

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO

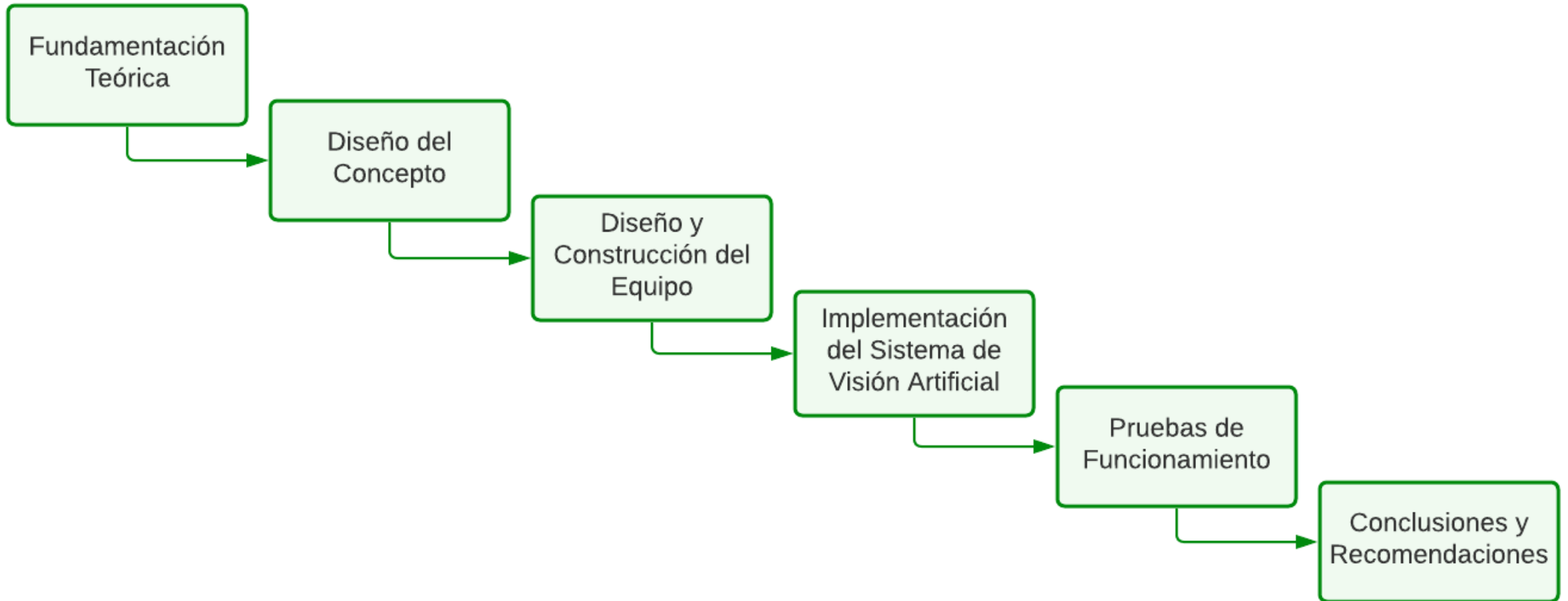
TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA PARA ENSAYOS DE
INFLAMABILIDAD HORIZONTAL MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL CENTRO DE
FOMENTO PRODUCTIVO METALMECÁNICO CARROCERO

AUTOR: SARMIENTO LOPEZ, RICARDO ANIBAL

DIRECTOR: ING. CONSTANTE PRÓCEL, PATRICIA NATALY

LATACUNGA, FEBRERO 2022





Diseñar y construir una cámara para ensayos de inflamabilidad horizontal mediante visión artificial para el Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero.



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adaptar la estructura de la cámara, en conformidad a la norma ISO 3795, para que cumpla con las especificaciones requeridas.
- Construir el equipo, usando materiales y herramientas disponibles localmente, para reducir el costo final en comparación a sus análogos adquiridos en el extranjero.
- Implementar un algoritmo de visión artificial, para reducir el tiempo utilizado en los ensayos de inflamabilidad horizontal, a través de software libre.
 - Validar el correcto funcionamiento del equipo, a través de pruebas usando materiales de referencia, para asegurar la confiabilidad de los resultados.



