el aire frío desde el evaporador hacia el interior de la cámara. Este aire frío a su vez circula de manera perpendicular al lecho donde

reposan los alimentos a ser congelados. Tiene un monitor de temperatura ubicado en el tablero de control desde el cual se puede observar la temperatura de flujo libre, es decir la temperatura del aire. El compresor, el cual se encarga de comprimir y distribuir el refrigerante a través de todo el circuito frigorífico, se encuentra en la parte exterior del equipo. La velocidad del aire es ajustable mediante la variación de velocidad de un ventilador centrífugo gobernado por un variador de frecuencia. (Dártico, 2018)

En la Figura 13 se muestra el aspecto y la ubicación de este equipo dentro del laboratorio perteneciente a la FCIAB.

Figura 13

Ubicación del equipo DIOFLUI-361 en el Laboratorio de Canje de Deuda de la FCIAB



Nota. Se muestra el panel frontal, la puerta de la cabina de congelación y una vista panorámica del equipo

3.1.2 Características físicas del DIOFLUI-361

Tabla 4

Características principales del DIOFLUI-361

Característica	Descripción
Frente externo	2.82m
Fondo externo	1.44m
Alto Externo	2.15m
Acabado exterior e interior	Acero inoxidable 304
Ventana de servicio de aire forzado	39x26cm
Ventana de servicio de lecho fluidizado	44x39cm
Aislamiento mueble	Poliuretano 38kg/m ³
Temperatura	-18 a -30°C
Voltaje	220/3/60
Refrigerante	R.404
Aceite compresor	Sintético
Iluminación	LED

Nota. Tomado de Partes del túnel IQF, Dártico, 2018, Manual de usuario y operación del IQF.

3.1.3 Características electromecánicas del DIOFLUI-361

Tabla 5

Características de los elementos que componen el DIOFLUI-361

Equipo	Modelo	Serie	Capacidad	Voltaje
Compresor	TFH2480Z	6567090100	-	220/3/60
Tecumseh				

Equipo	Modelo	Serie	Capacidad	Voltaje
Protección de voltaje	Breakermatic trifásico	-	-	220/3/60
Motor blower	Siemens		1.5 HP	220/3/60
	1LA7083-4		1650 RPM	
Poleas	A54	-	1500 RPM	-
Motor evaporador	ELCO 34	-		220/1/60
	Vatios			
Motor condensador	Eje ½"	-	1/6HP	220/1/60
			1100 RPM	
Blower	DD-10-10		2.5 HP	-
TC	TC 900 RI	-	-	110/220
Variador de velocidad	SewDriver	LTEB001152B1100	-	220/3/60
	Movitrac			
Refrigerante	R404	-	10lb	-

Nota. Tomado de Características de los repuestos del equipo, de Dártico, 2018, Manual de Usuario y Operación del IQF.

3.1.4. Procedimiento de puesta en marcha del DIOFLUI-361

- El equipo debe estar conectado a un breaker tripolar externo y este debe estar activado;
- Verificar que los breakers ubicados en el interior del tablero de control se encuentren accionados;
- Esperar que el protector de voltaje temporice, cuando esté listo la luz piloto debe pasar de amarillo a verde, accionar el selector de refrigeración a ON;
- Accionar el selector del ventilador del evaporador y esperar hasta que la

temperatura baje a -26°C , energizar el ventilador centrífugo o blower mediante su selector a ON, a continuación se activa el selector del potenciómetro para activarlo y a continuación en la pantalla del variador de frecuencia se podrá observar la frecuencia a la cual está girando el ventilado;

- Cargar el producto, en este paso se debe apagar el blower (OFF) mientras las puertas se encuentran abiertas, una vez cargado el producto se cierran las puertas y se enciende de nuevo el blower;
- Cuando haya terminado el proceso de congelación, apagar el blower, retirar el producto, limpiar las cámaras, cerrar las puertas, colocar todos los selectores en posición OFF y apagar el breaker tripolar externo.

3.2. Procedimiento para congelar fragarias en el túnel DIOFLUI-361

Para realizar las pruebas experimentales, tanto antes como después de implementado el sistema de monitoreo, se ha escogido la variedad Fragaria x ananassa por su versatilidad y disponibilidad. Antes de ser sometida a congelación IQF la fruta debe pasar por un proceso y cumplir ciertos criterios de selección, mismos que se detallan a continuación:

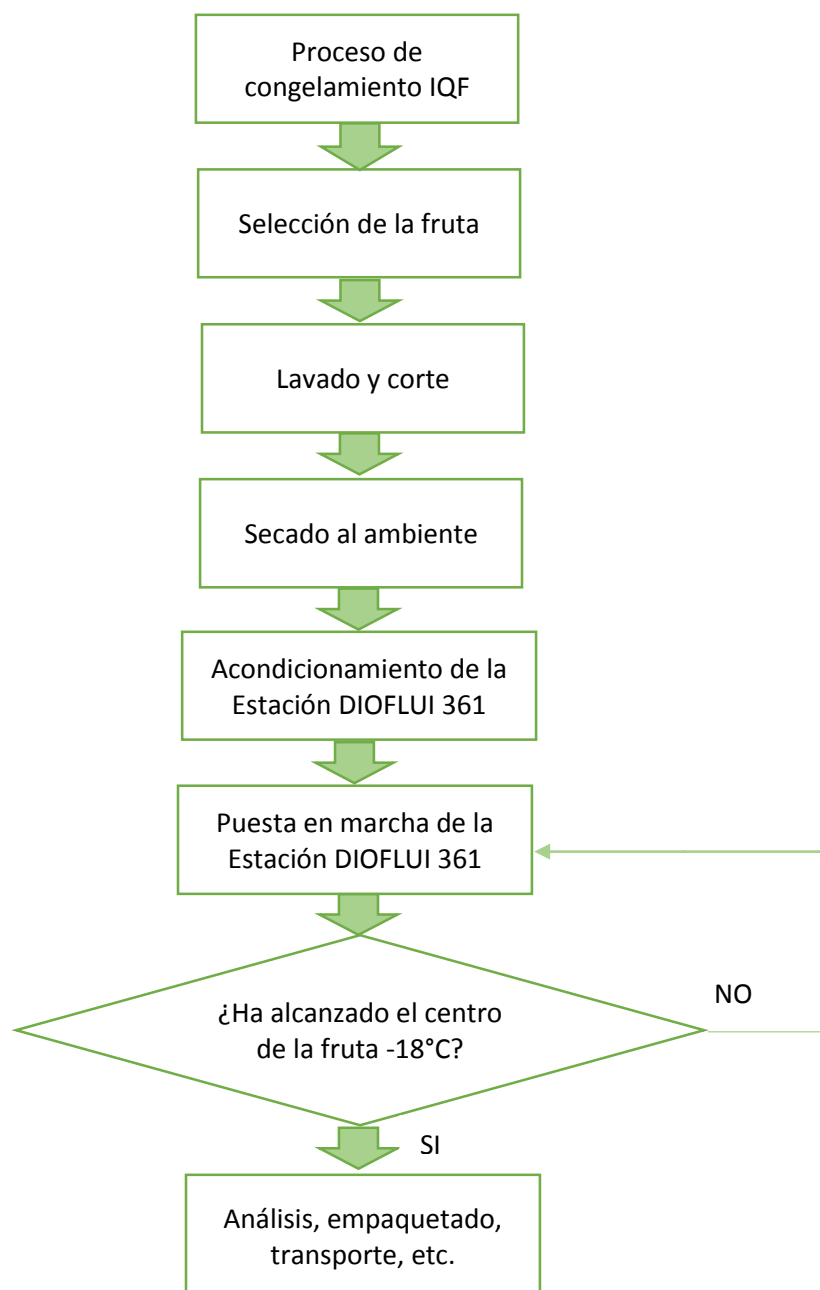
- **Recolección;** en este proceso se procura que todas las frutas tengan las mismas características geométricas y el mismo volumen con el fin de que el proceso de congelamiento se cumpla de manera uniforme en todo el lote de frutas.
- **Selección;** aquí se seleccionan frutas con buena apariencia exterior y en caso de observar frutas en mal estado o podridas estas se desechan al ser posibles focos de bacterias.
- **Lavado y corte;** en esta etapa se eliminan manualmente cualquier resto de partículas ajenas a la fruta como polvo, hojas, etc. También se realiza el corte del cáliz y el lavado se realiza con agua potable.

- Secado al ambiente; aquí se deja escurrir el exceso de agua de las frutas y se deja reposar sobre un tamizador.
- Acondicionamiento de la estación DIOFLUI-361; se sigue el procedimiento de puesta en marcha de la estación se colocan los lotes de frutas en bandejas y se espera hasta cuando el centro de la fruta haya alcanzado -18°C .

Una vez cumplido este proceso se retira la fruta del interior de la estación DIOFLUI-361 y según amerite el caso se continúa con el empacado, pre-transporte, transporte o bien la misma será objeto de algún estudio o análisis dentro del laboratorio. En la Figura 14 se ilustra un diagrama de flujo para el proceso de congelamiento rápido de fragaria x ananassa en la estación DIOFLUI-361.

Figura 14

Diagrama de flujo para congelamiento IQF de fragaria en la estación DIOFLUI-361



3.3. Análisis y predicción del tiempo de congelación de la fragaria en el túnel DIOFLUI-361

Para predecir el tiempo de congelación rápida, es decir el tiempo que toma en alcanzar -18°C el centro de la fragaria, se han tomado en cuenta las características físico-químicas tanto del fluido que extrae el calor de la fruta, que en el caso del túnel DIOFLUI-361 es el aire, así como también las de la fragaria.

Este proceso de congelación se describe como una transferencia de calor dependiente del tiempo, en donde al alterar la temperatura superficial de la fruta ocurre lo mismo en todos los puntos, hasta llegar a una distribución de temperaturas de estado estable. (Incropera & De Witt, 1999)

Pese a que la fragaria físicamente se asemeja a un cono, se la modelará como un cilindro corto, en el cual se tendrá conducción transitoria bidimensional y se aplicará el método de los efectos multidimensionales en solidos finitos. (Lucas Hidalgo, 2016)

Primero se calculará el coeficiente de transferencia de calor por convección, gracias a la siguiente ecuación:

$$h = \overline{Nu_D} \frac{k}{D}$$

Ecuación 1

Coficiente de transferencia de calor por convección

Donde:

- $\overline{Nu_D}$ = número de Nusselt promedio
- k = conductividad térmica
- D = dimensión lineal característica

Se modela el sistema como intercambiador de flujo cruzado, comúnmente utilizados en sistemas de refrigeración, lo cual significa que se produce un intercambio

térmico desde una corriente de aire a otra. (Bombas GRUNDFOS, s.f.) Para esto se consideran los siguientes datos:

- Temperatura inicial de la fragaria: 20°C
- Temperatura aproximada del aire dentro del túnel: -22°C
- Velocidad aproximada del aire: 2 m/s
- Longitud de la fragaria: 45mm
- Diámetro de la fragaria: 30mm

Otro parámetro a tomar en cuenta es conocido como temperatura de película (T_f) el cual indica una aproximación a la temperatura de un fluido dentro de una capa límite de convección. (Incropera & De Witt, 1999)

Se calcula de la siguiente manera:

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} = \frac{293 + 251 \text{ }^\circ\text{K}}{2}$$

Ecuación 2

Temperatura de película

Donde:

- T_f = temperatura de película
- T_w = temperatura en la superficie de la capa límite
- T_∞ = temperatura de flujo libre

Una vez que se determina la temperatura de película, la cual se expresa en grados Kelvin, se recurre a la Tabla Termodinámica A.4 de Incropera del Anexo A y gracias a una interpolación lineal se obtienen los siguientes valores:

Tabla 6*Propiedades termo físicas del aire*

PROPIEDADES A 272 °K	VALOR
Viscosidad cinemática, $\nu \cdot 10^6$, (m ² /s)	13.4
Conductividad térmica, $k \cdot 10^3$, (W/m*k)	24.02
Prandtl, Pr	0.714

Nota. Adaptado de Tabla A.4 Propiedades de gases a presión atmosférica, Incropera & De Witt, 1999, Fundamentos de Transferencia de Calor, Cuarta Edición, pág 839.

Con los valores obtenidos en la Tabla 6, se calcula el número de Reynolds. Este número es un coeficiente adimensional que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas de una condición de flujo e indica cuando un flujo es laminar o turbulento. (Connor, Thermal Engineering, 2020)

$$Re_D = \frac{V D}{\nu}$$

Ecuación 3*Número de Reynolds*

Donde:

- Re_D =número de Reynolds
- V =velocidad del flujo
- D =dimensión lineal característica
- ν =viscosidad cinemática

$$Re_D = \frac{2m/s * 0.03m}{13.4 * 10^{-6} m^2/s} = 4477.61$$

Para aplicar los criterios de correlación de transferencia térmica por convección externa en un cilindro finito es necesario que se cumpla la condición $Re_D * Pr > 0.2$. (Lucas Hidalgo, 2016)

$$ReD * Pr > 0.2$$

$$4477.61 * 0.714 > 0.2$$

$$3197.01 > 0.2$$

Ecuación 4

Condición para aplicar correlaciones de transferencia térmica por convección externa

Cumplida esta condición se evalúa el número de Nusselt promedio, el cual es una relación entre la transferencia de calor convectiva y la transferencia de calor conductiva, también representa que tan buena es la transferencia de calor a través de una capa fluidizada resultante de la convección. (Connor, Thermal Engineering, 2019)

Para eso se hará uso de la siguiente ecuación:

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$\overline{Nu_D} = 34.82$$

Ecuación 5

Correlación de Churchill y Bernstein

Para aplicar la Ecuación 4 las propiedades se evalúan a temperatura de película 272°K.

Empleando la Ecuación 1, se obtiene:

$$h = 34.82 \frac{24.02 * 10^{-3} W/m * k}{0.03m}$$

$$h = 27.55 W/m^2 * k$$

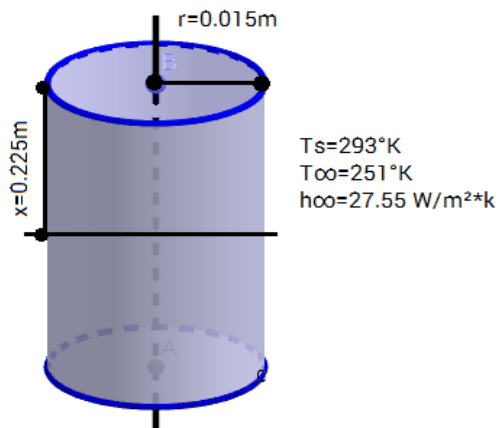
Ecuación 6

Coefficiente de transferencia de calor por convección calculado

Para el método de Efectos Multidimensionales en sólidos finitos, se dice que tanto el diámetro como la longitud son comparables, lo que hace que la distribución térmica dependa de estos dos factores. (Lucas Hidalgo, 2016) En la Figura 15 se ilustra el modelamiento físico de la fragaria.

Figura 15

Modelamiento de la fragaria como un cilindro corto con conducción transitoria bidimensional



Para los siguientes pasos se considerarán propiedades constantes y conducción bidimensional tanto en r como en x . (Incropera & De Witt, 1999)

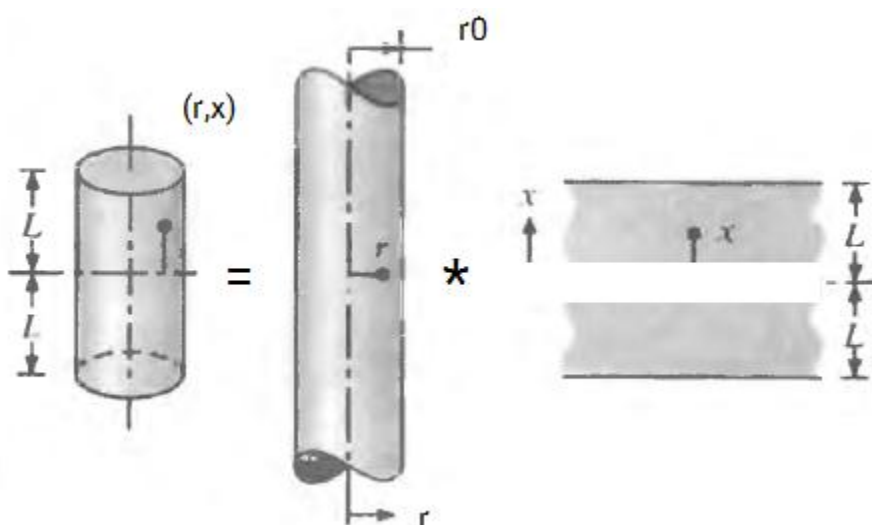
A continuación en la Tabla 7 se muestran algunas propiedades físico-químicas de las fragarias útiles para la determinación de su tiempo de congelación.

Tabla 7*Propiedades de la fragaria*

Propiedades a 300°K	Valor
Densidad, ρ , (kg/m ³)	963
Calor específico, C_p , (J/kg°k)	3626
Conductividad térmica, k , (W/m*K)	0.51
Difusividad térmica, α , (m ² /s)	$1,47 \cdot 10^{-7}$

Nota. Tomado de Valores de conductividad térmica en pulpa de frutas establecidos en base a datos experimentales y mediante ecuaciones, de Universidad Técnica de Ambato, 1999, Alimentos, Ciencia e Ingeniería.

