



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Electrónica e Instrumentación

**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.**

**Autor:**

Espinoza Sánchez, Christian Fabián

Ing. Rivas Lalaleo, David Raimuendo, PhD

**Director**



# CARTA DE ACEPTACIÓN Y CONFORMIDAD



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS

PROYECTO

"Fortalecimiento de la Unidad Operativa de Investigación en Tecnología de Alimentos (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 del volcán Tungurahua (FITA-UOITA)" - Extensión

## CERTIFICADO

En mi calidad de Directora de investigación del proyecto de Canje de Deuda Ecuador España: "Fortalecimiento de la Unidad Operativa de Investigación en Tecnología de Alimentos (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 del volcán Tungurahua (FITA-UOITA)" de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato, me permito CERTIFICAR, que el egresado Christian Fabian Espinoza Sanchez, C.C. 1803994159 de la Carrera de Electrónica e Instrumentación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, realizó el proyecto Sistema de monitoreo de temperatura y tiempo de congelación para la estación /QF de Lecho Fluidizado DIOFLUI-361 del Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato, actividad que ha desempeñado con mucha eficiencia, iniciativa y trabajo en equipo, desde el 23 de Enero hasta el 25 de Marzo de 2021. Esta investigación ha sido realizada en el marco del proyecto de Canje de Deuda Ecuador España FITA-UOITA.

El estudiante en mención puede utilizar este certificado para los trámites correspondientes al proceso de titulación de su institución de educación superior.  
Es todo lo que puedo mencionar en honor a la verdad.

Ambato, 26 de Marzo de 2021.



Ing. Mónica Pilar Silva Ordoñez, M.Sc.

DIRECTORA DE INVESTIGACIÓN PROYECTO CANJE DE DEUDA ECUADOR-ESPAÑA, FITA-UOITA

UNIDAD DE LA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS  
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS  
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
CIB. 098326507



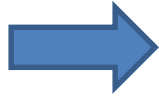
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN
- 3 RESULTADOS
- 4 VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS
- 5 CONCLUSIONES
- 6 RECOMENDACIONES



# 1. INTRODUCCIÓN



# Utilidad e importancia del proyecto



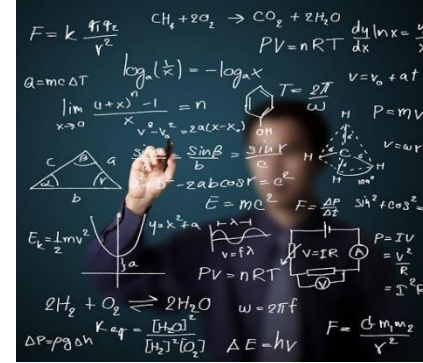
# Antecedentes, problema y solución



30 minutos



Solución



# 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

# Objetivos específicos

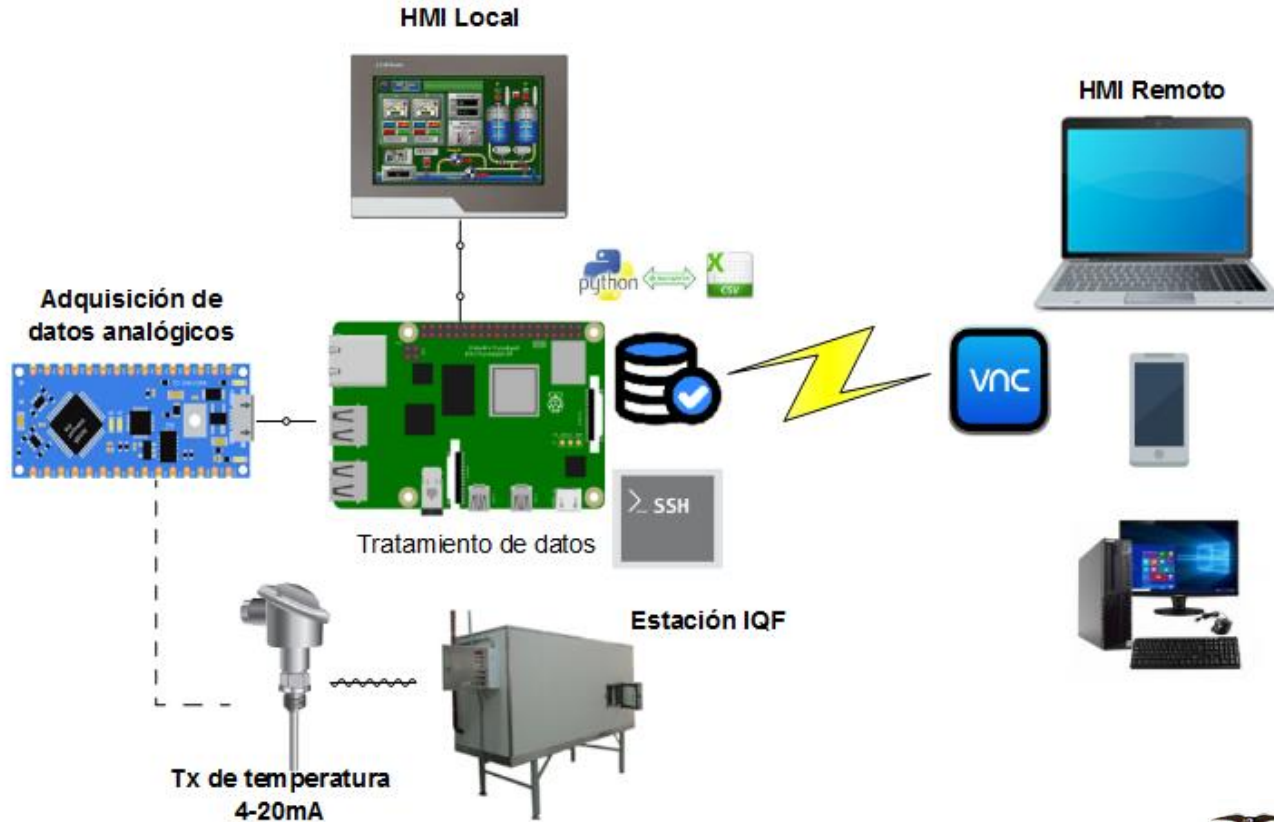
- Diagnosticar las condiciones técnicas y operativas de la cámara de congelación rápida IQF.
- Obtener un modelo matemático que permita conocer el tiempo de congelación aproximado de la fragaria, tomando en cuenta sus propiedades físico-químicas.
- Diseñar e implementar del sistema de monitoreo.
- Realizar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