¿Implementar un sistema de visión artificial en la cámara para ensayos de inflamabilidad horizontal permitirá acortar el tiempo de duración del ensayo con respecto al proceso tradicional?



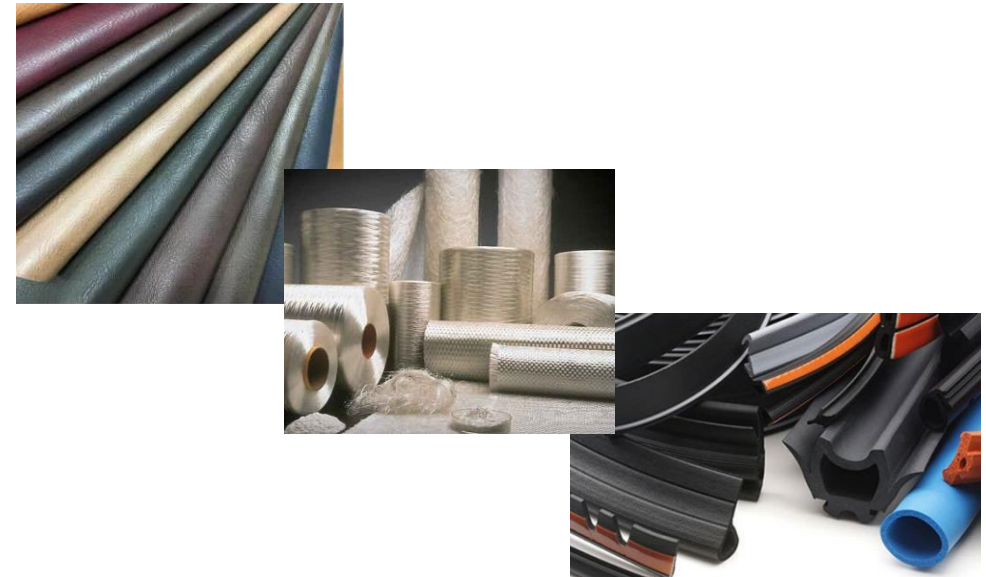
Norma ISO 3795

Estándar para determinar el comportamiento frente a la combustión de materiales usados en el interior de vehículos y maquinaria para transporte, agricultura, etc.



Cámara para Ensayos

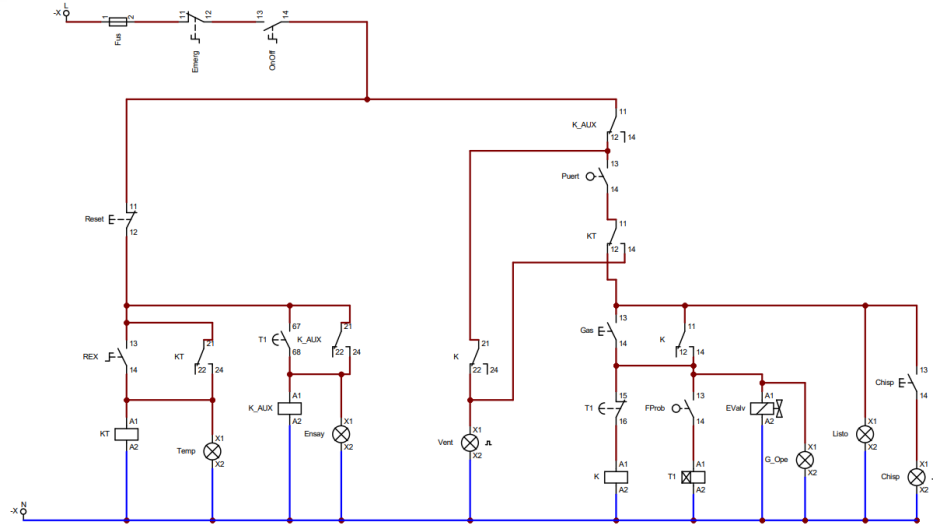
Equipo para realizar pruebas en condiciones controladas usando una llama de baja energía.