La temperatura en cualquier punto de la fragaria obedece al producto de las soluciones unidimensionales como se ilustra en la Figura 16, las mismas que corresponden a una pared plana de longitud $2L$ y a un cilindro infinito de radio r_0 .

Figura 16*Conducción transitoria bidimensional para un cilindro corto*

Nota. Tomado de Forma de la solución por producto de las soluciones, de Incropera & De Witt, 1999, Fundamentos de Transferencia de Calor, pág. 243.

La solución para lo ilustrado en la Figura 16 se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{T(r, x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \Big|_{\text{pared plana}} * \frac{T(r, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \Big|_{\text{cilindro infinito}}$$

Ecuación 7

Solución para sistemas bidimensionales expresado como producto de resultados unidimensionales

Ahora se procede con el cálculo de la temperatura en la pared plana, para lo que es necesario determinar el número de Biot. (Lucas Hidalgo, 2016)

$$Bi^{-1} = \frac{k}{hL} = \frac{0.51 \text{ W/m} * k}{27.55 \text{ W/m}^2 * 0.0225 \text{ m}} = 0.82$$

Ecuación 8

Número de Biot para la pared plana

El número de Biot relaciona la resistencia térmica interior de un sólido respecto a la resistencia térmica de la capa superficial o capa límite. (Incropera & De Witt, 1999, pág. 320)

Ahora, se necesita conocer la relación de conducción de calor versus la rapidez de almacenamiento de calor en un sólido, para esto se tiene el número de Fourier. (Incropera & De Witt, 1999, pág. 320)

$$Fo(t) = \frac{\alpha t}{L^2} = \frac{1.47 * 10^{-7} * t}{(0.0225)^2}$$

Ecuación 9

Número de Fourier para la pared plana

A continuación, en la Tabla 8, se muestran valores de $Fo(t)$ evaluados en la Ecuación 9 para distintos tiempos:

Tabla 8

Valores de $Fo(t)$ para la pared plana

Tiempo	$Fo(t)$
$t_{5\text{min}}$	0.087
$t_{10\text{min}}$	0.174
$t_{15\text{min}}$	0.261
$t_{20\text{min}}$	0.384

Nota. Esta tabla muestra valores adimensionales de $Fo(t)$ para la pared plana evaluando tiempos desde los 5 hasta los 20 minutos.

Para determinar la temperatura en el plano medio, es decir en $x=0$, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_0^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n * \exp(-\xi_n^2 * Fo)$$

Ecuación 10

Temperatura en el plano medio

Donde:

- Q_0^* = temperatura en el plano medio
- C_n = coeficiente de aproximación para las soluciones de la conducción transitoria unidimensional
- ξ_n = valor propio de aproximación para las soluciones de la conducción transitoria unidimensional y se expresa en radianes

De la tabla del Anexo B, en donde se muestran los primeros coeficientes y valores propios de aproximación para las soluciones de la conducción transitoria unidimensional. Por facilidad solo se toman las primeras raíces.

Para $Bi=1.21$ se interpola entre 1.0 y 2.0 y se obtienen las siguientes raíces:

Tabla 9

Coefficients para la solución de conducción transitoria unidimensional para la pared plana

Biot	Cn	ξ
1.0	1.12	0.86
1.21	1.13	0.90
2.0	1.18	1.07

Nota. Primeras raíces para la solución de conducción transitoria unidimensional con $Bi=1.21$.

Utilizando la Ecuación 9 con los distintos valores de $Fo(t)$ se obtiene:

$$Q_0^* = 1.13 * \exp(-0.90^2 * Fo(t))$$

Ecuación 11

Obtención de temperatura en pared plana con distintos $Fo(t)$

Los valores resultantes se ubican a continuación:

Tabla 10

Temperatura en el centro de la pared plana

$Q_0^*(t)$	Valor
$Q_0^*(5min)$	1.05
$Q_0^*(10min)$	0.98
$Q_0^*(15min)$	0.91
$Q_0^*(20min)$	0.83

Nota. La temperatura obtenida tiene un valor adimensional

Para el cilindro infinito se procede de la misma manera, empezando por calcular el número de Biot.

$$Bi^{-1} = \frac{k}{hL} = \frac{0.51 \text{ W/m} * k}{27.55 \text{ W/m}^2 * 0.015\text{m}} = 1.23$$

Ecuación 12

Número de Biot para el cilindro infinito

A continuación el número de Fourier y en la Tabla 7 se listan los valores para distintos tiempos:

$$Fo(t) = \frac{\alpha t}{L^2} = \frac{1.47 * 10^{-7} * t}{(0.015)^2}$$

Ecuación 13

Número de Fourier para el cilindro infinito

Tabla 11

Valores de Fo(t) para el cilindro infinito

Tiempo	Fo(t)
t _{5min}	0.196
t _{10min}	0.392
t _{15min}	0.588
t _{20min}	0.784

Nota. Esta tabla muestra valores adimensionales de Fo(t) para el cilindro infinito evaluando tiempos desde los 5 hasta los 20 minutos.

La ecuación de la solución aproximada para un cilindro infinito:

$$Q_{0=}^* \frac{Q_0}{Q_i} = C1 * \exp(-\xi_1^2 * Fo)$$

Ecuación 14

Temperatura en el cilindro infinito

Donde:

- Q_0 = temperatura en el cilindro infinito
- C_1 = primer coeficiente de aproximación para las soluciones de la conducción transitoria unidimensional para un cilindro infinito
- ξ_1 = primer valor propio de aproximación para las soluciones de la conducción transitoria unidimensional para un cilindro infinito y expresado en radianes

De manera análoga a la pared plana, se recurre a la Tabla del Anexo B para, por medio de una interpolación lineal, obtener los primeros coeficientes para la solución de conducción transitoria.

Para $Bi=0.81$ se interpola entre 0.8 y 0.9 y se obtienen las siguientes raíces:

Tabla 12

Coefficientes para la solución de conducción transitoria unidimensional para el cilindro infinito

Biot	C_1	ξ_1
0.8	1.1725	1.1490
0.81	1.1742	1.1546
0.9	1.1902	1.2048

Nota. Primeras raíces para la solución de conducción transitoria unidimensional con $Bi=0.81$.

Evaluando los distintos valores de $Fo(t)$ de la Tabla 11 en la Ecuación 14, se obtiene:

Tabla 13

Temperatura adimensional en el centro del cilindro infinito

$Q_0^*(t)$	Valor
$Q_0^*(5\text{min})$	0.90
$Q_0^*(10\text{min})$	0.69
$Q_0^*(15\text{min})$	0.53
$Q_0^*(20\text{min})$	0.41

Nota. Esta temperatura es adimensional

Como se describe en la Ecuación 7, la solución de temperatura en el centro de la fragaria se obtiene del producto de las soluciones de temperatura unidimensionales, de la pared plana y del cilindro infinito. (Lucas Hidalgo, 2016)

A continuación en la Tabla 14 se anotan los resultados de temperatura para cada tiempo:

Tabla 14

Producto de las temperaturas de la pared plana y el sólido infinito

Tiempo	$\frac{T(r, x, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty}$
$t_{5\text{min}}$	0.94
$t_{10\text{min}}$	0.67
$t_{15\text{min}}$	0.48
$t_{20\text{min}}$	0.34

Nota. Este producto de temperaturas es adimensional

Para obtener la temperatura de forma dimensional se hace uso de la siguiente ecuación:

$$T(r, x, t) = (T_{\infty} - T_i) + \frac{T(r, x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} (T_i - T_{\infty}) \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Ecuación 15

Ecuación para determinar la temperatura en cualquier punto

Donde:

- T_{∞} =temperatura de flujo libre
- T_i =temperatura inicial de la fruta

Una vez conocido esto se calcula la temperatura de forma dimensional para el centro de la fragaria y para cada tiempo, a continuación en la Tabla 15 las temperaturas para cada tiempo:

Tabla 15

Temperatura en el centro de la fragaria evaluada en cada tiempo

Tiempo	$T(0.015, 0.0225, t)$
$t_{5\text{min}}$	-2.52°C
$t_{10\text{min}}$	-13.86°C
$t_{15\text{min}}$	-21.84°C
$t_{20\text{min}}$	-27.72°C

Nota. De acuerdo a los datos descritos se evalúa que el tiempo necesario para alcanzar la congelación IQF de la fragaria se encuentra entre 10 y 15 minutos.

3.4. Implementación del registrador de temperatura

3.4.1 Selección de la instrumentación para el monitoreo de temperatura en alimentos.

Para seleccionar el sensor apropiado para medir la temperatura en el centro de la fragaria cuando esta alcance su temperatura de congelación rápida de -18°C , se tomarán en cuenta distintas características que determinen la idoneidad de su uso dentro de la estación DIOFLUI-361. Estas características se detallan a continuación en la Tabla 16 y en base a estas y a una escala de valoración analítica se seleccionará un instrumento.

Tabla 16

Tabla comparativa de sensores de temperatura disponibles en el mercado

Característica	Termocupla Tipo K	RTD PT100	Infrarrojo GY-906 MLX90614
Adaptable a la DIOFLUI-361	Si	Si	No
Rango	-0 a 1250°C	-50 a 200°C	-40 a 125°C
Precisión	$\pm 0.7^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Linealidad	Regular	Moderada	Muy buena
Ventajas	Autoalimentado Buena sensibilidad Robusto	Buena linealidad Repetibilidad	Precisión Bajo consumo de energía
.Desventajas	No es lineal	Requiere fuente de alimentación	Mide temperatura Superficial

Característica	Termocupla Tipo K	RTD PT100	Infrarrojo GY-906 MLX90614
Resolución	0.25°C	0.01°C	0.02°C
Voltaje de alimentación	---	12-24 VDC	3-5 VDC

Nota. Esta tabla fue hecha de acuerdo de los sensores disponibles en el mercado y sus principales características de trabajo. Más información en el ANEXO C

De acuerdo a la Tabla 16 se ha elegido la RTD PT100 por presentar mejores características que el resto de sensores disponibles en el mercado, a continuación en la Tabla 17 se detallan otras características concernientes al sensor elegido.

Tabla 17

Características del sensor FTARP08-PT100-BD3L100M1

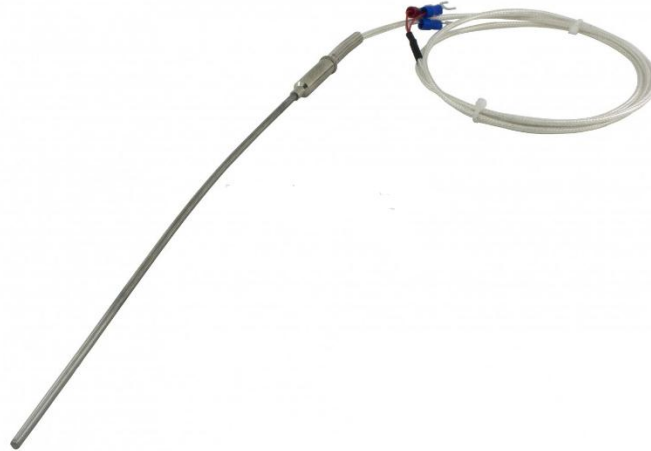
Característica	Atributo
Tipo:	PT100
Montaje:	Sonda
Sonda:	Ø3x100mm
Material de la sonda:	Acero inoxidable 321
Rango:	-50 a 200°C
Clase:	B
Longitud del cable:	1m
Material del cable:	Metal
Hilos:	3

Nota. La clase indica la tolerancia del sensor; para una PT100 de clase B se tiene una tolerancia de +/-0.3°C y +/- 0.12Ω a 0°C. Adaptado de FTARP08-PT100 series flexible probe RTD temperature sensors, de Yueqing Finglai Electric Co, 2019, <https://n9.cl/7r6vi>

En la Figura 17 se muestra el sensor RTD PT100 que será utilizado en la implementación del sistema de monitoreo de temperatura.

Figura 17

Sensor FTARP08-PT100-BD3L100M1



Nota. Tomado de FTARP08-PT100 series PT100 type flexible probe RTD temperature sensors, de Yueqing Finglai Electric Co., 2019, <https://n9.cl/7r6vi>

Cabe destacar que existen RTDs de 2,3 y 4 hilos de conexión y entre más hilos tenga mejor precisión tendrán las mediciones. En teoría se necesitaría una RTD de 2 hilos, pero hay que recordar que la medida de la temperatura con estos sensores se basan en el principio de cambio de resistencia por lo que los hilos conductores añaden resistencia lo cual provocaría mediciones imprecisas. Lo más común es que se utilicen RTDs de 3 hilos debido a que cuentan con un hilo conductor extra o redundante el cual es usado para medir cuanta resistencia crea el hilo en sí para luego restar esa misma resistencia y de esta manera solo se mide la resistencia de la RTD. Otra conexión y la mejor de las dos anteriores es la de una RTD de 4 hilos la cual aísla efectivamente la resistencia de la RTD de la resistencia de los hilos y se recomienda para aplicaciones donde la precisión es de suma importancia.

Con el fin de obtener una respuesta lineal y proporcional de salida frente a una entrada de temperatura se conectará el sensor RTD PT100 a un transmisor analógico,

el cual internamente posee: transductores, amplificadores, filtros, conversores que ayudan a mejorar esta característica. A continuación en la Tabla 18 las principales características de este instrumento y en la Figura 18 se observa su aspecto.

Tabla 18

Características del transmisor de temperatura RTD PT100 SBW

Característica	Atributo
Tipo:	Transmisor de temperatura PT100
Precisión:	+/-0.2% FS
Tensión de alimentación:	12 a 24 VDC
Rango de temperatura:	-50 a 150°C
Salida	4 a 20 mA
Tiempo de respuesta:	<1s
Corriente de alarma :	Daño de sensor/salida corto circuito 3.9mA o 22 mA
Material de la carcasa:	PBT

Nota. La precisión de este transmisor está determinada por un porcentaje de la salida a escala completa. Además este instrumento cuenta con dos tornillos uno para ajuste de cero y otro para ajuste de span. Adaptado de 4-20mA -50~150° Celsius RTD PT100 SBW Transmisor, de E-Goto Processors Store, 2020, <https://n9.cl/dz3bu>

Figura 18

Transmisor de temperatura RTD PT100 SBW



Nota. Tomado de 4-20mA -50~150° Celsius RTD PT100 SBW Transmisor, de E-Goto Processors Store, 2020, <https://n9.cl/dz3bu>

3.4.2 Selección de hardware y software para la adquisición de datos de temperatura.

Se pretende que el sistema cumpla algunas necesidades elementales como rapidez en la adquisición y procesamiento de los datos de temperatura, sea intuitivo en su operación y en caso de presentarse algún problema su solución sea rápida y fácil. Para que lo anteriormente mencionado se cumpla no es indispensable contar con recursos computacionales de alta gama. Tomando en cuenta esto se hará uso de software y hardware libre. En lo concerniente al hardware se utilizará un Arduino Nano que es una placa de desarrollo basada en un micro controlador por lo tanto tiene los recursos básicos de estos elementos como son: unidad central de procesamiento (CPU), memoria e interfaces de entrada y salida, entre otros más recursos. Esta placa se utilizará para leer los datos analógicos de corriente provenientes del transmisor electrónico por lo que solo será necesario utilizar un canal ADC de la misma y en un programa se escalarán estos valores de acuerdo a una ecuación definida por la entrada de temperatura y la salida en corriente. Las placas de desarrollo de la familia Arduino

cuentan con su propio entorno de desarrollo integrado de software libre y basado en el lenguaje de programación C++. A continuación en la Tabla 19 y en la Figura 19 respectivamente se muestran las características principales y el aspecto de un Arduino Nano.

Tabla 19

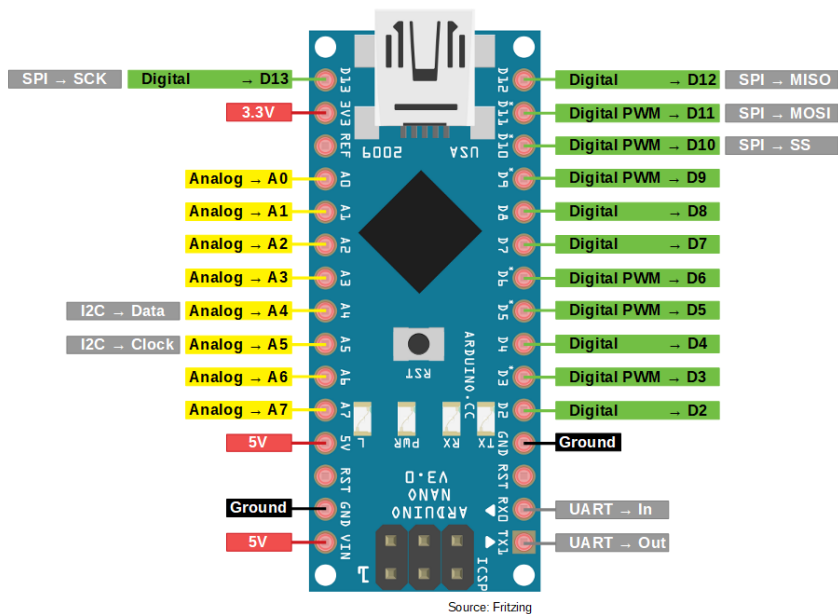
Características principales de un Arduino Nano

Característica	Atributo
Microcontrolador	ATMega328
Arquitectura	AVR
Voltaje de operación	5V
Memoria flash	32 KB/2KB para el arrancador
SRAM	2KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Entradas analógicas	8
EEPROM	1KB
Corriente DC por cada pin	40mA
Voltaje de alimentación	7-12V
Entradas/salidas digitales	22 (6 PWM)
Salidas PWM	6
Consumo	19 mA
Tamaño	18x45mm
Peso	7g

Nota. Tomado de Arduino Nano, de Arduino Store, 2021, <https://n9.cl/u69f>

Figura 19

Distribución de pines de un Arduino Nano



Nota. Tomado de Diversificando Arduino Nano, de Roboteach, 2021, <https://n9.cl/anjv>

Para procesar los datos y mostrarlos en una HMI se utilizará la computadora de placa única Raspberry Pi 3 B+ la cual funciona con varias distribuciones del sistema operativo GNU/Linux, también se considera como una placa de desarrollo de hardware libre y tiene las mismas funcionalidades de una computadora personal. A continuación en la Tabla 20 y en la Figura 20 se muestran más detalles, especificaciones técnicas y características de esta computadora de placa única.