# Hipótesis

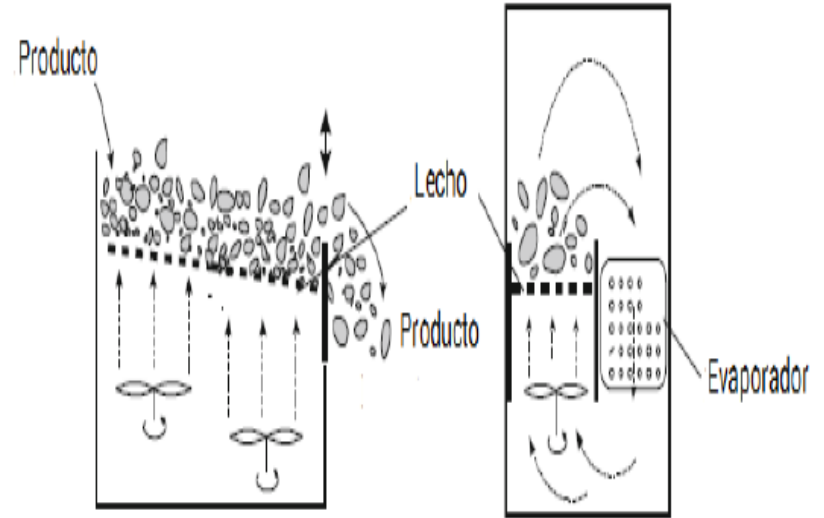
- El prototipo de monitoreo a implementarse permitirá una mejora en el uso eficiente de la energía eléctrica de la estación IQF del Laboratorio de Canje de Deuda perteneciente a la FCIAB-UTA.

# Esquema de implementación



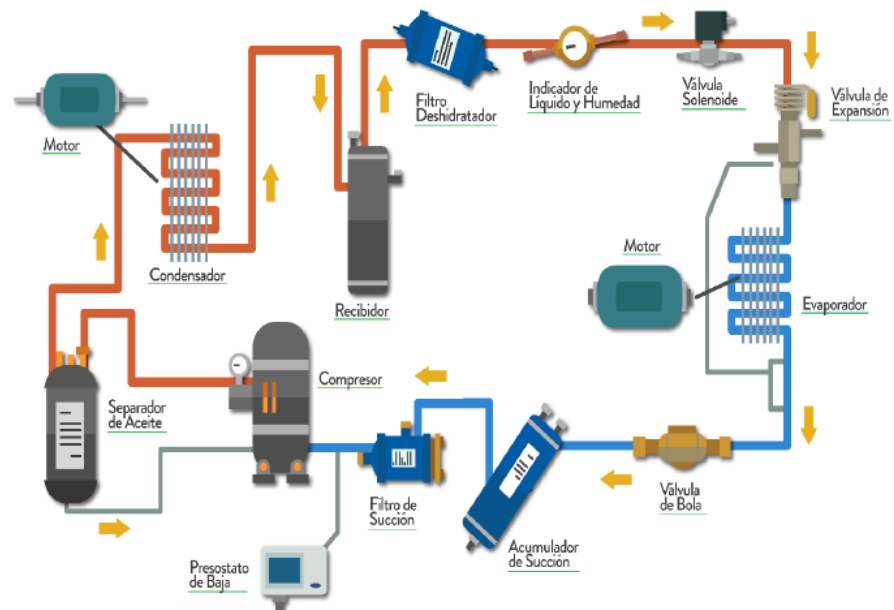
# 2. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

## DIOFLUI-361

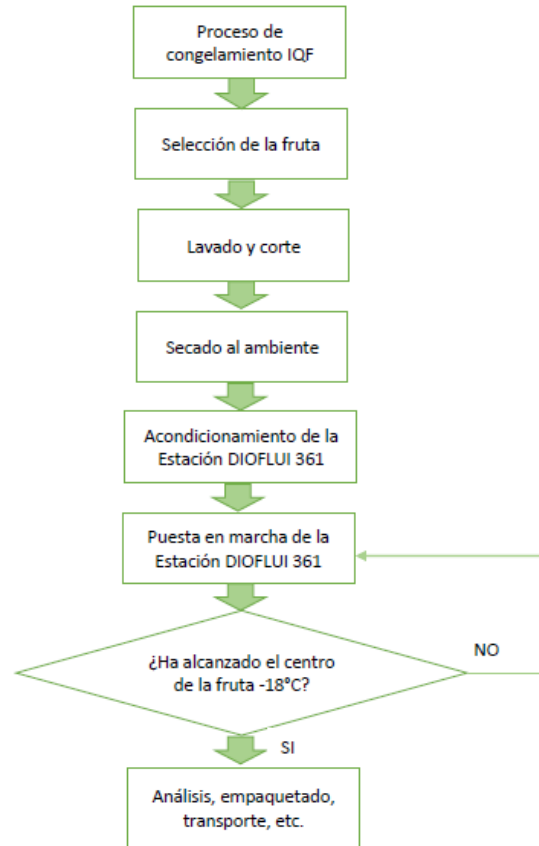


# Características del DIOFLUI-361

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 <sup>3</sup>
Temperatura	-18 a -30°C
Voltaje	220/3/60
Refrigerante	R.404
Aceite compresor	Sintético
Iluminación	LED



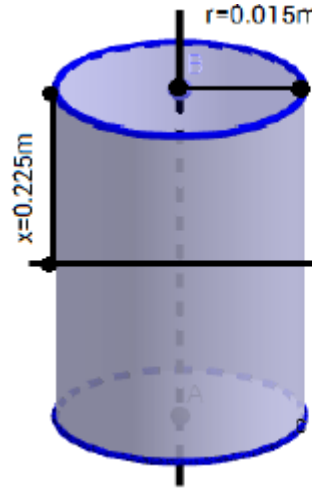
# Proceso de congelamiento



# Modelo de predicción matemática

- Características físico-químicas
- Transferencia de calor dependiente del tiempo
- Cilindro corto con conducción bidimensional
- Método de efectos multidimensionales en sólidos finitos

# Modelamiento de la fragaria



$T_s=293^{\circ}\text{K}$   
 $T_{\infty}=251^{\circ}\text{K}$   
 $h_{\infty}=27.55 \text{ W/m}^2\cdot\text{k}$



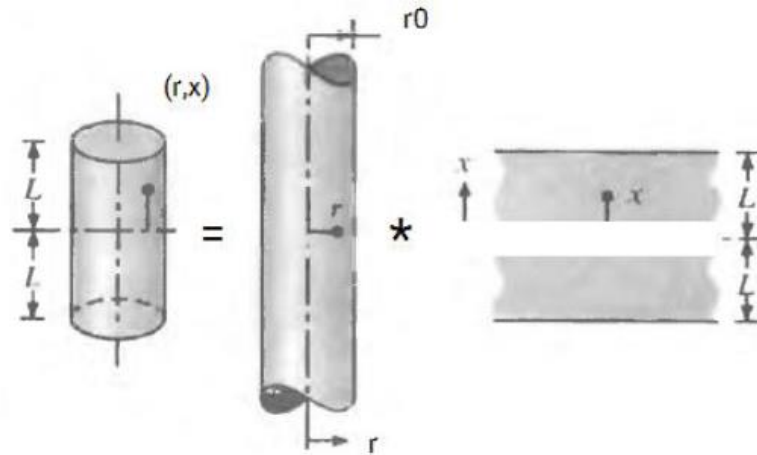
# Parámetros para predecir la temperatura