Materiales a ensayar

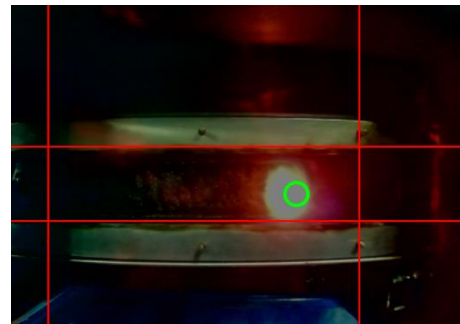
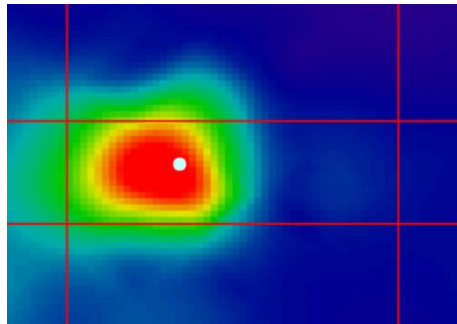
Cualquier material para interiores, como: textiles, elastómeros, termoplásticos, compuestos.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA



Técnicas de control

Conjunto de automatismos y programación para llevar a cabo un proceso con la menor intervención posible de un operario.



Visión Artificial

Es un campo de la inteligencia artificial que usando hardware y software permite obtener y procesar imágenes para distintas aplicaciones.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Matriz QFD

		14	14	20	20	12	14	12	
		1,2	1,2	1,7	1,7	1,0	1,2	1,0	
N°		1	2	3	4	5	6	7	
Requerimientos técnicos / Requerimientos del cliente		Importancia para el cliente	Materiales y técnicas de construcción	Repetibilidad en el proceso	Dispositivos empleados	Automatismos	Equipo modular	Componentes normalizados	Software libre
		5	3	4	4	2	2	3	
1	Cumplir con normativa vigente	5	●	○					
2	Trabajo continuo del equipo	3		●		▲			
3	Robustez en ambiente industrial	4	●	▲	●	●			
4	Fácil de usar	4		○	▲	●			
5	Bajo mantenimiento	2	○		▲	○	○	▲	
6	Económica	2	●		○	○	○	○	○
7	Uso con software libre	3				▲			●
Importancia del cliente ponderada ABSOLUTA		61	46	32	55	15	8	21	
Importancia del cliente ponderada RELATIVA		7,6	5,8	4,0	6,9	1,9	1,0	2,6	
Importancia técnica ABSOLUTA		71	54	53	92	15	9	21	
Importancia técnica RELATIVA		7,6	5,8	5,7	9,8	1,6	1,0	2,3	
Porcentaje		22,6	17,0	16,9	29,1	4,8	3,0	6,7	