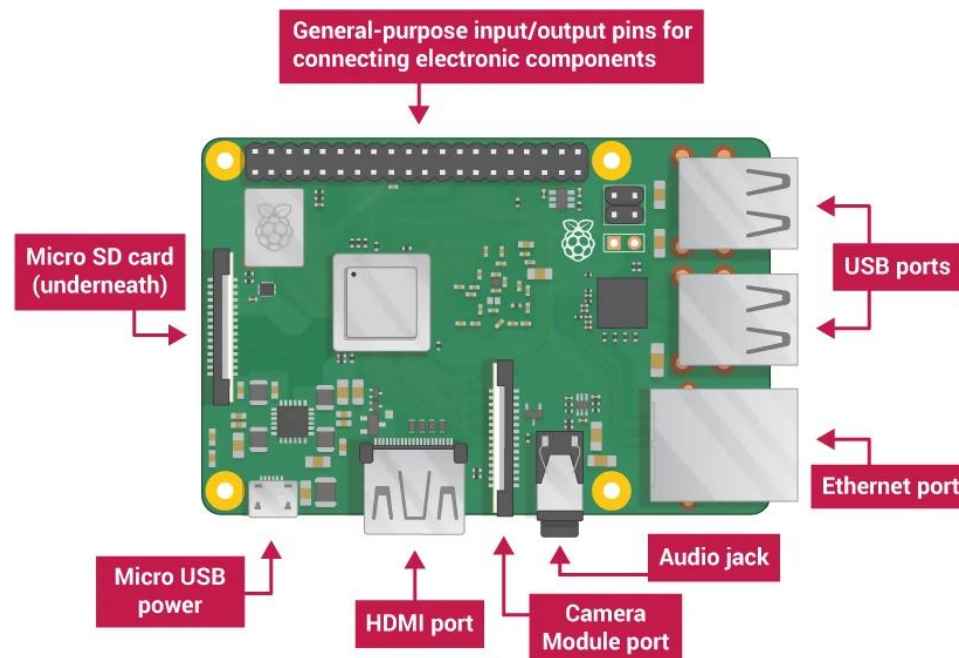
Tabla 20*Especificaciones Técnicas de la Raspberry Pi 3 B+*

Raspberry Pi 3 B+	
Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC
Frecuencia de reloj	1.4 GHz
GPU	VideoCore IV 400 MHz
Memoria	1GB LPDDR2 SDRAM
Conectividad inalámbrica	2.4GHz / 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac Bluetooth 4.2, BLE
Conectividad de red	Gigabit Ethernet over USB 2.0 (300 Mbps de máximo teórico)
Puertos	GPIO 40 pines HDMI 4 x USB 2.0 CSI (cámara Raspberry Pi) DSI (pantalla táctil) Toma auriculares / vídeo compuesto Micro SD Micro USB (alimentación) Power-over-Ethernet (PoE)

Nota. Reproducido de Raspberry Pi 3 Model B+, de Pastor, 2018, <https://n9.cl/9vrt>

Figura 20

Características de la Raspberry Pi 3 B+



Nota. Tomado de Raspberry Pi: mini-ordenador para proyectos educativos, de Posada Prieto, 2020, <https://n9.cl/1zt6r>

El software elegido para la programación del HMI es Python debido a que en los últimos años ha ganado protagonismo y popularidad entre los desarrolladores debido a sus cualidades de multiplataforma, escalabilidad y facilidad de uso e interpretación. La mayoría de grandes empresas en el mundo utilizan este lenguaje de programación para sus diversas aplicaciones. Entre las ventajas del uso de este lenguaje de programación están:

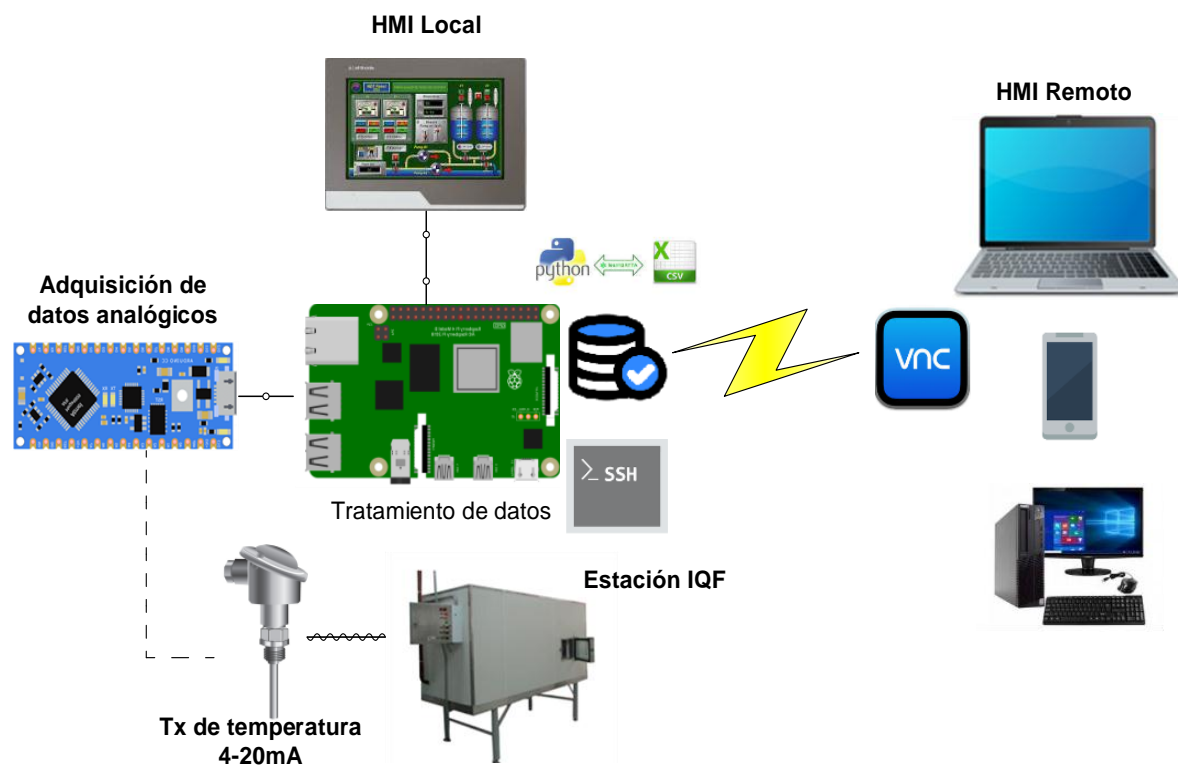
- Lenguaje de programación de alto nivel;
- Sencillo de aprender
- Limpio y legible;
- Licencia de código abierto. (Machado, 2020)

Con el fin de disponer de la información del HMI de manera remota en dispositivos, sin importar su sistema operativo, conectados a la red local del laboratorio

en donde se aloja la estación de congelamiento rápido se utilizará el protocolo SSH el cual permite ejecutar remotamente comandos para transmitir información entre computadoras. (Borges, 2019) Esto se realiza a través de un programa de software libre conocido como VNC (Virtual Network Computing) el cual permite visualizar las acciones que se ejecutan en un ordenador en otro, gracias a su arquitectura cliente-servidor. El esquema del sistema a implementar se ilustra de mejor manera en la Figura 21.

Figura 21

Esquema de implementación del sistema de temperatura

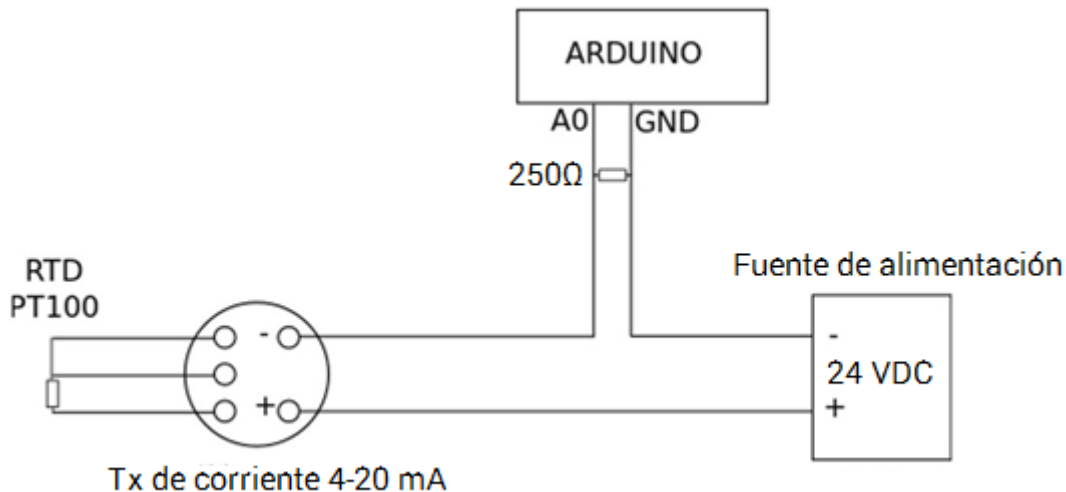


3.4.3 Implementación del circuito electrónico para la medición de temperatura.

Al contar con un transmisor que relaciona la entrada de temperatura con una salida proporcional de corriente estándar entre 4 y 20 mA, se dice que este es un transmisor de lazo. Una ventaja de tener un lazo de corriente en la medición de una variable de proceso es que la corriente en todo el lazo será la misma debido a que se cuenta con un circuito serie. Otra ventaja de tener un lazo de corriente es que la corriente es menos susceptible a las interferencias electromagnéticas causadas por cargas inductivas o ruido eléctrico. (PR Electronics, s.f.) Para alimentar el lazo de corriente se hace uso de una fuente de voltaje de 24V-120W. A continuación en la Figura 22 se ilustra la implementación del lazo de corriente de 4-20 mA.

Figura 22

Lazo de corriente de 4 a 20mA



Nota. Dado que el ADC de la tarjeta Arduino sólo lee valores analógicos de voltaje se ha puesto una resistencia de 250Ω en paralelo a la entrada de esta, así se podrá obtener valores entre 1 y 5V.

Otro aspecto a tomar en cuenta es la calibración del sensor de temperatura, entendiéndose por calibración la comparación de un valor obtenido con el de un

instrumento patrón. Como ya se sabe el sensor PT100 tiene una respuesta de resistencia eléctrica que corresponde a una temperatura aplicada al mismo. Es importante conocer como relacionar esa resistencia con la temperatura para de esta manera determinar qué tan calibrado está el sensor. En este caso el uso de una tabla es imprescindible. Para calibrar sondas de temperatura industriales y de manera profesional lo recomendable es utilizar un pozo de metrología el cual dependiendo del tipo de sonda RTD o termopar convierte los valores de resistencia o voltaje y los transforma a valores de grados Celsius según lo dictado por la Norma IEC 60751 del Comité Electrotécnico Internacional, 2008. Antes de calibrar la RTD es importante tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Preparar el sensor, inspeccionar visualmente que la sonda se encuentre en buen estado sin corrosión de igual manera los hilos;
- Contar con una fuente y un sensor de temperatura de referencia;
- Medir la señal de salida del sensor y compararla con los datos de referencia proporcionados por algún estándar o norma internacional, esto en caso de que la salida sea una variable eléctrica;
- Determinar la profundidad de inmersión de la sonda;
- Estabilizar el sensor, es decir permitir que todas las partes en contacto del sensor tomen una distribución de temperatura uniforme;
- Determinar puntos de calibración, usualmente se eligen entre 3 y 5 puntos.
- Realizar ajuste o compensación, normalmente un sensor en sí no puede ser ajustado, por lo que la solución está en realizar algún tipo de compensación en base a algún coeficiente, cuando este se conecte a un transmisor o mediante algún algoritmo en el controlador. (Laurila, 2020)

Para el caso de la sonda de temperatura FTARP08-PT100-BD3L100M1 se la

calibrará utilizando 4 puntos de referencia conocidos como son: la temperatura de congelación del agua, la temperatura de ebullición del agua, la temperatura ambiente al momento de la calibración y la temperatura de congelación IQF recomendada para la fragaria y se determinará si las mediciones están dentro de la tolerancia especificada para este sensor. Para el caso de la temperatura de ebullición del agua se considerará la altura en msnm. Para calibrar la PT100 se utilizó como instrumento patrón un termómetro digital electrónico de la marca Hanna Instruments, modelo HI98501 utilizado en el laboratorio de la FCIAB, cuya sonda de temperatura tiene características muy similares a la sonda de la PT100. Para medir la resistencia eléctrica se utilizará un ohmómetro digital. A continuación en la Tabla 21 se detallan algunas especificaciones técnicas y en la Figura 23 se muestra el medidor de temperatura de referencia.

Tabla 21

Especificaciones del medidor de temperatura HI98501

Checktemp HI98501 Hanna Instruments	
Rango	-50 a 150°C
Resolución	0.1°C
Precisión	+/-0.2 °C
Sonda	Acero inoxidable
Batería	CR2032
Condiciones ambientales	-30 a 50° C, IP65
Dimensiones	50x185x21 mm
Peso	50g

Nota. Este medidor es calibrado cada año en un laboratorio y tiene certificación EN 13485:2001 recomendado para la industria alimentaria y farmacéutica. Tomado de Ficha técnica del producto Checktemp HI98501, de Hanna Instruments.

Figura 23*CHecktemp HI98501*

A continuación en la Tabla 22 se muestran los resultados de esta calibración, tomando como referencia los valores de la tabla del Anexo D.

Tabla 22*Resultados de la calibración del sensor FTARP08-PT100-BD3L100M1*

Temperatura	Valor de	Temperatura	Resistencia	Error
HI98501	resistencia	correspondiente	correspondiente	relativo
	medido	a la tabla del	a la tabla del	
		Anexo D	Anexo D	
-18°C	93 Ω	-18°C	92.92 Ω	0.08%
0°C	100 Ω	0°C	100 Ω	0%
21°C	108 Ω	21°C	107.79Ω	0.19%
91°C	134.9 Ω	91°C	135.08 Ω	0.13%

Nota. Se comprueba que la tolerancia del sensor de temperatura está dentro de los límites establecidos en las especificaciones del fabricante.

Hay que destacar que con el método de calibración utilizado, pese a que se obtuvieron resultados aceptables, carece de trazabilidad. El instrumento patrón debe

tener mejor precisión que el instrumento a calibrar, aun así debido a que el instrumento patrón también tiene su porcentaje de error al igual que el ohmetro digital, también se añaden otras fuentes de error por lo cual es imposible conocer el valor real de las mediciones, esto se conoce como incertidumbre.

3.4.4 *Lectura de datos de temperatura y diseño del HMI en Python*

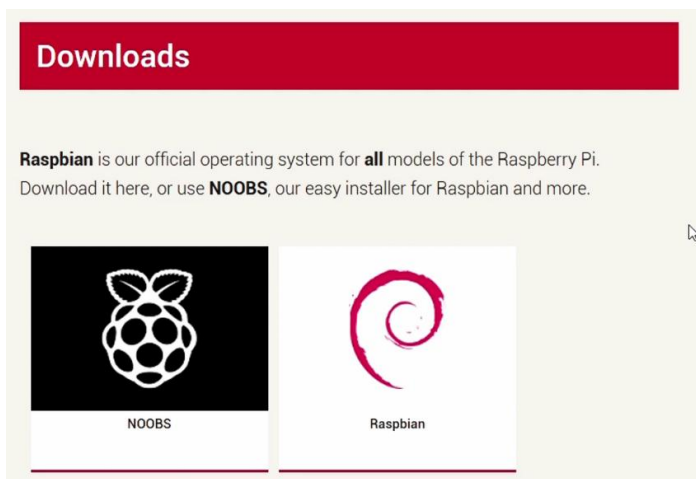
- **Configuración inicial Raspberry Pi**

Para arrancar por primera vez una Raspberry Pi es necesario seguir algunos pasos de configuración inicial, también además de contar con dicha computadora se necesitan otros elementos como una tarjeta de memoria micro SD en donde se alojará el sistema operativo y funcionará como disco duro, se recomienda una de capacidad entre 8 y 32 GB y lo suficientemente rápida para el buen funcionamiento de la Raspberry Pi, además se necesita una fuente de voltaje de 5V y 2A como mínimo de suministro de corriente, adicional a esto se necesita de un monitor, teclado y un mouse. A continuación se detalla el procedimiento para configurar la Raspberry Pi descargando el sistema operativo a través de Windows.