- Propiedades termo-físicas del aire
- Coeficiente de calor por convección
- Número de Reynolds
- Correlación de Churchill y Bernstein
- Propiedades físico-químicas de la fruta
- Número de Biot
- Número de Fourier





# Solución para sistemas bidimensionales



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



# Temperatura en la pared plana

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

*Temperatura en el centro de la pared plana*

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



# Temperatura en el cilindro infinito

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

*Temperatura adimensional en el centro del cilindro infinito*

<b>Q<sub>0</sub><sup>*</sup>(t)</b>	<b>Valor</b>
Q <sub>0</sub> <sup>*</sup> (5min)	0.90
Q <sub>0</sub> <sup>*</sup> (10min)	0.69
Q <sub>0</sub> <sup>*</sup> (15min)	0.53
Q <sub>0</sub> <sup>*</sup> (20min)	0.41



# Producto de las temperaturas

*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

# Temperatura dimensional

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

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



# Implementación del registrador de temperatura

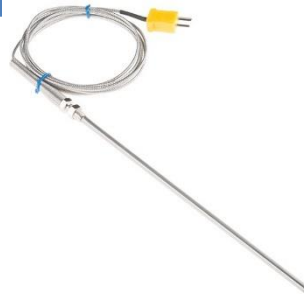
## Selección de instrumentación

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	+/-0.7°C	+/- 0.3 °C	+/- 0.5 °C
Linealidad	Regular	Moderada	Muy buena
Ventajas	Autoalimentado Buena sensibilidad Robusto	Buena linealidad Repetibilidad	Precisión Bajo consumo de energía



# Selección de instrumentación

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



# 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





# Calibración de la sonda FTARP08-PT100-BD3L100M1

Temperatura HI98501	Valor de resistencia medido	Temperatura correspondiente a la tabla PT100	Resistencia correspondiente a la tabla PT100	Error relativo
-18°C	93 $\Omega$	-18°C	92.92 $\Omega$	0.08%
0°C	100 $\Omega$	0°C	100 $\Omega$	0%
21°C	108 $\Omega$	21°C	107.79 $\Omega$	0.19%
91°C	134.9 $\Omega$	91°C	135.08 $\Omega$	0.13%

# Características del transmisor de temperatura PT100

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



# Calibración del transmisor

Temperatura HI98501	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%

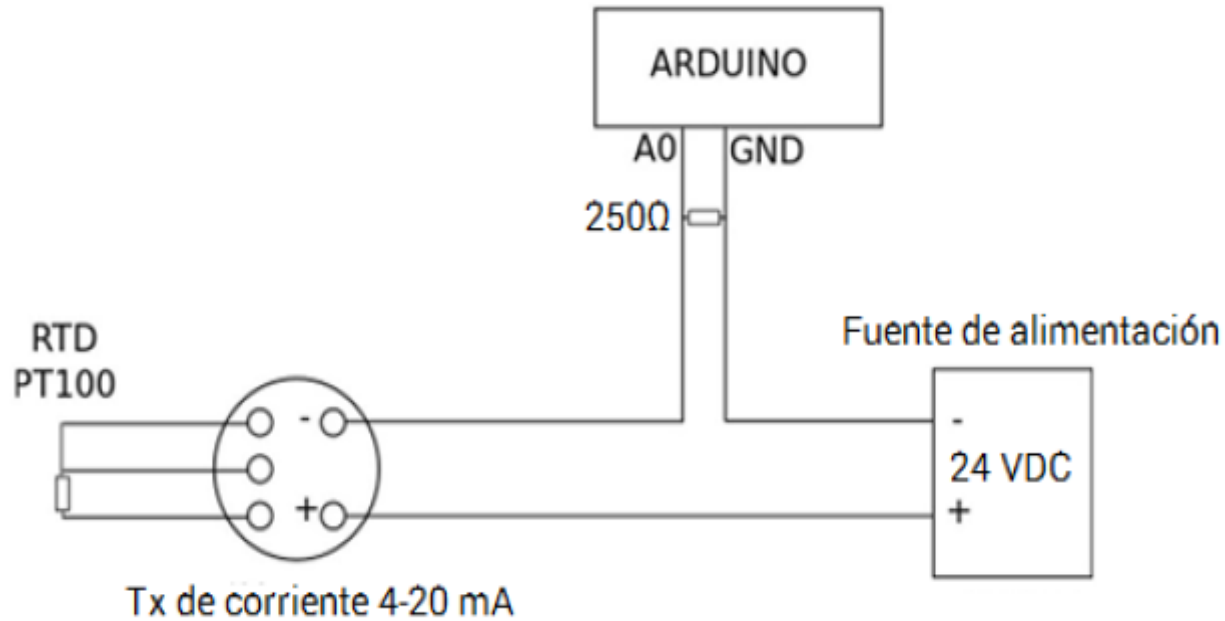


# Ajuste del transmisor

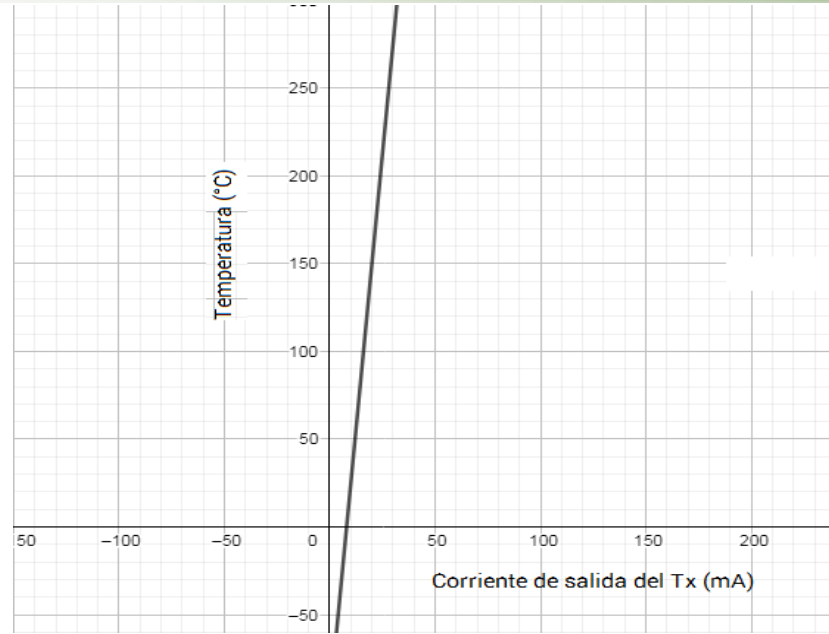
Temperatura HI98501	Valor de corriente medido	Temperatura correspondiente a la corriente medida	Valor de corriente correspondiente al patrón	Error relativo
-18°C	6.6 mA	-18°C	6.56 mA	0.25%
0°C	8.06 mA	0°C	8 mA	0.37%
21°C	9.7 mA	21°C	9.68 mA	0.125%
91°C	15.31 mA	91°C	15.28 mA	0.1875%