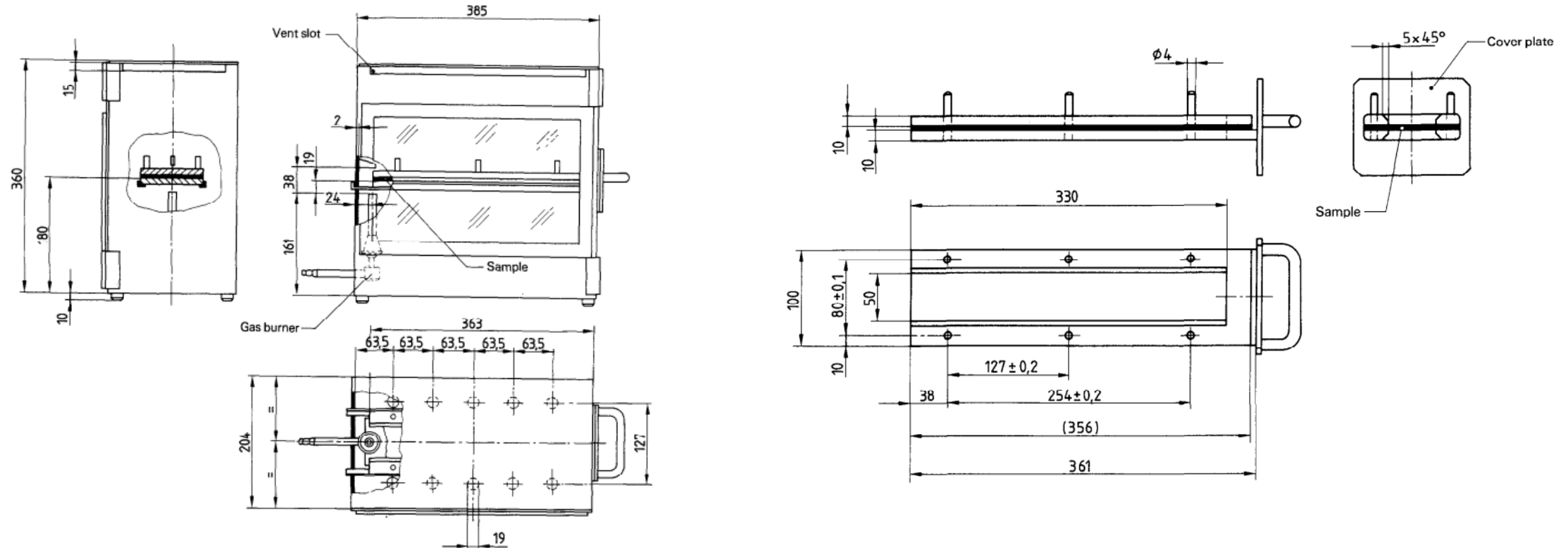
No.	Necesidad
1	Cumplir con normativa vigente
2	Trabajo continuo del equipo
3	Robustez en ambiente industrial
4	Fácil de usar
5	Bajo mantenimiento
6	Económica
7	Uso con software libre

No.	Alternativa de solución
1	Materiales y técnicas de construcción
2	Repetibilidad en el proceso
3	Dispositivos empleados
4	Automatismos
5	Equipo modular
6	Componentes normalizados
7	Software libre



Criterios de Diseño

Características dimensionales



Seguridad

Medio Ambiente



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Selección de componentes

Método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados

Evaluación Criterios, regulador de flujo

regulación > disponibilidad = compacto > precio						
Criterio	Precio	Disp.	Regulación	Compacto	$\Sigma+1$	Peso ponderado
Precio		0	0	0	1	0,1
Disponibilidad	1		0	0,5	2,5	0,25
Regulación	1	1		1	4	0,4
Compacto	1	0,5	0		2,5	0,25
				Suma	10	1

Evaluación de Resultados, regulador de flujo

Conclusión	Precio	Disponibilidad	Regulación	Compacto	Σ	Prioridad
solución A	0,050	0,167	0,200	0,167	0,583	1
solución B	0,050	0,083	0,200	0,083	0,417	2