Una vez con todo listo, el primer paso es dirigirse a la página oficial de Raspberry Pi (www.raspberrypi.org) y a continuación a la sección de descargas. Aquí encontraremos dos opciones NOOBS que funciona como un instalador intuitivo de sistemas operativos para Raspberry Pi y Raspbian que es la distribución oficial recomendada. En la Figura 24 se muestra lo mencionado anteriormente.

Figura 24

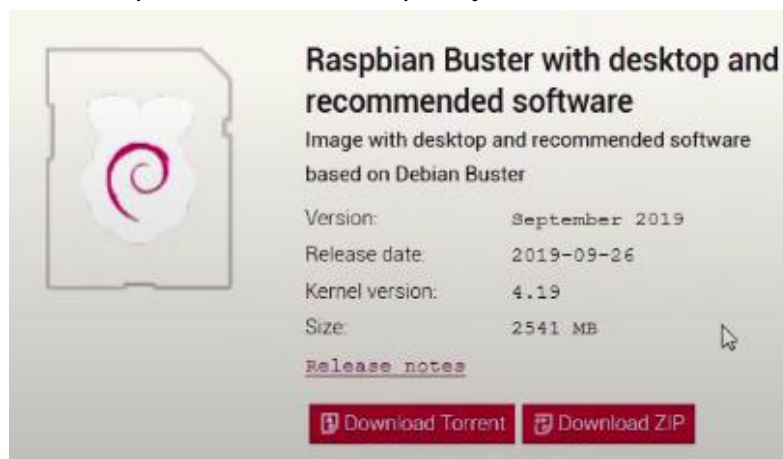
Descarga del sistema operativo Raspbian



Una vez que se hace clic en la opción del sistema operativo Raspbian se encuentran tres opciones, elegir la opción *Raspbian Buster with desktop and recommended software* ya que en esta opción por defecto se instalará software recomendado para su posterior utilización. En la Figura 25 se muestra la opción de imagen que se debe descargar.

Figura 25

Imagen recomendada para arrancar la Raspberry Pi



El próximo paso es escribir la imagen descargada en la tarjeta micro SD, para lo cual se necesita de un programa que realice esta función. Se ha descargado el

recomendado por la página web de Raspberry y este es *balenaEtcher*. Una vez descargado este programa se elige la imagen del directorio donde esta se encuentre y hacer clic en *Flash*, como se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Escritura de la imagen de Raspbian a través de balenaEtcher



Esta escritura tomará unos cuantos minutos, una vez que haya concluido se extrae la micro SD de la computadora Windows y se traslada a la Raspberry Pi, se conectan los periféricos, se conecta el cable HDMI a un monitor y se conecta la fuente de energía. El arranque y configuración inicial toma algunos minutos, pero una vez que haya concluido esto, ya en el escritorio de la Raspberry Pi, se procede con la configuración básica inicial, como idioma, zona horaria, conectividad, etc.

Debido a que se controlará también de manera remota la Raspberry Pi dentro de la configuración en la pestaña Interfaces se habilita el protocolo SSH y el modo VNC como se muestra a continuación en la Figura 27.

Figura 27

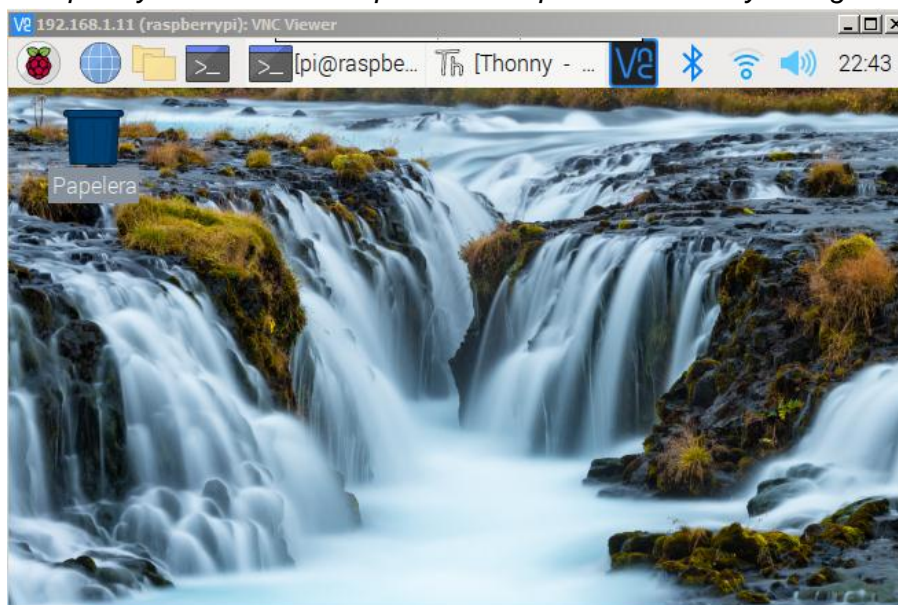
Activación del protocolo SSH y del VNC



Una vez configurado esto se podrá observar el escritorio de la Raspberry Pi como el que se muestra en la Figura 28.

Figura 28

Escritorio Raspberry Pi con sistema operativo Raspbian instalado y configurado



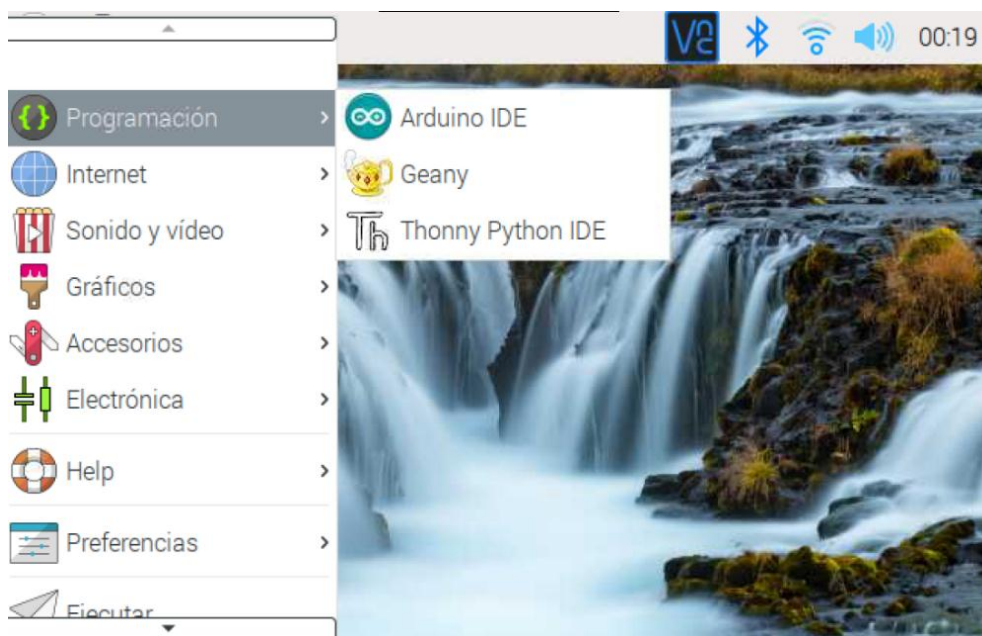
Una vez configurada la Raspberry se instala el IDE de Arduino, en donde se hará el escalamiento de la señal analógica proveniente del transmisor de temperatura. Para instalar el IDE de Arduino hay que dirigirse al terminal de Raspbian y escribir el siguiente comando:

```
sudo apt-get install arduino-core
```

Esta instalación toma varios minutos y cuando concluye se tendrá disponible el IDE de Arduino en la sección *Programming* como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Comprobación de la instalación del IDE de Arduino en Raspbian



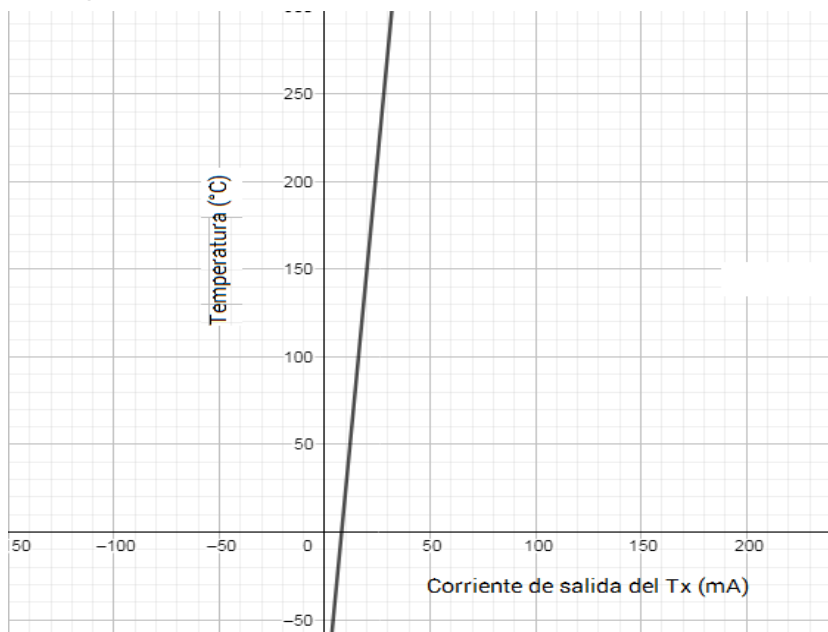
- **Programación tarjeta Arduino**

Una vez instaladas todas las herramientas necesarias en la Raspberry Pi, se procede con la programación de la tarjeta Arduino Nano. El programa consiste en recibir datos por puerto serie desde Python; estos datos recibidos corresponden a la temperatura límite, por lo que es necesario preparar el puerto serial. Una vez hecho esto se escala la señal analógica que viene desde el transmisor de temperatura, para

lograr esto es necesario ubicar en un plano cartesiano los valores de temperatura como variable dependiente y de corriente como variable independiente y relacionar estos valores como entrada y salida para así obtener la ecuación de escalamiento. En la Figura 30 se muestra la curva de escalamiento.

Figura 30

Curva de la temperatura en función de la corriente



De esta curva se define la Ecuación 15 para escalar los valores analógicos de corriente a temperatura.

$$temperatura = 12.5 * corriente - 100$$

Ecuación 16

Ecuación de la temperatura en función de la corriente

Una vez que se ha hecho esto esta ecuación aún no podría ser ingresada en la programación de la tarjeta Arduino, porque ya se mencionó que la misma no admite valores de corriente en su puerto de conversión analógica digital, por lo que al colocar una resistencia de 250Ω en paralelo a la entrada del puerto por Ley de Ohm se obtendrá entre 1 y 5V.

$$V = I * R$$

Ecuación 17

Ecuación de Ley de Ohm

Donde:

- V = voltaje
- I = corriente o intensidad
- R = resistencia eléctrica

Utilizando la Ecuación 16 se tiene para los dos límites:

$$V = 4mA * 250\Omega = 1V$$

Ecuación 18

Ecuación de Ley de Ohm para 4mA

$$V = 20mA * 250\Omega = 5V$$

Ecuación 19

Ecuación de Ley de Ohm para 20mA

Una vez obtenidos los valores de voltaje de entrada hacia la tarjeta Arduino, se conoce que la resolución del canal ADC es de 10 bits, es decir la señal analógica de voltaje toma 1024 datos diferentes entre 0 y 1023, por lo que es necesario realizar otro escalamiento para obtener el voltaje en función de la lectura de bits.

$$voltaje = \frac{5}{1023} * lectura$$

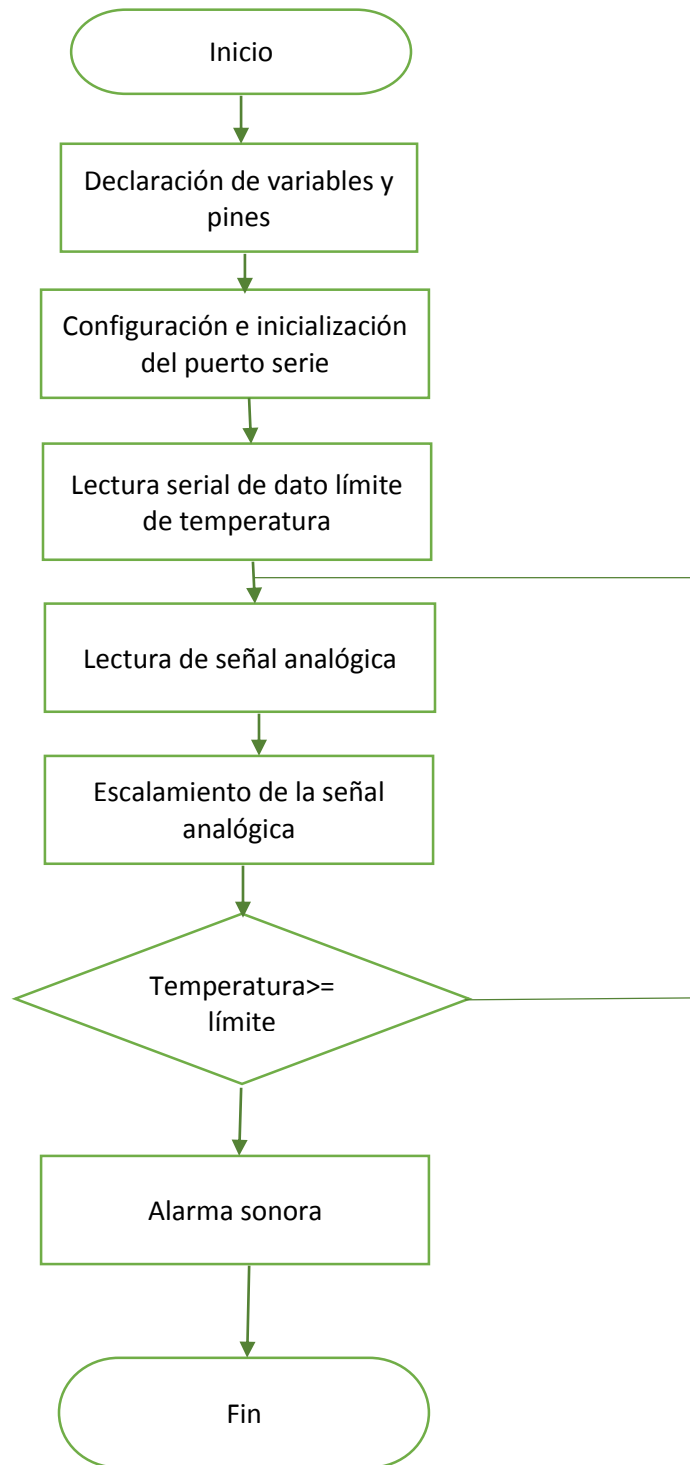
Ecuación 20

Ecuación del voltaje en función de la lectura de bits.

A continuación en la Figura 31 se ilustra un diagrama de flujo en donde se describe de mejor manera el programa realizado para el Arduino.

Figura 31

Diagrama de flujo del programa de Arduino



- **Programación de la interfaz humano máquina**

Una vez que se han escalado los valores de la señal analógica y convertidos a valores de temperatura estos datos deben ser registrados y mostrados en una HMI, la cual consta de una ventana principal donde el usuario establecerá el límite inferior de temperatura y la variedad a congelar. Continuará a otra ventana donde observará una gráfica de la tendencia de la temperatura hasta que esta llegue al límite establecido por el usuario, al final visualizará el tiempo de congelación y un mensaje el cual informe que el proceso de congelación rápida ha concluido. Estos datos serán exportados a un archivo de extensión .csv donde posteriormente podrán ser analizados si así se requiere. A continuación en la Figura 32 se muestra la conexión entre el Arduino y la Raspberry Pi por medio de un cable USB y en la Figura 33 se muestra el diagrama de flujo del tratamiento de los datos transmitidos de manera serial a través de la interfaz USB desde el Arduino hasta la Raspberry Pi.