# Lazo de corriente 4-20 mA



# Escalamiento de señal



$$temperatura (^{\circ}C) = 12.5 * corriente - 100$$

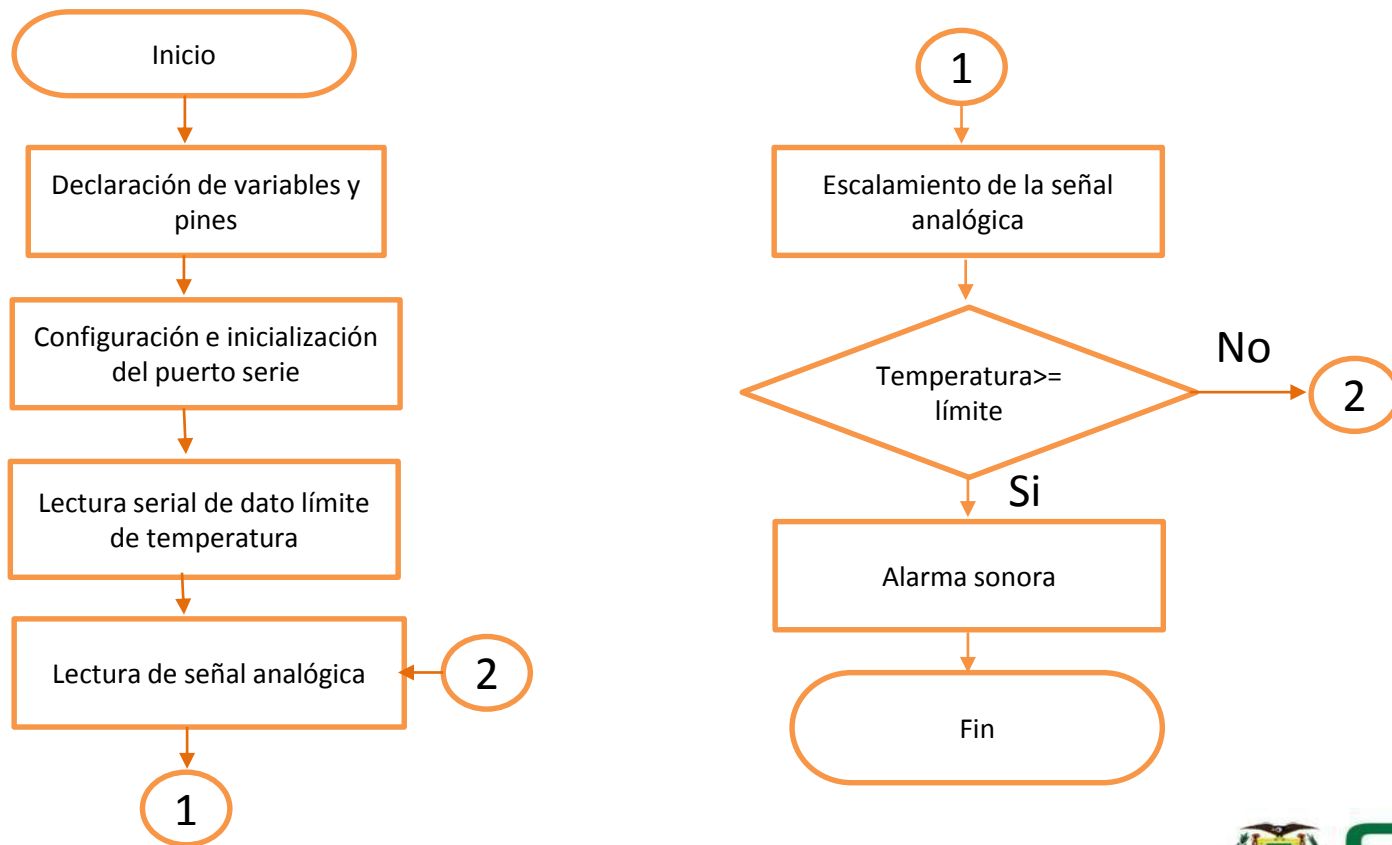
$$V = I * R$$

*Ecuación de Ley de Ohm*

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

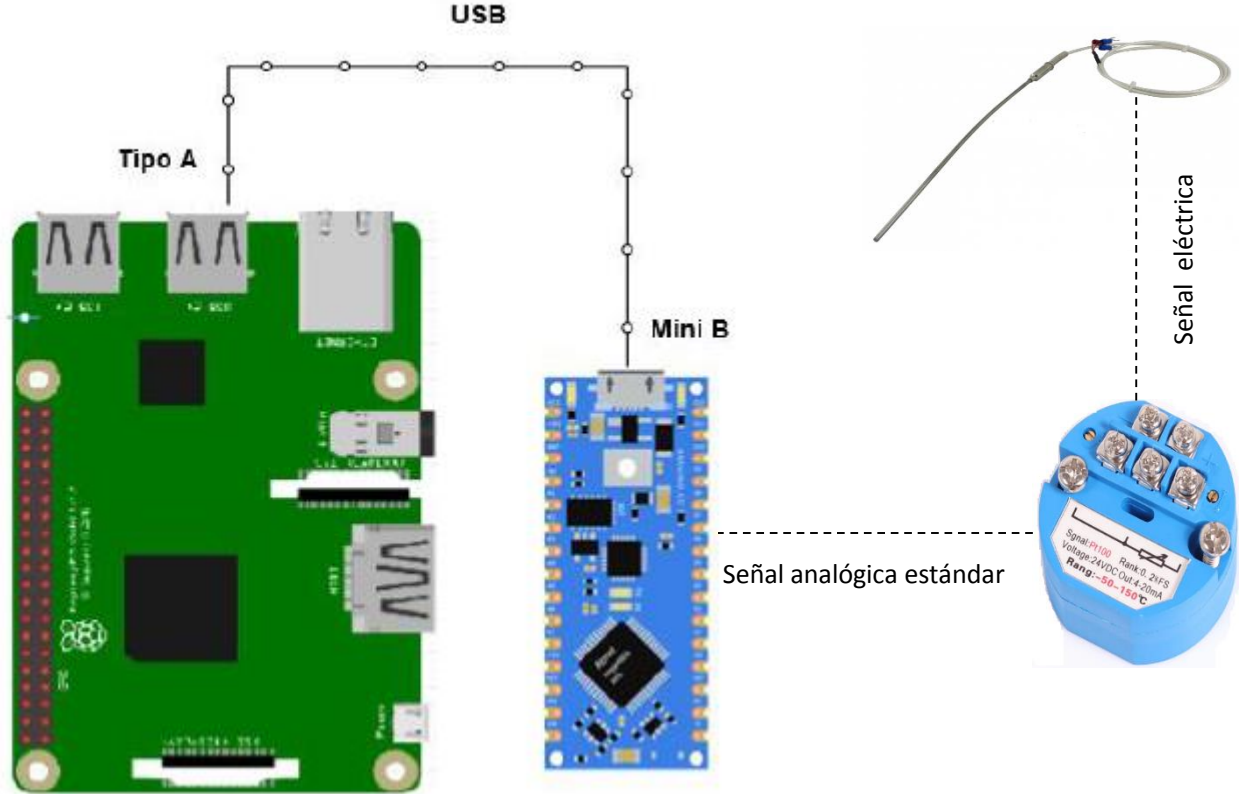