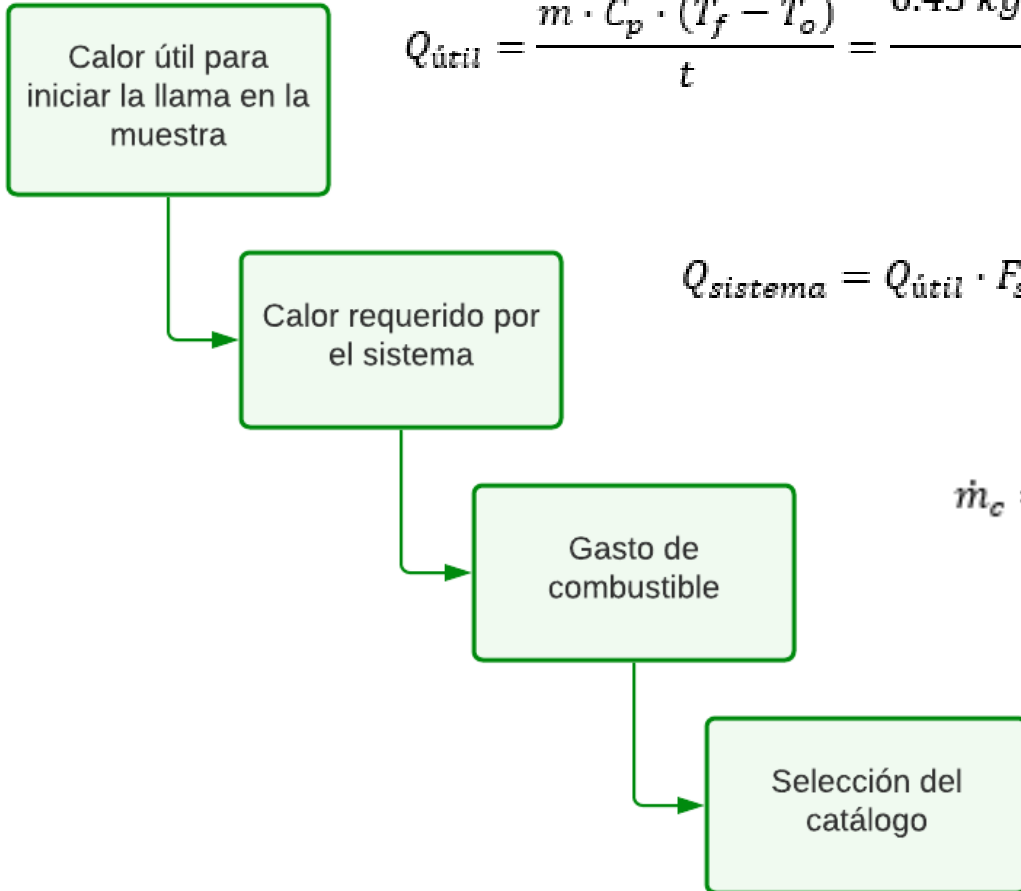
Evaluación criterio, Precio

solución A = solución B				
Precio	solución A	solución B	$\Sigma+1$	Peso ponderado
solución A		0,5	1,5	0,500
solución B	0,5		1,5	0,500
		Suma	3	1

Regulador de flujo



Selección de componentes



$$Q_{\text{útil}} = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_f - T_o)}{t} = \frac{0.45 \text{ kg} \cdot 190 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (550 \text{ }^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{0.75 \text{ h}} = 70.268 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{sistema}} = Q_{\text{útil}} \cdot F_s = 60420 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \cdot 1.3 = 91.35 \text{ kW}$$