Figura 32

Conexión entre una Raspberry Pi y un Arduino Vía USB

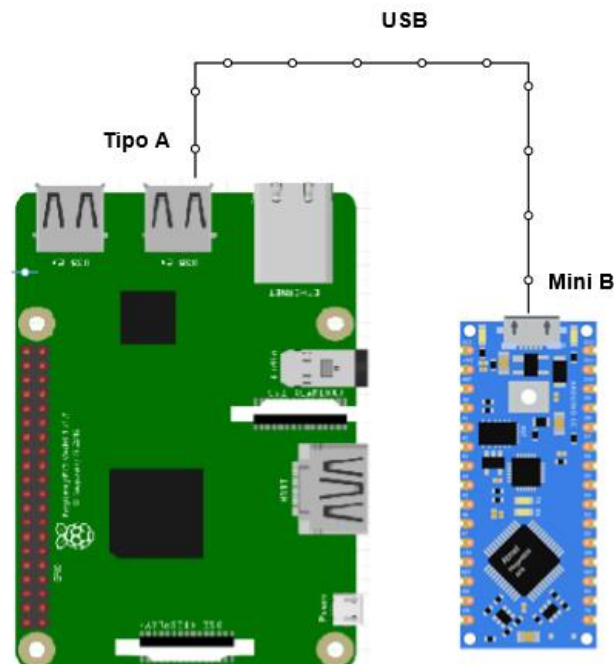
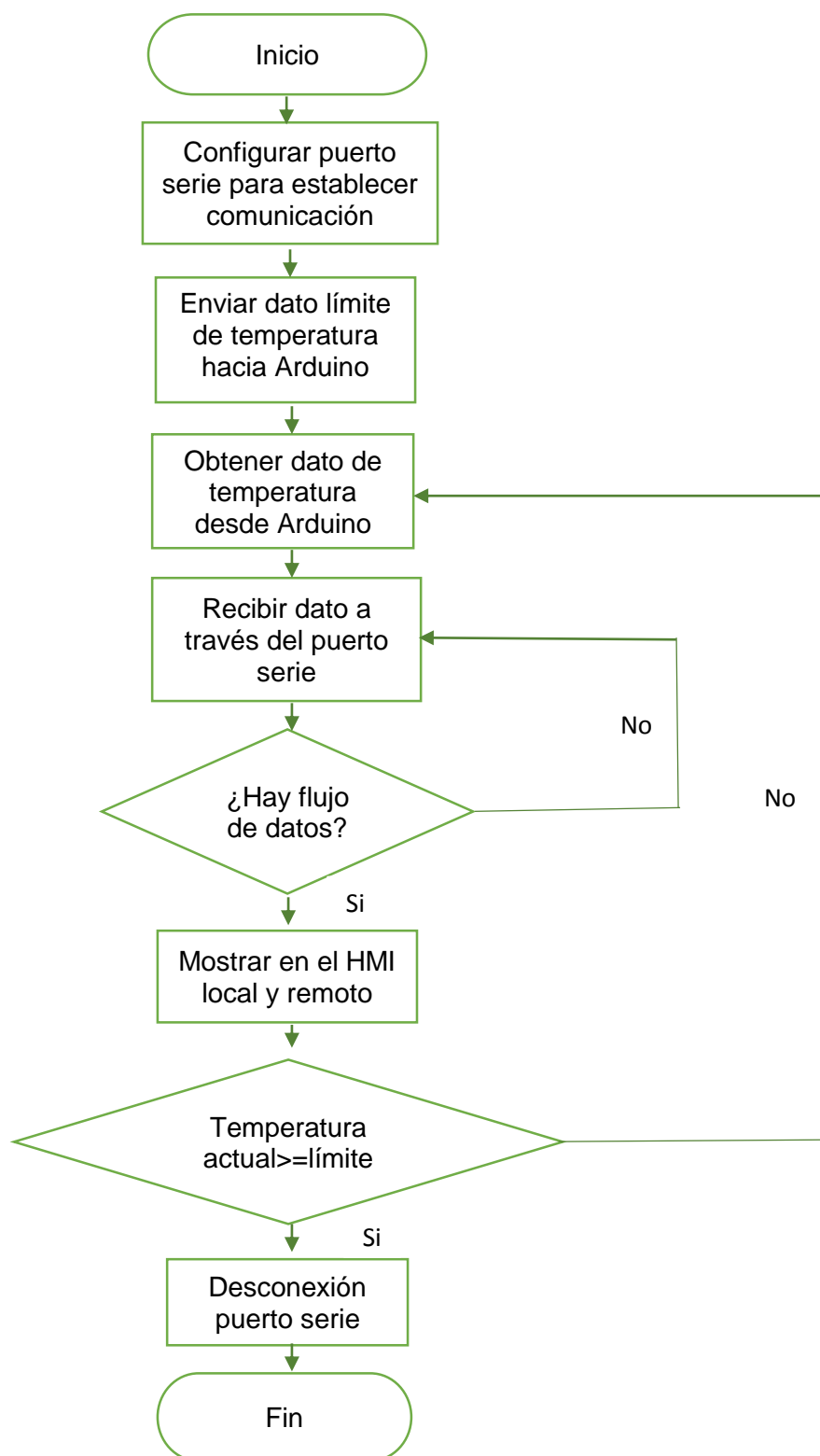


Figura 33

Diagrama de flujo del tratamiento de datos en la Raspberry Pi



Para la creación de la interfaz humano máquina se utilizará el lenguaje Python en donde, en una pantalla, se creará un instrumento virtual mismo que contiene una ventana, etiquetas, botones, indicadores y gráfica de datos en tiempo real. Para esto es necesario la descarga de algunos módulos como *numpy*, *matplotlib*, *collections*, *pandas* los cuales permiten un tratamiento más eficiente de los datos dentro de Python; el módulo *serial* utilizado para comunicación serial; el módulo *tkinter* para la creación de interfaces gráficas; *threading* para programar con hilos, donde se requiera la ejecución de varias tareas en un mismo proceso, como por ejemplo leer y graficar los datos.

El hardware de la HMI se compone de una pantalla TFT LCD de 5 pulgadas, la cual a diferencia de sus antecesoras tiene una mejor calidad de imagen, una resolución de pantalla de 800x480 y se conecta a la Raspberry Pi por medio de la interfaz HDMI categoría 1. En la Figura 34 se muestra la pantalla.

Figura 34

Pantalla HDMI 5 pulgadas 800x480

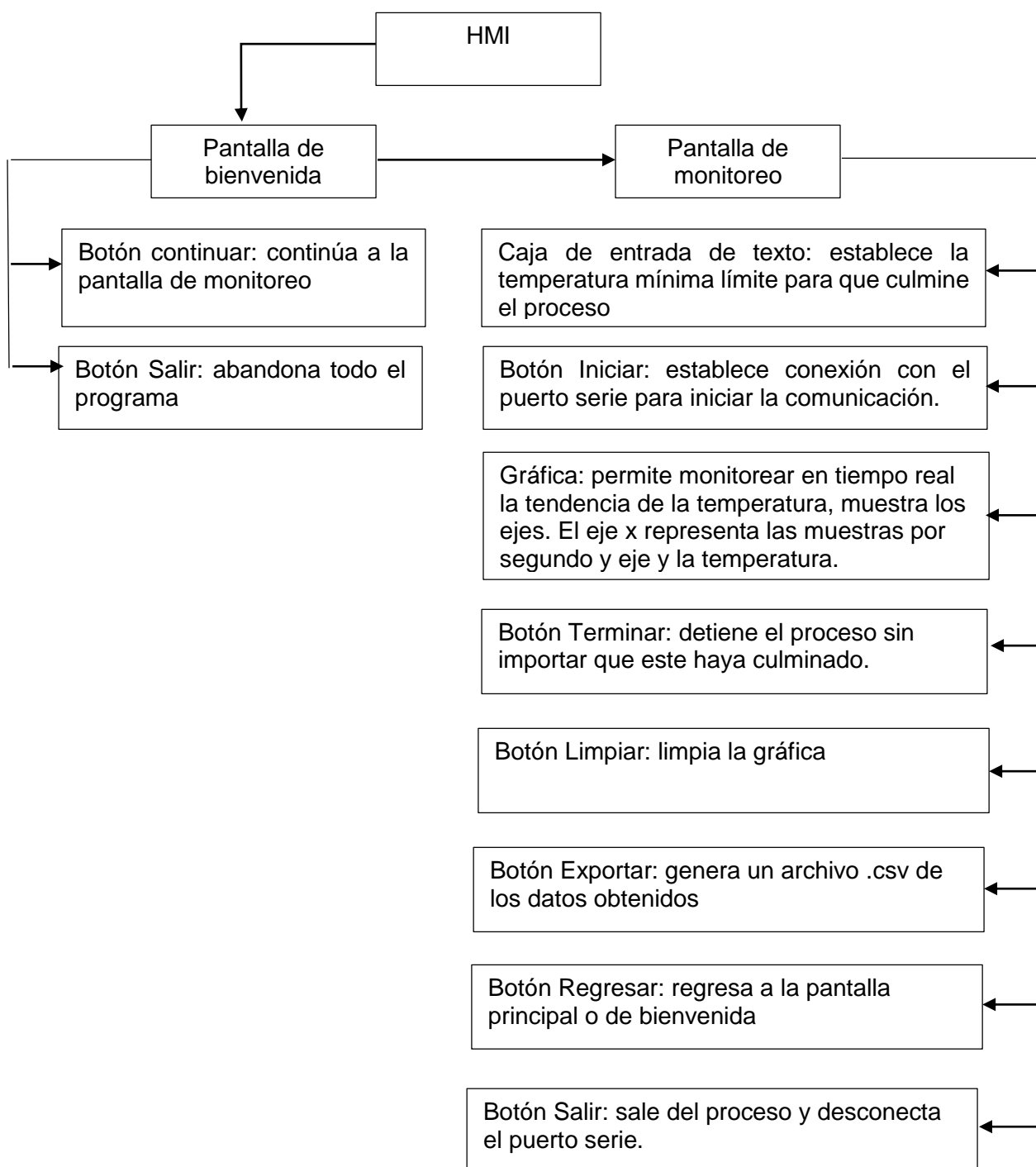


Para la programación de la interfaz de bienvenida se crea una ventana, a la cual se le añaden dos botones, uno que direccionará a la interfaz donde se encuentran datos

del proceso y otro que funciona para salir del programa. En una pestaña se añade información referente al proyecto. La siguiente pantalla consta de dos marcos en uno se ubica la gráfica donde se observará la tendencia de la temperatura y en otro se ubican botones para regresar a la pantalla anterior, para empezar a graficar los datos de temperatura en tiempo real, para limpiar la pantalla, para exportar los datos a un archivo .csv y otro para interrumpir el registro de los datos de temperatura, también cuenta con entradas de texto en donde se establecerá un dato numérico correspondiente al límite mínimo de temperatura para el cual el registro de datos se detendrá, esta información estará disponible en el reporte a generar, y en una caja de mensaje se podrá observar el tiempo en minutos y segundos en el cual se ha cumplido el proceso de congelación rápida. A continuación en la Figura 35 se muestra un diagrama funcional del HMI y se detalla la función de cada botón programado.

Figura 35

Diagrama funcional del HMI



En las Figuras 36 se muestra la pantalla principal programada en Python gracias al módulo Tkinter y en la Figura 37 se muestra la pantalla de monitoreo de temperatura.

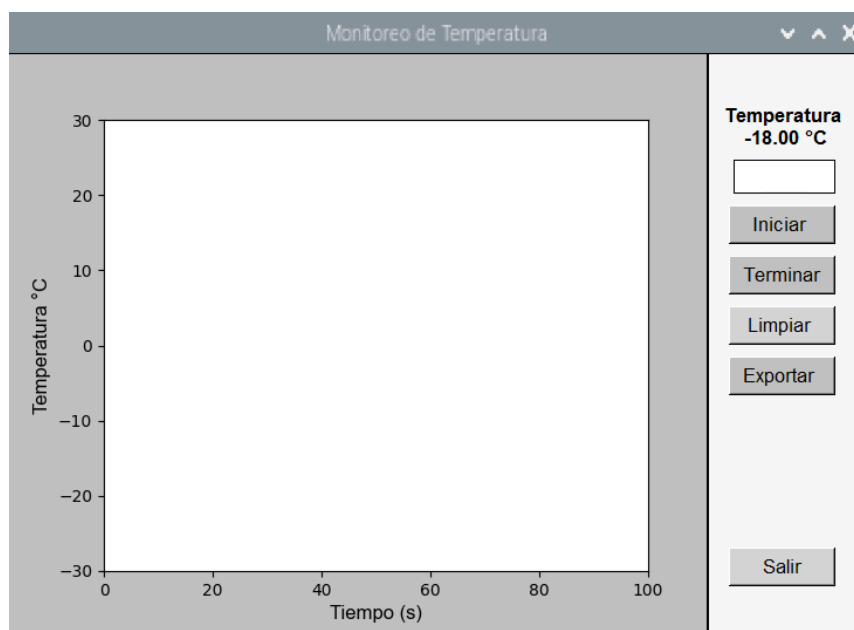
Figura 36

Pantalla de bienvenida al programa



Figura 37

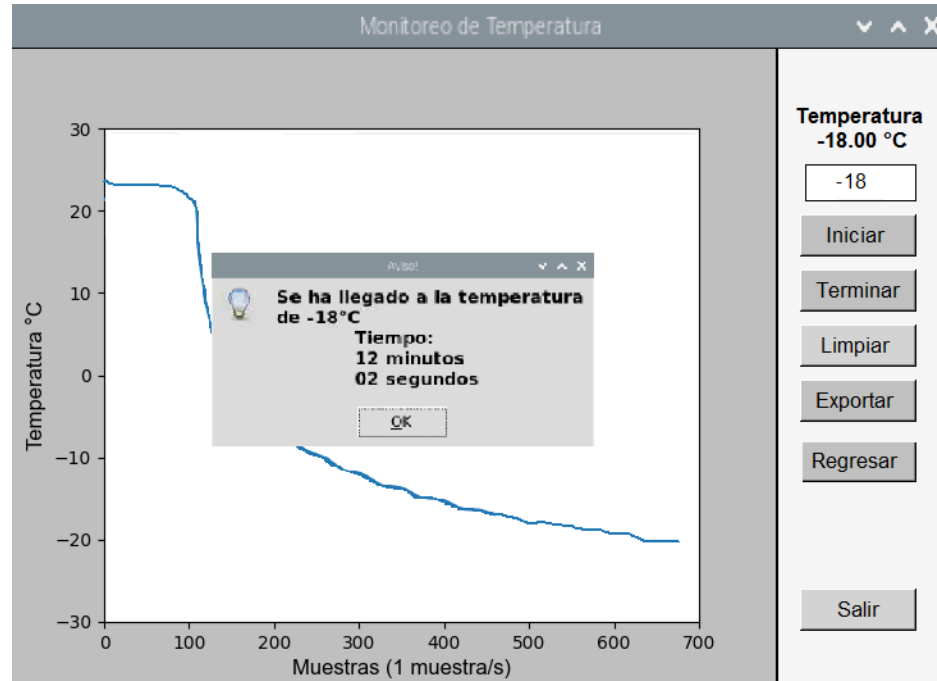
Pantalla de monitoreo de temperatura



El funcionamiento del sistema se observa en la Figura 38

Figura 38

Funcionamiento del sistema

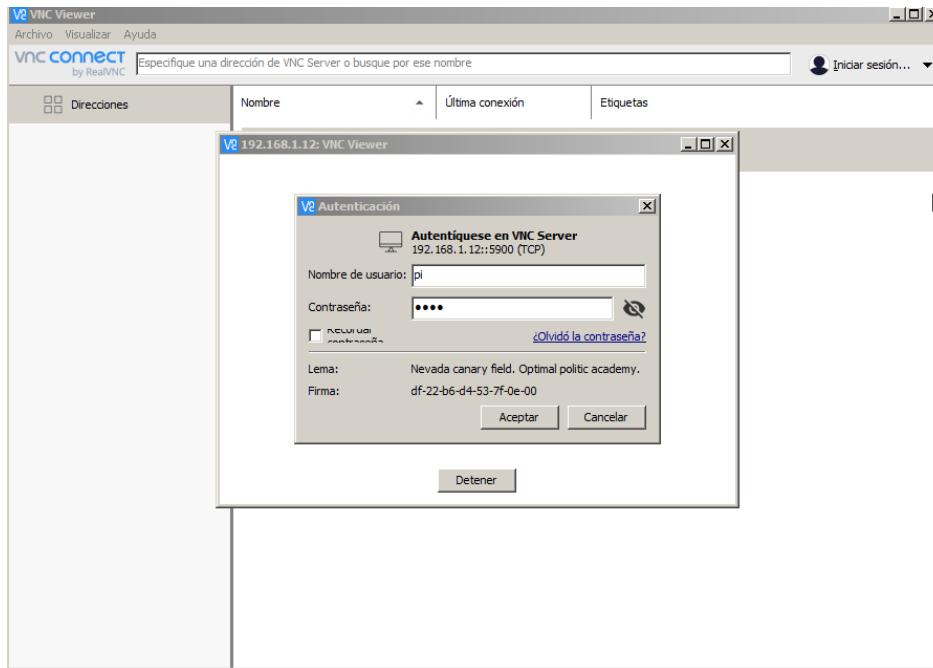


Nota. Se observa el cuadro de información cuando ya se ha alcanzado la temperatura establecida.

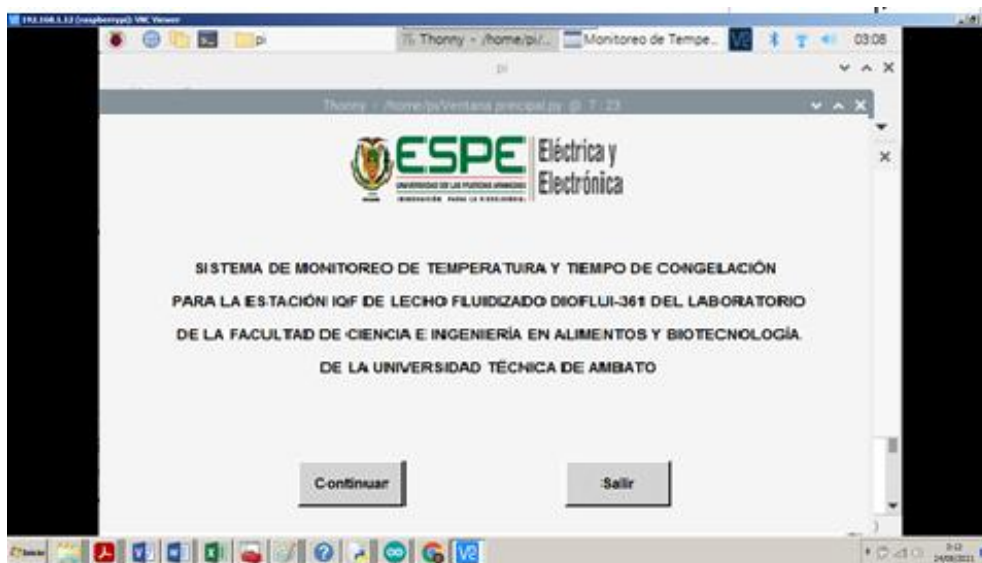
Para poder visualizar el HMI de manera remota es necesario instalar en el equipo remoto el programa VNC, que es software libre y multiplataforma, desde una PC con Windows hasta un dispositivo móvil con Android. Se conecta por el puerto 5900 el cual utiliza el protocolo de transmisión de información TCP. Una vez descargado esto se introduce la IP de la Raspberry y una contraseña, la cual está configurada y establecida desde que se arrancó por primera vez. En la Figura 39 se muestra la forma de conectarse por medio de VNC Viewer a la Raspberry Pi y en la Figura 40 se observa el escritorio Remoto desde Windows.