$$V = 20mA * 250\Omega = 5V$$

# Diagrama de flujo programación Arduino



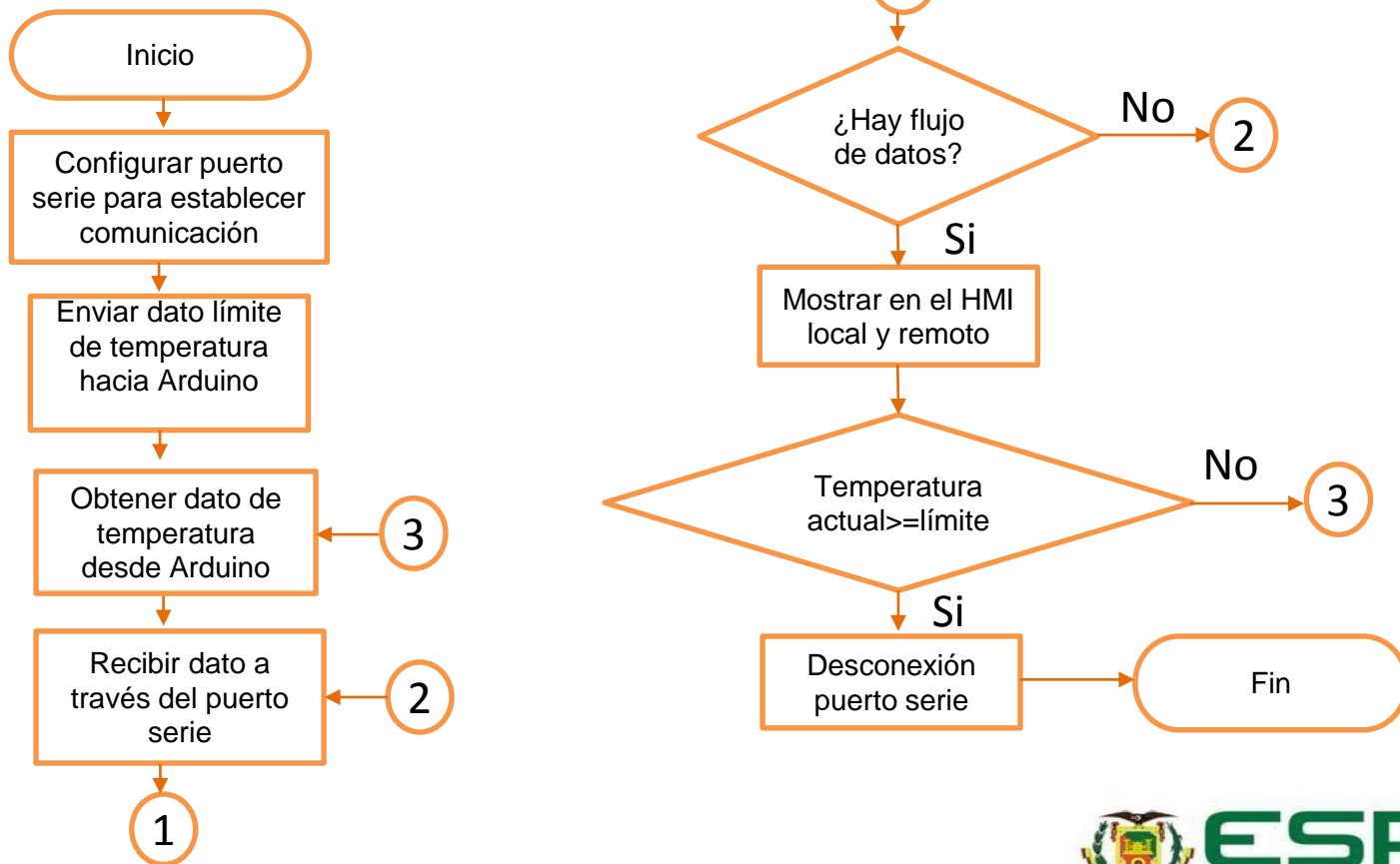


# Programación HMI

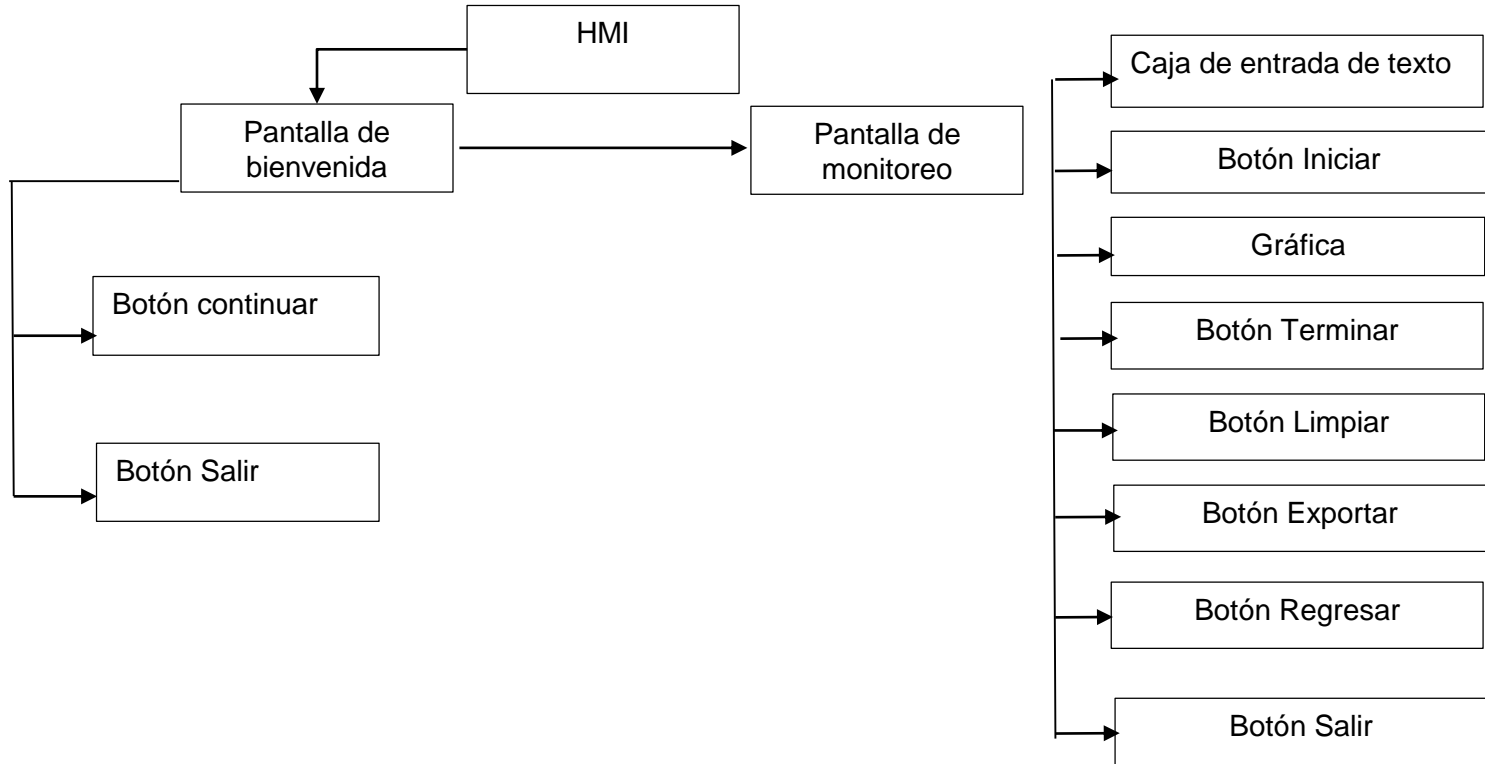


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Diagrama de flujo programa Python