Figura 39

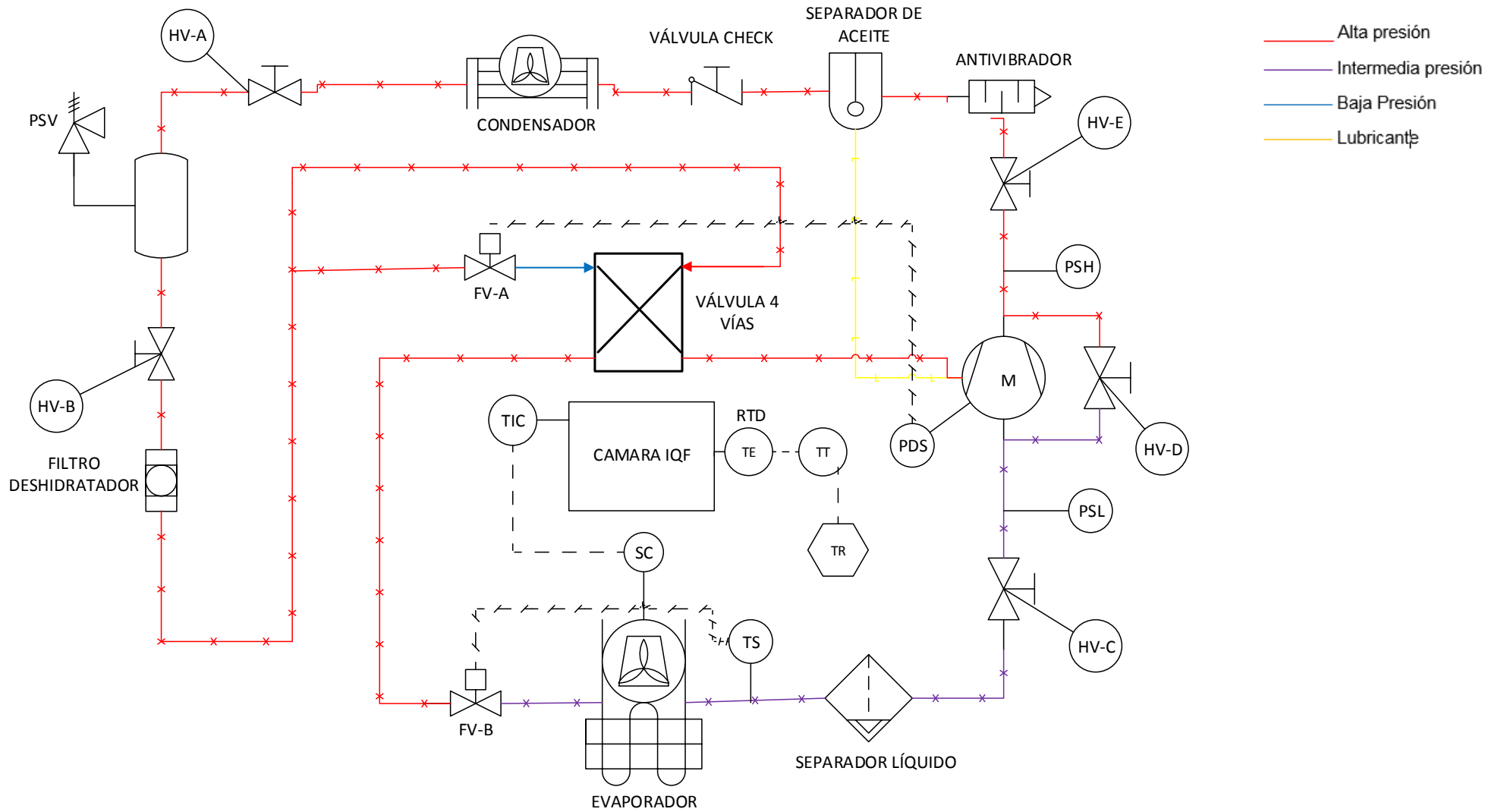
Conexión remota por medio de VNC Viewer en sistema operativo Windows

**Figura 40**

Escritorio de la Raspberry Pi visto remotamente



3.4.5 Diagrama P&ID de la estación DIOFLUI-361 con el sistema de monitoreo de temperatura implementado.



Para la estación IQF DIOFLUI-361, se ha realizado el diagrama de instrumentación y tuberías (P&ID), donde se ubica toda la instrumentación y elementos que conforman esta estación con su respectiva función, también se ha integrado ya el registrador de temperatura adjunto a la cámara IQF, se observa el elemento primario el transmisor y su registrador correspondiente, todo esto obedeciendo a la Norma ISA 5.1 establecida para el diseño y representación de instrumentos de medición y control dentro de un proceso por medio de símbolos e identificadores que describen la función y ubicación de cada elemento en el proceso e incluso como estos se interconectan. A continuación en la Tabla 23 se describen los elementos identificados en el diagrama P&ID.

Tabla 23

Descripción diagrama P&ID de la estación DIOFLUI-361

Identificación	Referencia
HV-A	Válvula de servicio
PSV	Válvula de alivio
HV-B	Válvula de servicio
FV-A	Electroválvula
TIC	Controlador de temperatura
SC	Variador de frecuencia
FV-B	Válvula de expansión
TS	Termostato
TE	RTD
TT	Transmisor de temperatura
TR	Registrador de temperatura
PDS	Presóstato diferencial de aceite

Identificación	Referencia
HV-C	Válvula de servicio
HV-D	By pass de arranque
HV-E	Válvula de servicio
PSH	Presóstato alta presión
PSL	Presóstato baja presión

Capítulo IV

4. Pruebas y análisis de resultados

En este capítulo los resultados son comprobados a partir de mediciones y visualización de la variable temperatura en el proceso de congelación rápida de la fragaria. Se experimenta con la variedad fragaria x ananassa, procurando que el lote de frutas a congelar tenga las mismas características físicas como las medidas estimadas en la predicción matemática de su tiempo de congelación, es decir 45mm de largo y 30mm de diámetro y una masa comprendida entre 12 y 15g. Este proceso se ha realizado en cinco ocasiones y los resultados se han contrastado con los resultados de la predicción matemática y mediante distribuciones estadísticas se ha validado su eficacia. Es preciso señalar que antes de realizar las experimentaciones en la estación IQF DIOFLUI-361, el sistema registrador de temperatura ha sido calibrado y ajustado. Una vez que se han concluido con las experimentaciones, se ha procedido con la validación de la hipótesis en lo que respecta al ahorro energético de la estación.

4.1 Calibración del sistema de monitoreo y registro de temperatura

Se compara la salida de corriente del transmisor con la corriente de la curva de escalamiento y se establece el error, luego mediante un ajuste de los tornillos de cero y span se trata de reducir ese error al máximo. Para tener un valor de temperatura de referencia se ha utilizado el medidor de temperatura HI98501 de Hanna Instruments. Pese a que este método no es técnico, por lo tanto carece de trazabilidad. Para realizar este proceso se requiere de un calibrador de temperatura debidamente contrastado y certificado en un laboratorio. Se han tomado temperaturas de referencia conocidas como la de temperatura de congelación rápida, la temperatura de congelación del agua, la temperatura ambiente y la temperatura de ebullición del agua a 2500 msnm. A continuación en la Tabla 24 se detallan los valores mencionados antes de realizar ajuste

alguno en el transmisor de temperatura y en la Tabla 25 los valores ajustados.

Tabla 24

Valores de calibración antes del ajuste del transmisor.

Temperatura	Valor de corriente medido	Temperatura correspondiente a la corriente medida	Valor de corriente correspondiente al patrón	Error relativo
-18°C	6.65 mA	-18°C	6.56 mA	0.62%
0°C	8.1 mA	0°C	8 mA	0.625%
21°C	9.8 mA	21°C	9.68 mA	0.75%
91°C	15. mA	91°C	15.28 mA	0.75%

Tabla 25

Valores de calibración después del ajuste del transmisor.

Temperatura	Valor de corriente medido	Temperatura correspondiente a la corriente medida	Valor de corriente correspondiente al patrón	Error relativo
-18°C	6.6 mA	-18°C	6.56 mA	0.25%
0°C	8.06 mA	0°C	8 mA	0.37%
21°C	9.7 mA	21°C	9.68 mA	0.125%
91°C	15.31 mA	91°C	15.28 mA	0.1875%

Dado que en estas mediciones participan dos instrumentos como son la sonda de temperatura y el transmisor electrónico para obtener el error total se consideran la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada tolerancia máxima. El error máximo se calcula de la siguiente manera:

$$\text{error máximo} = \sqrt{0.3^2 + 0.2^2} = 0.36\%$$

Ecuación 21

Ecuación para encontrar el error total en la medida de temperatura

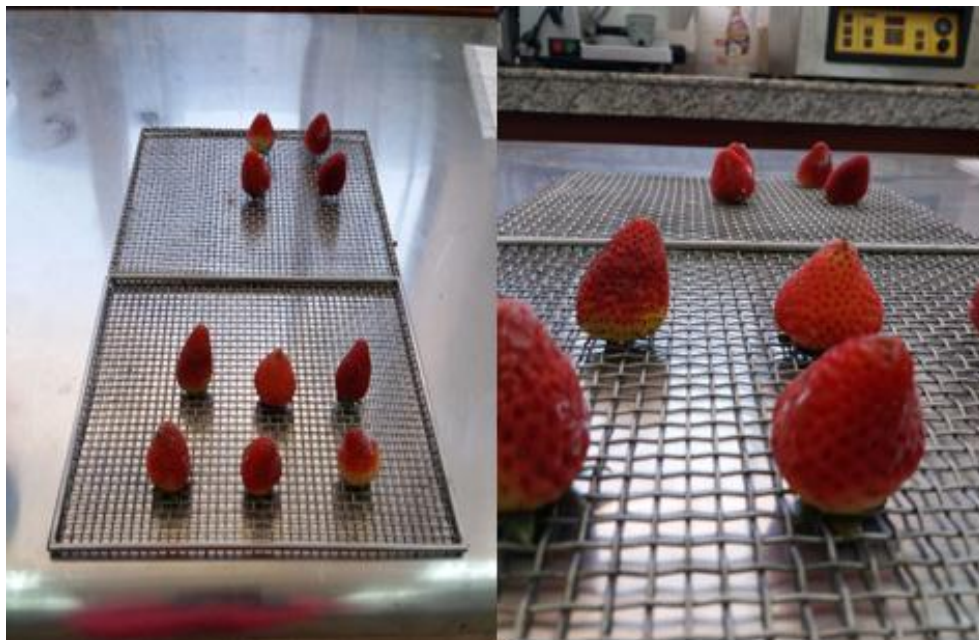
Como se mencionó en apartados anteriores existen diversas fuentes que inducen al error en las mediciones por lo que nunca se conocerá el valor exacto de una medición.

4.2 Obtención de datos de tiempo y temperatura

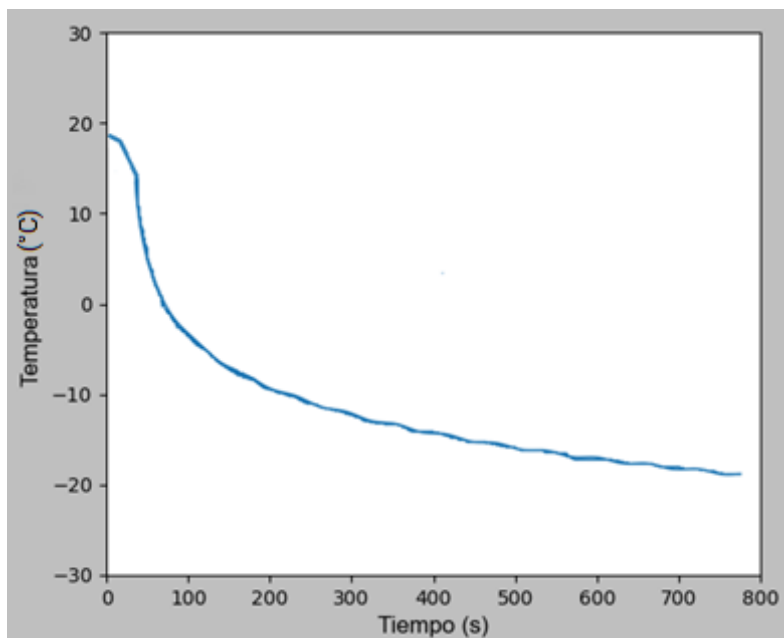
Para la obtención de datos de tiempo y temperatura de congelamiento se hicieron 5 mediciones utilizando lotes de 1kg de fragaria de la variedad x ananassa, con similares características físicas con el fin de que la conducción de calor sea uniforme y se obtengan tiempos homogéneos de congelamiento en todas las frutas. La temperatura inicial promedio para cada experimento fue de 21°C, la temperatura final fue de -18°C que es lo recomendado para la fragaria por el Codex Alimentarius, se tomaron datos de temperatura cada segundo, es decir se tiene una frecuencia de muestreo de 1 Hz lo cual fue más que suficiente teniendo en cuenta que la temperatura es un proceso de evolución lenta. En la Figura 41 se muestra un lote de fragarias variedad x ananassa y en la Figura 42 se muestran los resultados del experimento 1.

Figura 41

Lote de fragaria x ananasa

**Figura 42**

Resultado de la medición del tiempo de congelación a -18°C durante el primer experimento.



En la Figura 42 se observa la evolución de la temperatura desde que inicia el proceso de congelación hasta que este finaliza, el tiempo que tardó en alcanzar los -18°C correspondientes a la temperatura IQF fue de 12 minutos con 50 segundos, dado que el tiempo de muestreo fue de 1 segundo se obtuvieron un total de 770 muestras para este tiempo.

4.3 Validación del sistema de monitoreo y registro de temperatura

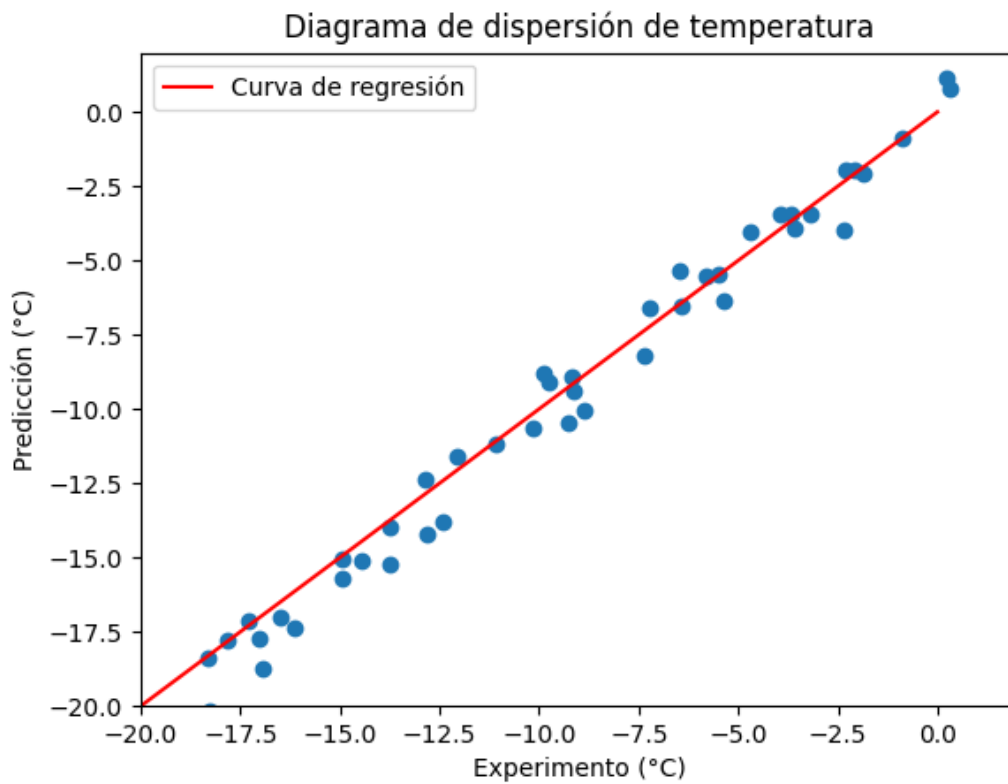
De acuerdo a la predicción matemática el tiempo de congelación para la fragaria está comprendido entre 10 y 15 minutos, para una mejor aproximación de este tiempo se realizó una regresión lineal simple con un coeficiente de determinación R^2 de 0.98, lo cual se interpreta como un buen ajuste, y se obtuvo un tiempo de 13 minutos con 24 segundos. Este tiempo será contrastado con los tiempos obtenidos en cinco experimentos y se determinará el grado de concordancia existente entre ambos métodos. Se utiliza el método de Bland-Altman o también conocido como el método de diferencia de medias de Tukey, el cual es un método gráfico utilizado ampliamente en el campo de la bioestadística, pero también adaptado a otros campos de estudio. Con este método se garantiza que dos grupos de mediciones tengan un error inferior a dos desviaciones estándar del promedio con un intervalo de confianza del 95%. En la Tabla 26 se detallan los parámetros utilizados para aplicar este método. Para simplificar cálculos se trabaja con minutos y fracciones de minutos.