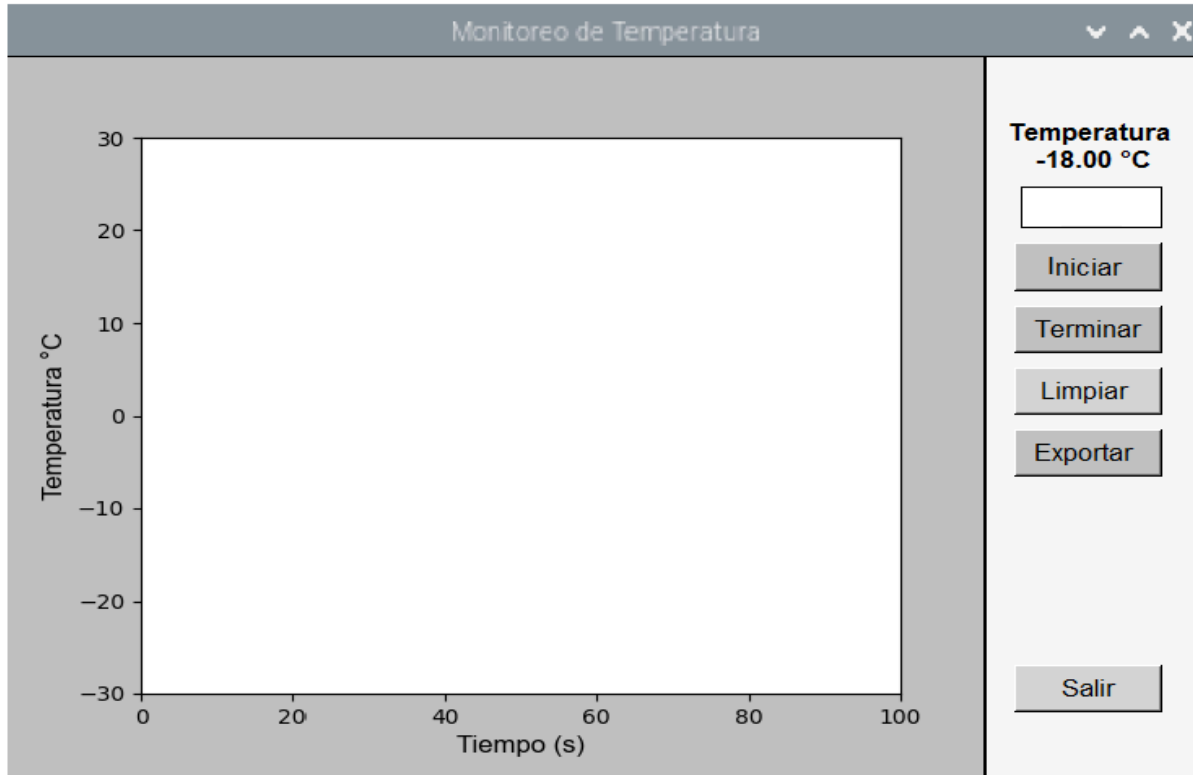
# Diagrama funcional HMI



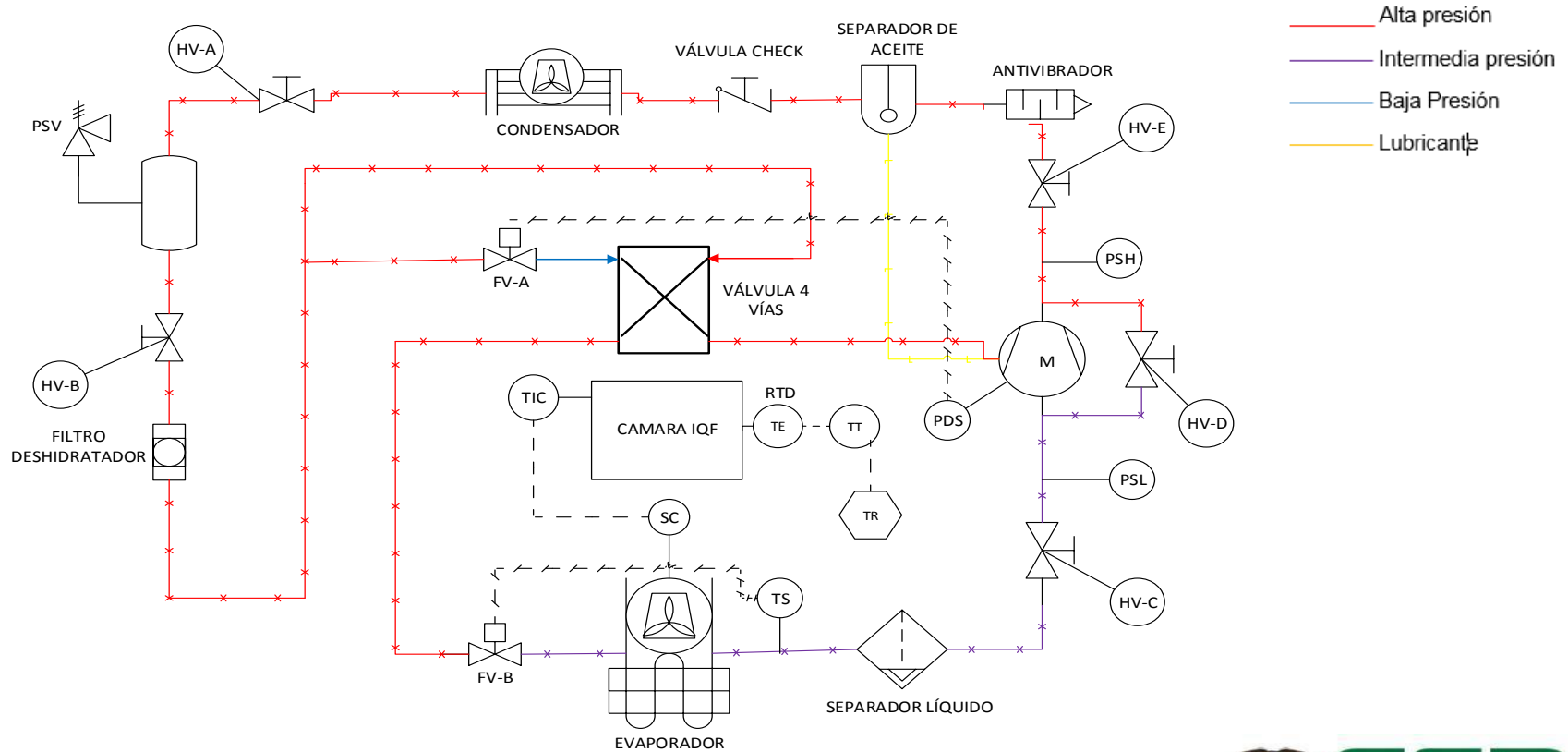
# Pantalla de bienvenida HMI



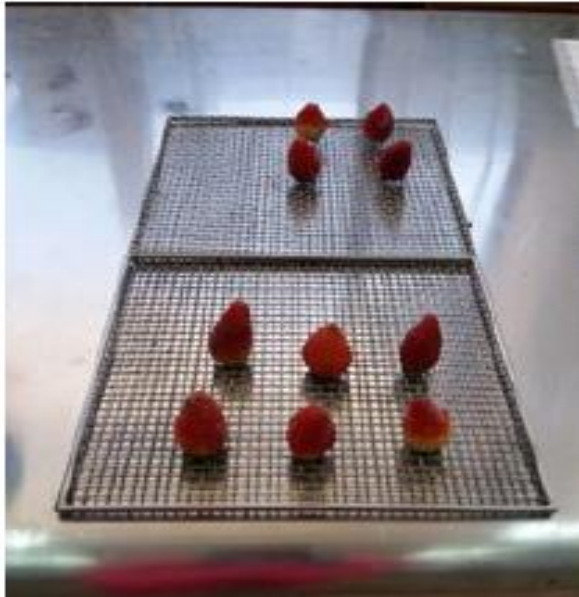
# Pantalla de monitoreo HMI



# Diagrama P&ID de la estación DIOFLUI-361



### 3. RESULTADOS



# Resultados experimentales

Experimento	Modelo matemático	Medición experimental
1	13'24"	12'50"
2	13'24"	12'02"
3	13'24"	12'22"
4	13'24"	12'18"
5	13'24"	12'37"