Para determinar el grado de concordancia o de acuerdo entre ambos métodos se toman las medidas de evolución de temperatura entre las mediciones experimentales cuyo tiempo final más se aleja y más se acerca a la predicción matemática.

Para el experimento con tiempo de 12 minutos, 50 segundos, se tiene el siguiente diagrama de dispersión.

Figura 43

Gráfico de dispersión de la evolución de temperatura entre el modelo matemático vs la temperatura del experimento con tiempo 12 minutos, 50 segundos.



- Se calcula la media aritmética de las diferencias de temperatura:

$$\bar{x} = \sum_i^N \frac{x_i}{N} = 0.475$$

Ecuación 22

Ecuación de la media aritmética de las diferencias

Ahora se procede con el cálculo de la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

$$\sigma = 0.75$$

Ecuación 23

Ecuación de la desviación estándar

Con estos datos se establecen los límites inferior y superior de la siguiente manera:

$$\text{Límite superior} = \bar{x} + 2\sigma = 1.975$$

Ecuación 24

Ecuación del límite superior de la gráfica de Bland-Altman

$$\text{Límite inferior} = \bar{x} - 2\sigma = -1.025$$

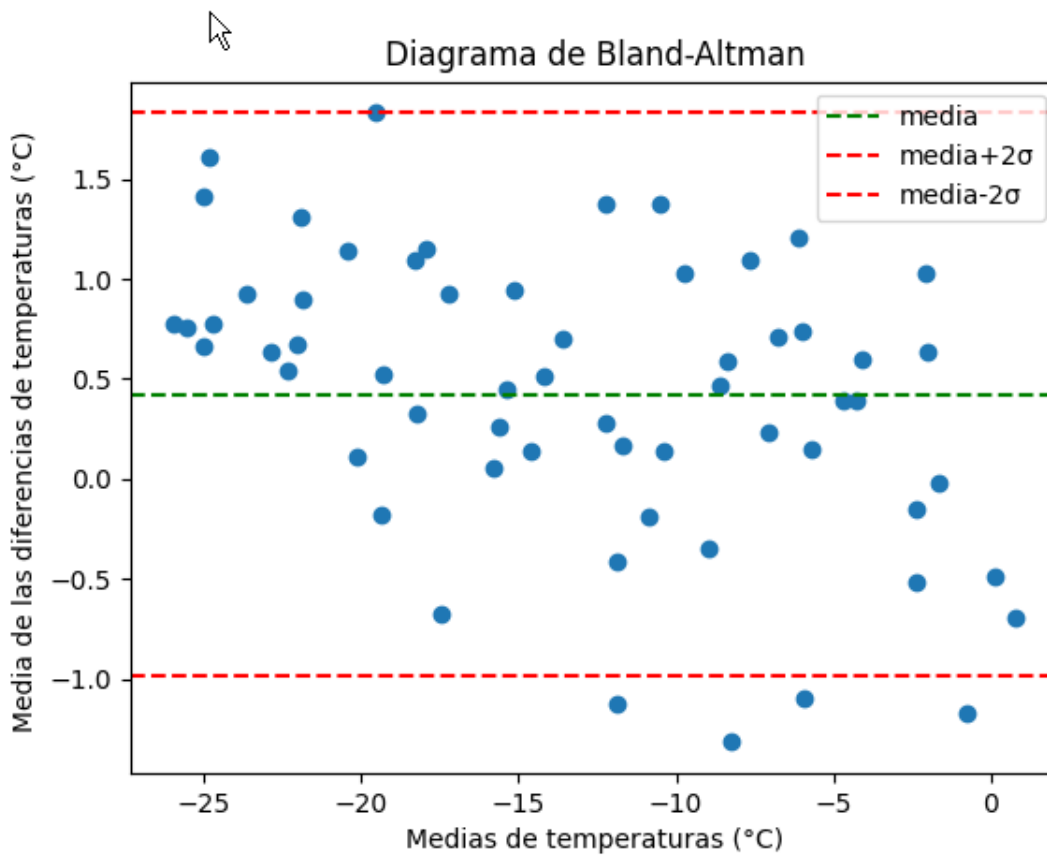
Ecuación 25

Ecuación del límite inferior de la gráfica de Bland-Altman

Estos parámetros son graficados en el diagrama de Bland-Altman Figura 44 y a continuación su interpretación.

Figura 44

Diagrama de Bland-Altman para el experimento de 12 minutos con 50 segundos comparado con el modelo de predicción



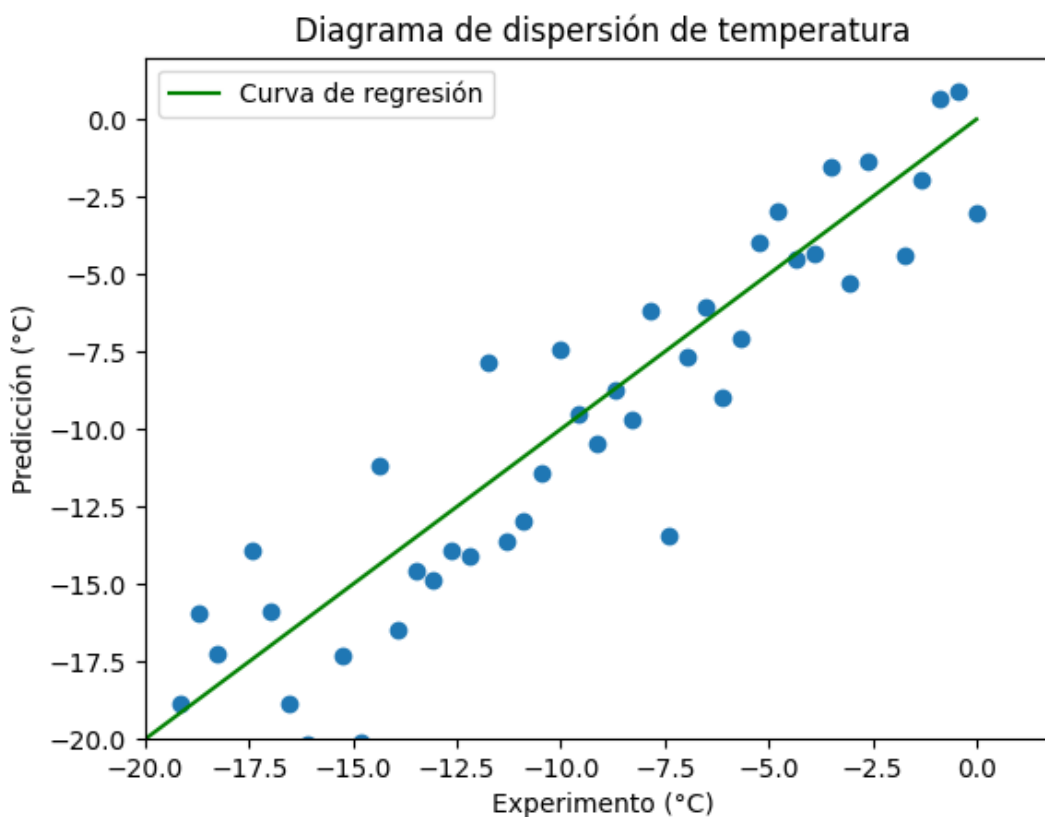
Nota. Del diagrama de la Figura 44 se determina que las mediciones obtenidas por los dos métodos tienen un error que se encuentra dentro de los límites de concordancia con un intervalo de confianza del 95%. Ya que estos se encuentran entre máximo 2 desviaciones estándar de la media. Por lo que se concluye que las dos maneras de medir el tiempo de congelación de la fragaria a -18°C están estrechamente relacionadas.

De manera análoga se procede con el tiempo de 12 minutos y 02 segundos, en

donde se realiza sólo el análisis gráfico con su respectiva interpretación. En la Figura 45 se muestra el diagrama de dispersión y en la Figura 46 el diagrama de Bland-Altman.

Figura 45

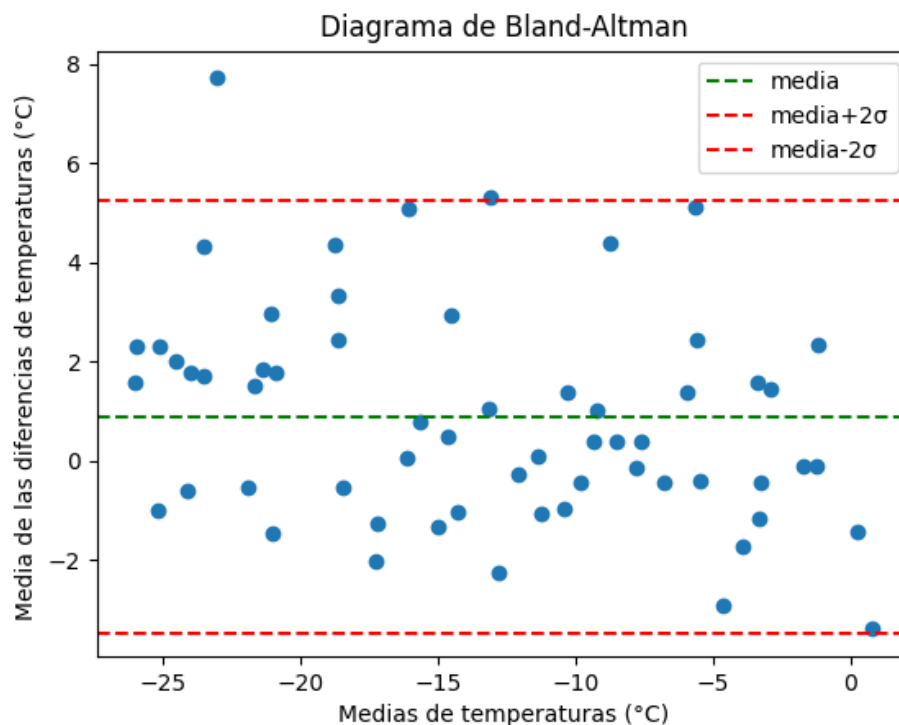
Gráfico de dispersión de la evolución de temperatura entre el modelo matemático vs la temperatura del experimento con tiempo 12 minutos, 02 segundos.



Nota. A comparación del diagrama de la Figura 43 se observa mayor dispersión, esto es debido a que en este experimento se encontró mayor diferencia de tiempo respecto al modelo matemático de predicción.

Figura 46

Diagrama de Bland-Altman para el experimento de 12 minutos con 02 segundos comparado con el modelo de predicción



Nota. De igual manera se observa que los valores se alinean con el criterio de no estar a más de dos desviaciones estándar de la media de las diferencias de temperatura.

Otra manera de validar el tiempo obtenido experimentalmente con el tiempo de la predicción matemática es a través de la distribución T de Student la cual establece diferencias significativas entre mediciones tomadas en momentos distintos y que se encuentren relacionadas de alguna manera. A continuación se construye un intervalo de confianza del 95% para que la media de la diferencia entre los tiempos medidos de manera teórica con los tiempos obtenidos de manera experimental sea de máximo 1 minuto y el sistema se considere aceptable.

Tabla 26

Tiempos obtenidos después de 5 experimentos

Experimento	Modelo matemático(min)	Medición experimental(min)	Media(min)	Diferencia(min)
1	13.40	12.83	13.11	0.57
2	13.40	12.03	12.71	1.37
3	13.40	12.36	12.88	1.04
4	13.40	12.30	12.85	1.10
5	13.40	12.61	13.00	0.79

Se tiene que la media es:

$$\bar{x} = 0.974$$

La desviación estándar:

$$\sigma = 0.305$$

La muestra es:

$$N = 5$$

La distribución T de Student sigue la siguiente ecuación:

$$T \text{ de Student} = \bar{x} \pm t\left(\frac{\alpha}{2}, N - 1\right) * \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Ecuación 26

Distribución T de Student

Donde α es el valor de la significancia y se obtiene de restar el valor del intervalo de confianza de la unidad, por lo tanto $\alpha=0.05$ y el término $t\left(\frac{\alpha}{2}, N - 1\right)$ se obtiene del valor de la significancia e función de los grados de libertad de la tabla del Anexo E. Para 0.025 con 4 grados de libertad se tiene: 2.7765. Estos valores se reemplazan en la Ecuación 26 y se obtiene el siguiente intervalo:

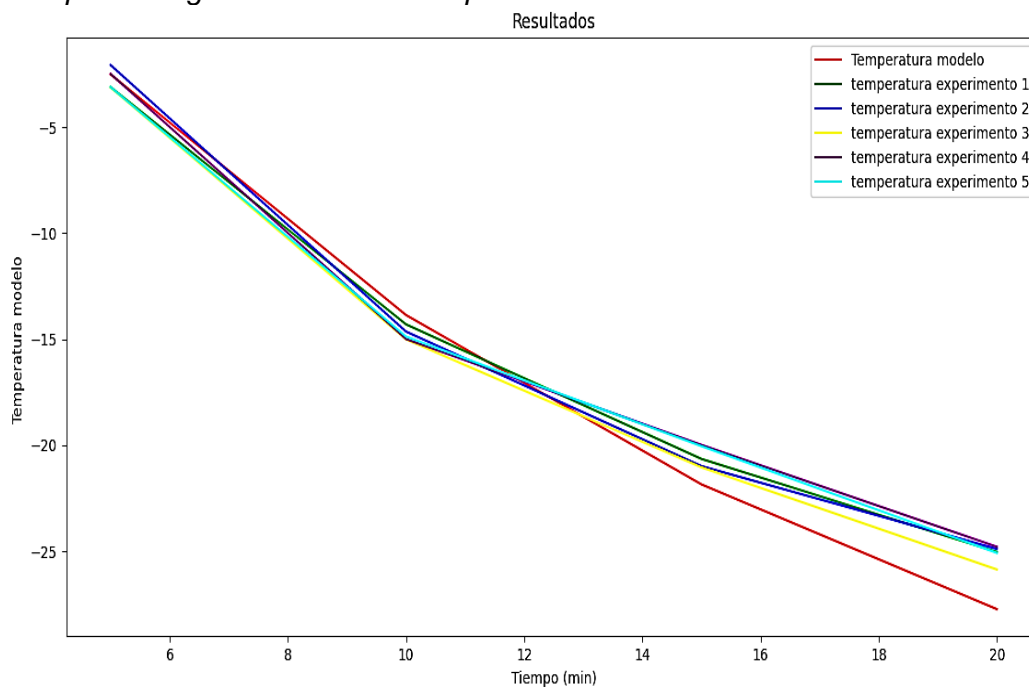
$$0.597 \leq \mu \leq 1.351$$

$$36'' \leq 1' \leq 1'21''$$

Lo cual indica que la diferencia de tiempo promedio máxima tolerable se encuentra en el intervalo y con eso se concluye que la obtención del tiempo de congelación por medio del sistema implementado es confiable comparada con el modelo matemático de predicción. En la Figura 47, se grafica la relación existente entre la evolución de la temperatura en función del tiempo del modelo de predicción junto con el de las cinco experimentaciones, con énfasis en los tiempos de 5, 10, 15 y 20 minutos.

Figura 47

Comparación gráfica del modelo experimental con el modelo matemático.



4.4 Validación de la hipótesis

Se conoce que la potencia eléctrica de la estación IQF DIOFLUI-361 es de 3.14kW con este dato y las horas de uso se deduce el consumo en kWh de este equipo. Como antecedente, se conoce que antes de implementar el sistema de monitoreo y registro de temperatura se mantenía encendido el equipo por 30 minutos siendo indiferente el tiempo al cual cualquier producto alcanzaba su punto de congelación IQF,

en el caso de la fragaria -18°C . Una vez implementado el sistema, se evidencia que se tiene un tiempo de congelación promedio de 12 minutos y 25 segundos, para fines demostrativos se redondea este tiempo a 13 minutos y se calcula el consumo de energía para antes y después de haber sido implementado el sistema para un proceso de congelación rápida y se anotan los resultados en la Tabla 27

Tabla 27

Cálculo del consumo eléctrico de la estación DIOFLUI-361

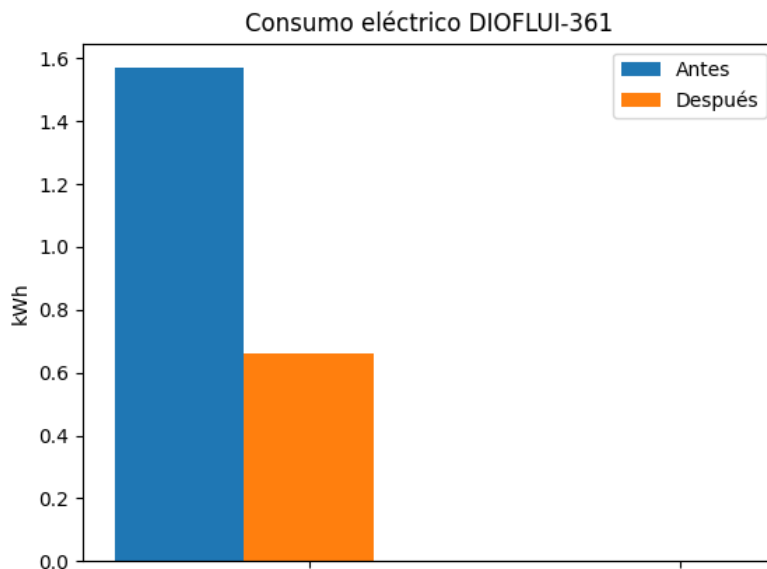
	Consumo eléctrico antes	Consumo eléctrico después
Potencia eléctrica	3.14 Kw	3.14 kW
Tiempo	0.5 h	0.21 h
Consumo	1.57 kWh	0.66 kWh

Nota. De acuerdo a lo calculado se evidencia que el ahorro de energía una vez implementado el sistema de monitoreo y registro de temperatura es del 58%, lo cual implica también un ahorro económico considerable.

En la Figura 48 se ilustra el consumo en kWh por cada experimento realizado en la estación DIOFLUI-361.

Figura 48

Consumo de energía eléctrica de la estación DIOFLUI-361 antes y después de haber implementado el sistema de monitoreo y registro de temperatura

**4.5 Alcances**

- El modelo matemático para la predicción de tiempo de congelación de la fragaria puede ser adaptado para cualquier otro producto, siempre y cuando se tomen en cuenta las características físicas y químicas tanto del comestible de experimentación como del resto de elementos que participan en el proceso.
- El sistema de monitoreo y registro de temperatura permite contrastar de manera eficaz el tiempo obtenido por medio de experimentaciones con el tiempo obtenido producto de un modelamiento matemático.
- Como trabajos futuros se podría utilizar software especializado para el modelamiento de procesos físicos y obtener un modelo aún más preciso.

4.6. Limitaciones

- El método utilizado para la calibración del transmisor de temperatura del sistema

de monitoreo y registro de temperatura carece de trazabilidad, pues sus resultados no pueden utilizarse de referencia para futuras calibraciones.

- El sistema implementado no tiene control sobre ninguna variable de la estación IQF.
- La instrumentación utilizada no tiene ninguna certificación de fábrica por lo que están propensos a la deriva.
- Los modelos matemáticos muchas veces inducen a una pérdida de información, debido a que algunos parámetros o características se asumen o se desprecian para simplificar cálculos.

Capítulo V

5. Conclusiones y recomendaciones

Después de culminado el trabajo de investigación se ha llegado a las siguientes conclusiones y se han realizado algunas observaciones que serán tomadas como recomendaciones.

5.1 Conclusiones

Se verificó la operatividad de la estación DIOFLUI-361 a través de sus especificaciones y características técnicas así como su correcto funcionamiento durante los experimentos realizados en el laboratorio.

Tomando en cuenta las propiedades físicas y químicas de la fragaria se determinó una expresión matemática con un alto grado de fiabilidad, aproximándose mucho a los tiempos de congelación rápida obtenidos mediante experimentos, con un intervalo de confianza del 95%, que se demostró mediante el uso del método gráfico de Bland-Altman y la distribución T de Student.

Una vez implementado el sistema, mediante pruebas experimentales, se evidenció una notable mejora en el uso eficiente del equipo en lo que concierne a su consumo eléctrico reduciendo el mismo en un 58% y también con el conocimiento del tiempo exacto de congelación rápida se pueden procesar más lotes de alimentos en menor tiempo, lo cual también es un buen indicador de eficiencia.

Gracias al monitoreo y registro de la temperatura de congelación rápida, ahora se conocen datos exactos, se puede tener un mejor control de gestión del equipo y se puede reproducir el mismo procedimiento para obtener estos datos tanto de manera teórica como experimental con cualquier otra variedad de fruta o alimento.

La frecuencia de muestreo considerada para adquirir la señal de temperatura, es más que suficiente tomando en cuenta que la evolución de la temperatura se considera

un proceso lento y que el objetivo es tener un instrumento registrador, más no un instrumento de adquisición de datos el cual necesita de una frecuencia de muestreo basada en ciertas características y teoremas.

5.2 Recomendaciones

Cuando se requiera trasladar el modelo matemático a otra variedad de alimento, tomar en cuenta que cada variedad tiene sus propias características tanto físicas como químicas.

Para la calibración de un instrumento se recomienda que el mismo tenga una precisión de al menos tres veces mejor que la del instrumento a calibrar con el objetivo de disminuir al máximo la incertidumbre.

Para la programación con Python, tomar en cuenta que algunos módulos no son compatibles entre las versiones 2 y 3 por lo que a veces es necesario buscar otras alternativas.

Asignar una dirección IP fija a la Raspberry Pi con el fin de facilitar la conexión de los clientes al servidor.

Con este tipo de técnicas de preservación de alimentos se pretende tener un mayor tiempo de conservación asegurando la seguridad alimentaria en la región.

Es de vital importancia que se difundan estos métodos de preservación entre los productores de la zona centro del país, zona conocida por su producción agrícola.

Bibliografía

- Bombas GRUNDFOS. (s.f.). *Grundfos*. Recuperado el 25 de Julio de 2021, de <https://www.grundfos.com/es/learn/research-and-insights/cross-flow-heat-exchanger>
- Acedo Sánchez, J. (2003). *Control Avanzado de Procesos*. Madrid: Díaz de Santos, S.A.
- ARCO. (2 de Marzo de 2020). *Válvulas ARCO*. Recuperado el 12 de Julio de 2021, de [Electroválvulas: Qué es y para qué sirve: https://blog.valvulasarco.com/electrovalvulas-que-es-y-para-que-sirve](https://blog.valvulasarco.com/electrovalvulas-que-es-y-para-que-sirve)
- Arduino. (2021). *Store Arduino*. Recuperado el 10 de Agosto de 2021, de <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>
- Autycom. (17 de Agosto de 2018). *Autycom*. Recuperado el 9 de Julio de 2021, de <https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-hmi/>
- Autycom. (20 de Junio de 2021). *Autycom*. Recuperado el 16 de Julio de 2021, de <https://www.autycom.com/instrumentos-medicion-control/>
- Ballesteros Hernández, R. (2017). Ahorro de energía en un túnel de viento utilizando un variador de frecuencia. Recuperado el 25 de Julio de 2021, (*Tesis de grado*). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/21155>
- Borges, S. (15 de Febrero de 2019). *Infranetworking*. Recuperado el 7 de Agosto de 2021, de <https://n9.cl/pwiz6>
- Borrero Serrano, M. (s.f.). *Biblioteca de Ingeniería. Universidad de Sevilla*. Recuperado el 25 de Julio de 2021, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11986/fichero/CAP%C3%8DTULO+1%252FCAP%C3%8DTULO+1.pdf>.
- Boulanger Tambini, M., Muschi Garcia, J. C., Olivera Guevara, E. Y., & Uriarte Chicoma,

- A. A. (2020). Implementación de planta agroindustrial de producción y comercialización de fruta congelada. (*Tesis de Maestría*). Universidad Tecnológica del Perú, Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12867/3631>
- Codex Alimentarius Commission. (2019). *Norma del Codex para fresas congeladas rápidamente CODEX STAN 52-1981*. Recuperado el 2 de Julio de 2021, de http://www.fao.org/input/download/standards/270/CXS_052s.pdf
- Comite Electrotécnico Internacional. (17 de Julio de 2008). Temperature Measuring Instruments. *IEC 60751, 2*.
- Compañía Levantina de Reductores. (s.f.). *CLR*. Recuperado el Julio 5 de 2021, de <https://clr.es/blog/es/variadores-de-velocidad/>
- Connor, N. (17 de Septiembre de 2019). *Thermal Engineering*. Recuperado el 25 de Julio de 2021, de <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-nusselt-definicion/>
- Connor, N. (20 de Enero de 2020). *Thermal Engineering*. Recuperado el 25 de Julio de 2021, de <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-formula-de-numero-de-reynolds-definicion/>
- Cosmos. (s.f.). *Túneles de Congelación IQF*. Recuperado el 5 de Julio de 2021, de <https://tunelesdecongelacioniqf.com/>
- Creus Solé, A. (2011). *Instrumentación Industrial* (Octava ed.). México D.F., México: Alfaomega.
- Cuadros Acosta, I. (26 de Junio de 2020). *Geek Electrónica*. Recuperado el 16 de Julio de 2021, de <https://geekelectronica.com/que-son-los-transductores/>
- Dártico. (6 de Septiembre de 2018). Manual del usuario y operación del IQF. (*Manual de usuario*). Cali, Colombia.
- Drake Moyano, J. M. (2005). Introducción a los Sistemas de Instrumentación.

- Instrumentación Electrónica de Comunicaciones*. Santander. Recuperado el 11 de Julio de 2021, de https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_it/iec_1.pdf
- Edimar. (2019). *¿Qué es un sistema HMI?* Recuperado el 25 de Julio de 2021, de <https://edimar.com/hmi-tipos-y-funciones/>
- E-Goto Processors Store. (2020). *E-Goto Processors Store*. Recuperado el 9 de Agosto de 2021, de <https://n9.cl/dz3bu>
- Escalante Varona, A. V. (2015). "INFLUENCIA DE UN RECUBRIMIENTO COMESTIBLE A BASE DE GOMA DE TARA (*Caesalpinia spinosa*) SOBRE LA CALIDAD DE FRESAS (*Fragaria ananassa* cv. Aromas)". (*Tesis de Pregrado*). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Recuperado el 2 de Julio de 2021, de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1838>
- Escuela Industrial "San José". (s.f.). *Medición de Temperatura*. (C. Beltrán Provoste, Recopilador) Concepción. Recuperado el 2015 de Julio de 2021, de https://instrumentacionycontrol.net/Descargas/Documentacion/Instrumentaci%23U00f3n_Deteccion/lyCnet_MEDICION_DE_TEMPERATURA.pdf
- Eurofrits. (29 de Enero de 2016). *IQF: el sistema de congelación «5 estrellas»*. Recuperado el 1 de Julio de 2021, de Eurofrits Web Site: <https://www.eurofrits.com/blog/iqf/>
- Fundación Española de la Nutrición. (s.f.). *FEN Org*. Obtenido de <https://www.fen.org.es/MercadoAlimentosFEN/pdfs/fresa.pdf>
- Gallardo, J. (14 de Julio de 2021). *Calor y frío*. Recuperado el 16 de Julio de 2021, de <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/los-gases-refrigerantes.html>
- García Cobo, J. (s.f.). *Hwlibre*. Recuperado el 30 de Julio de 2021, de <https://www.hwlibre.com/que-es-una-placa-sbc/>
- García, H. (14 de Agosto de 2020). *Intensity*. Recuperado el 15 de Julio de 2021, de

Principales elementos de un sistema de refrigeración:

<https://www.intensity.mx/es/blog/principales-elementos-de-un-sistema-de-refrigeracion>

Gutiérrez Hinestroza, M. d., & Iturralde Kure, S. A. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*. Santa Elena: UPSE.

Hanna Instruments. (s.f.). Hanna Colombia. *Ficha técnica del producto checktemp HI98501*. Colombia.

Honorable Consejo Universitario. (26 de Diciembre de 2019). Recuperado el 1 de Julio de 2021, de Redi.uta.edu.ec: <https://redi.uta.edu.ec/handle/123456789/73832>

Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (Cuarta ed.). México: Prentice Hall.

Inst Tools. (2021). *Insttumentation Tools*. Recuperado el 15 de Julio de 2021, de <https://instrumentationtools.com/indicators/>

ITIS. (5 de Agosto de 2021). *ITIS Standard Report Page*. Recuperado el 5 de Agosto de 2020, de https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=24624#null

Laurila, H. (17 de Abril de 2020). *Beamex*. Recuperado el 10 de Agosto de 2021, de <https://n9.cl/4h8aj>

Lucas Hidalgo, G. (2016). Dimensionamiento y selección de un túnel de congelación para el procesamiento de banano (*musa sapientum*) con paleta. *Tesis de Pregrado*. Escuela Superior Politécnica de Litoral, Guayaquil. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/34451>

Luchetti, S. (1 de Junio de 2021). *Tribalyte Technologies*. Recuperado el 27 de Julio de 2021, de <https://tech.tribalyte.eu/blog-sistema-embebido-caracteristicas>

Machado, A. M. (22 de Diciembre de 2020). *Pragma*. Recuperado el 10 de Agosto de

2021, de <https://n9.cl/cevhh>

Martin, F. (10 de Junio de 2015). *Restauración Colectiva*. Recuperado el 4 de Julio de 2021, de Cambios y alteraciones en los alimentos durante el proceso de congelación (II): <https://www.restauracioncolectiva.com/n/cambios-y-alteraciones-en-los-alimentos-durante-el-proceso-de-congelacion-ii>

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (17 de Junio de 2020). *Agricultura*. Recuperado el 15 de Julio de 2021, de <https://www.agricultura.gob.ec/productores-de-fresa-de-tungurahua-buscan-obtener-certificacion-bpa/>

National Instruments. (5 de Marzo de 2019). *NI*. Recuperado el 24 de Julio de 2021, de <https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/06/virtual-instrumentation.html#section-1640961834>

National Instruments. (s.f.). *NI*. Recuperado el 10 de Julio de 2021, de <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

Omega Engineering. (s.f.). *Omega Engineering*. Recuperado el 15 de Julio de 2021, de <https://es.omega.com/prodinfo/medicion-temperatura.html>

Omega. (s.f.). *Omega: A Spectris Company*. Recuperado el 15 de Julio de 2021, de La importancia de la Instrumentación: <https://cl.omega.com/prodinfo/instrumentacion.html>

Pastor, J. (25 de Abril de 2018). *Xataka*. Recuperado el 8 de Agosto de 2021, de <https://n9.cl/9vrt>

Pérez Guerrero , L. L. (2018). INDUCCIÓN DE LA FLORACIÓN EN FRESA (*Fragaria x ananassa*) VARIEDAD ALBIÓN, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE EXTRACTO DE SAUCE (*Salix humboldtiana*) Y AGUA DE COCO (*Cocos nucifera* L) . (*Tesis de Pregrado*). Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Recuperado el 2 de Julio de 2021, de <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/28651>

Pichuasamín Rivera, E. (2021). Evaluación del efecto de la congelación rápida individual

- (IQF) en las características fisicoquímicas y sensoriales de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*) en rodajas. (*Tesis de pregrado*). Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Recuperado el 1 de Julio de 2021, de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/32123>
- Posada Prieto, F. (8 de Septiembre de 2020). *Canaltic*. Recuperado el 7 de Agosto de 2021, de <https://canaltic.com/blog/?p=3734>
- PR Electronics. (s.f.). Recuperado el 10 de Agosto de 2021, de <https://n9.cl/nc22j>
- Refrigeración NER. (s.f.). Recuperado el 25 de Julio de 2021, *Refrigeración NER*.
Obtenido de <https://refrigeracionner.com/condensadores/>
- Robles Quintana, C. M. (2014). EFECTO DEL RECOCIDO SOBRE LA RECUPERACIÓN DE SOLUTOS EN CRIOCONCENTRACIÓN EN BLOQUE DE EXTRACTO DE CAFÉ. (*Tesis de Maestría*). Universidad de la Sabana, Chía. Recuperado el 7 de Julio de 2021, de <https://intellectum.unisabana.edu.co/handle/10818/10367>
- Roboteach. (2021). Recuperado el 7 de Agosto de 2021, de <https://n9.cl/anjvv>
- Saravacos, G., & Kostaropoulos, A. E. (2016). Recuperado el 25 de Julio de 2021
Handbook of Food Processing Equipment (Segunda ed.). Cham, Suiza: Springer. doi:10.1007/978-3-319-25020-5
- Science Reference Section, Library of Congress. (19 de Noviembre de 2019). *Library of Congress*. Recuperado el 1 de Julio de 2021, de <https://www.loc.gov/everyday-mysteries/technology/item/who-invented-frozen-food/>
- Sensors One. (2021). *Sensors One Measurement Instrumentation Products*.
Recuperado el 14 de Julio de 2021, de <https://www.sensorsone.com/hysteresis/>
- SF Technology. (2021). *SFT*. Recuperado el 10 de Agosto de 2021, de <https://sf.technology/en/productDetail?id=22719d256d62c7c8016da71f8a230054>
- Singh, R. (13 de Mayo de 2021). *Encyclopedia Britannica*. Recuperado el 7 de Agosto

- de 2021, de <https://www.britannica.com/technology/vegetable-processing>
- Tunelesdecongelacioniqf.com*. (s.f.). Recuperado el 2 de Julio de 2021, de <https://tunelesdecongelacioniqf.com/>
- Ulloa Paredes, G. (2018). Recuperado el 25 de Julio de 2021, Evaluación de los efectos de la precocción, prefritura y congelación IQF. (*Tesis de Pregrado*). Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/28027>
- Universidad Miguel Hernández. (3 de Febrero de 2016). *MITE*. Recuperado el 8 de Julio de 2021, de <http://mite.edu.umh.es/2016/02/03/componentes-de-una-instalacion-frigorifica/>
- Universidad Técnica de Ambato. (1999). *Alimentos Ciencia e Ingeniería*. 7, 1-12.
- Verdugo González, W. L. (2012). Introducción de dos variedades de fresa (*Fragaria vesca*) y técnica de fertirrigación empleando cuatro biofertilizantes líquidos en Pablo Sexto - Morona Santiago. (*Tesis de Maestría*). Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Recuperado el 02 de Julio de 2021, de <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/1677>
- Yueqing Finglai Electric Co. ,Ltd. (2019). *FINGLAI*. Recuperado el 7 de Agosto de 2021, de <https://www.finglai.com/products/instruments/temperature-sensors/FTARP08/FTARP08-PT100.html>

Anexos