# Validación del sistema

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



# Distribución T de Student

Se tiene que la media de las diferencias 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:

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

# Distribución T de Student

$$\alpha = 1 - 0,95$$

$$\alpha = 0.05$$

$$t\left(\frac{\alpha}{2}, N - 1\right)$$

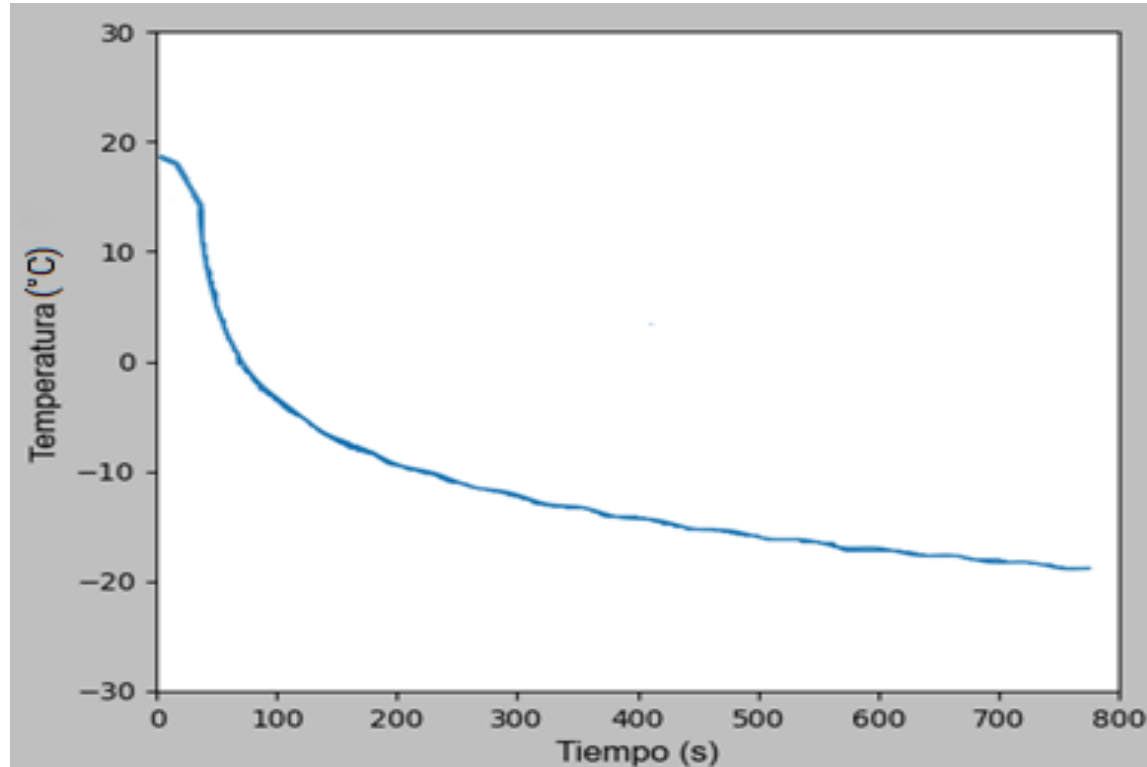
Para  $\alpha/2$  con 4 grados de libertad se tiene 2.7765

Finalmente:

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

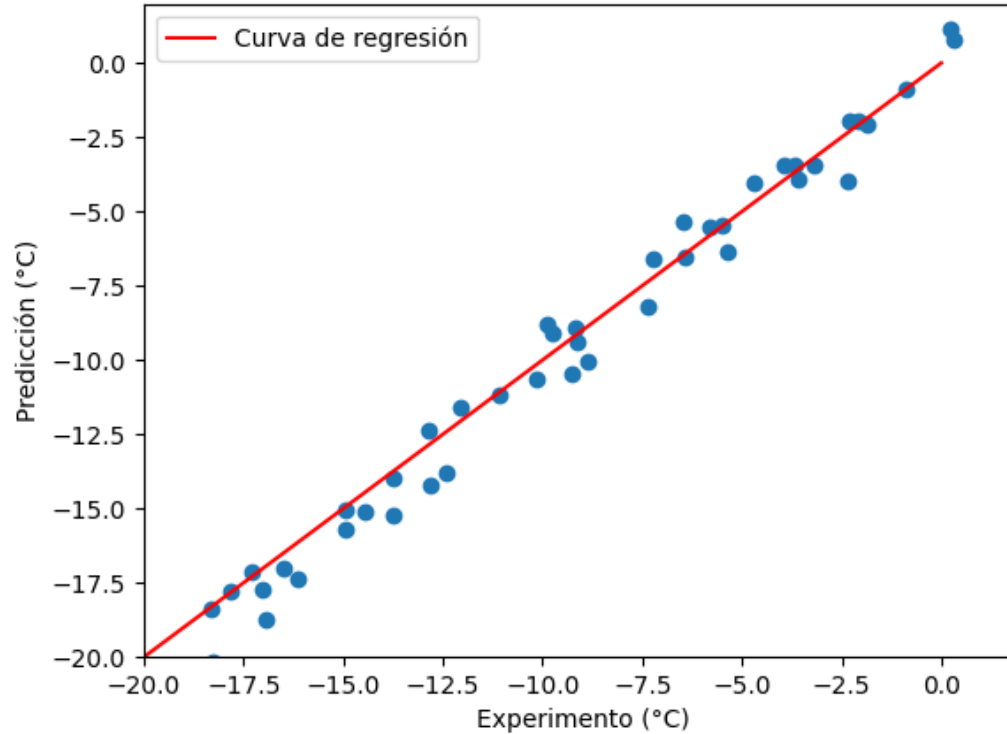
$$36'' \leq 1' \leq 1'21''$$

# Experimento 12 minutos 50 segundos



# Diagrama Bland-Altman

Diagrama de dispersión de temperatura



# Diagrama Bland-Altman

- Media aritmética de las diferencias de temperatura:

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

- Desviación estándar:

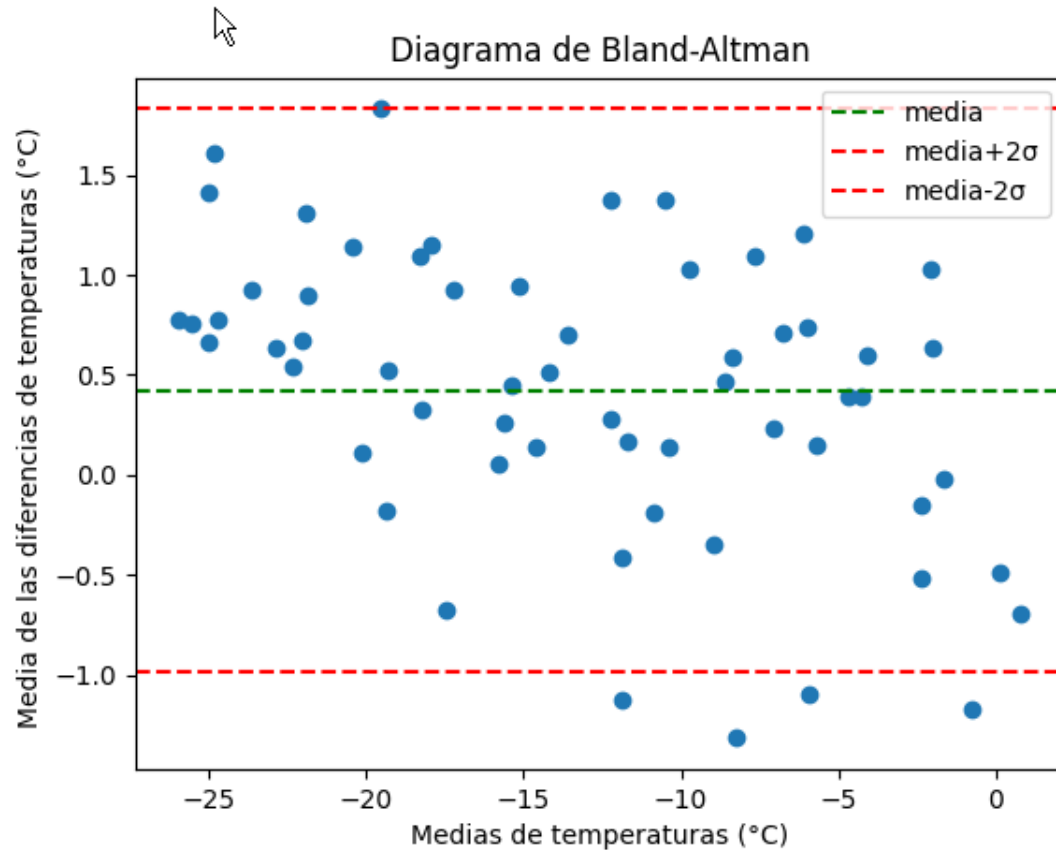
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$
$$\sigma = 0.75$$

# Diagrama Bland-Altman

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

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

# Diagrama Bland-Altman



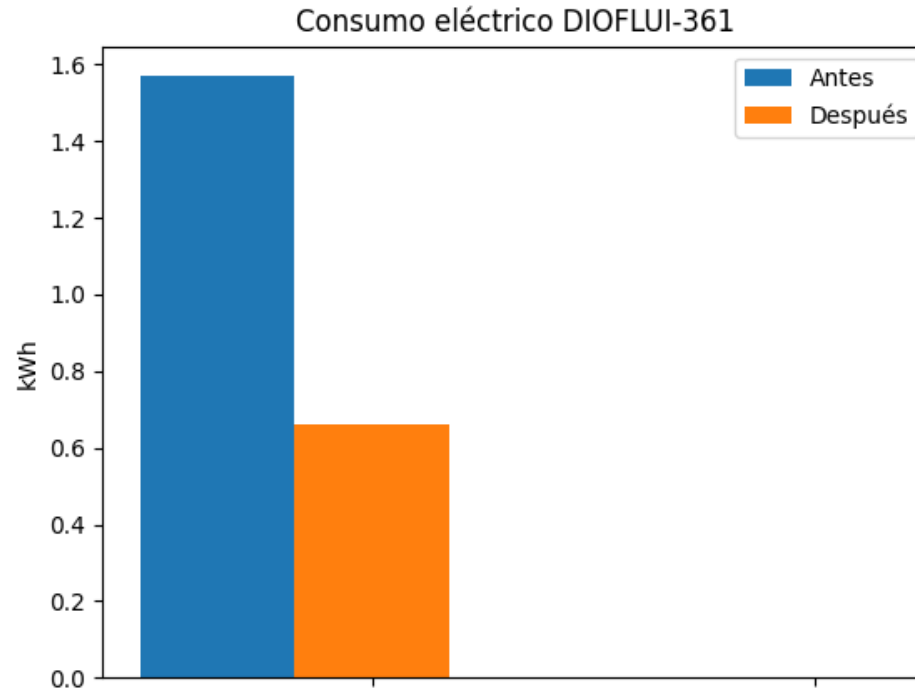


## 4. VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

	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



# Consumo eléctrico antes y después de haber implementado el sistema de monitoreo



## 4. 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.

## 4. CONCLUSIONES

- 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.

## 4. CONCLUSIONES

- 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.

## 4. 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.

## 4. RECOMENDACIONES

- 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.

# Agradecimientos



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Eléctrica y  
Electrónica**



**FACULTAD DE CIENCIA  
E INGENIERÍA EN ALIMENTOS**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**