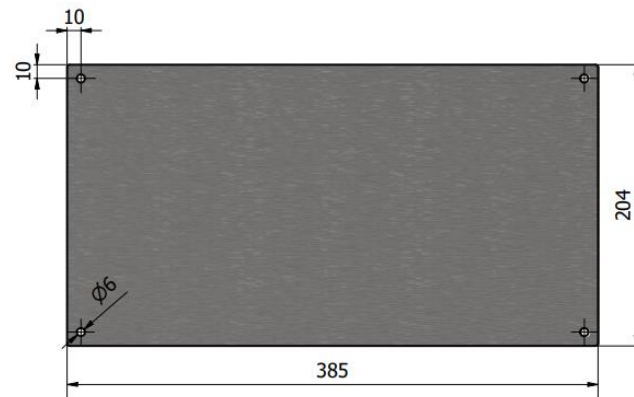
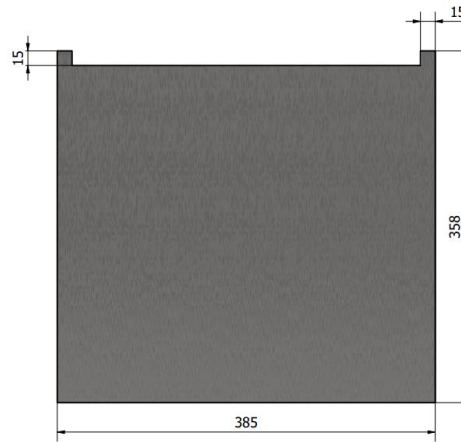
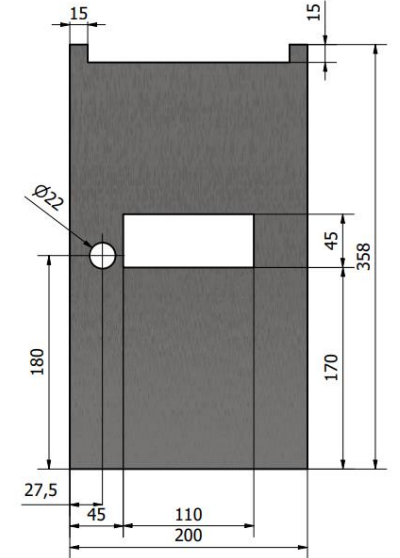
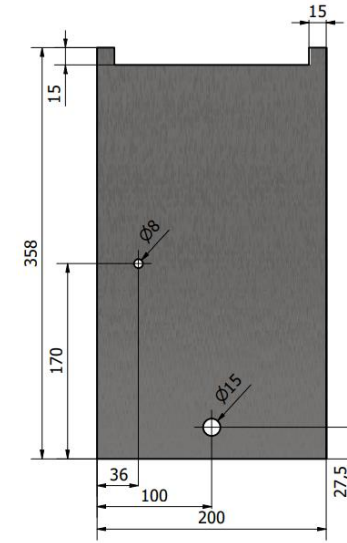
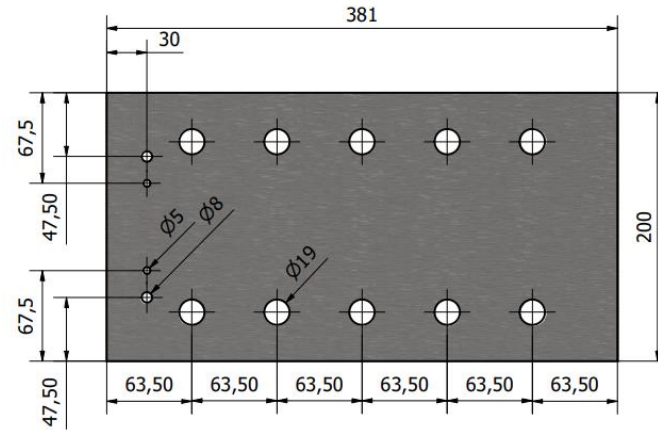
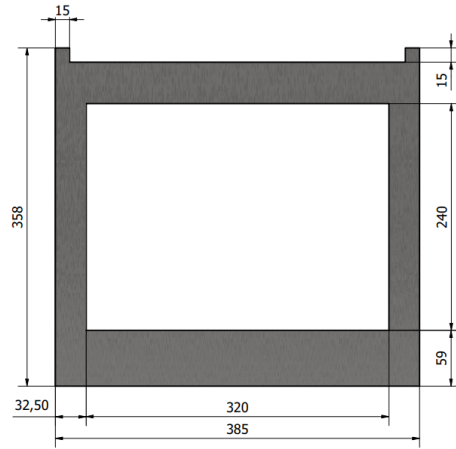
$$\dot{m}_c = \frac{Q_{\text{sistema}}}{H_{ci}} = \frac{78546 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{11800 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}} = 6.65 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0.197 \text{ lt/min}$$

Type	Symbol	Connections	Capacity NI/min regulated	free	Ø Orifice mm regulated	free	Pressure bar	Mass kg	Part number
M5 - G 1/8 - G 1/4 - G 3/8 - G 1/2 unidirectional and bidirectional flow regulators									
M5 ÷ G 1/2 	 unidirectional regulation	M5	99	125	1	2	0 ÷ 12	0,06	AM-5060
		G 1/8	140	410	1	5		0,05	AM-5061
		G 1/8	120	470	2,25	5		0,05	AM-5062
		G 1/8	280	520	3,5	5		0,05	AM-5063
		G 1/4	350	890	5	7		0,12	AM-5064
		G 1/4	700	900	6	7		0,12	AM-5065
		G 3/8	350	980	6	7		0,11	AM-5066
		G 1/2	2200	2800	9	12		0,22	AM-5067



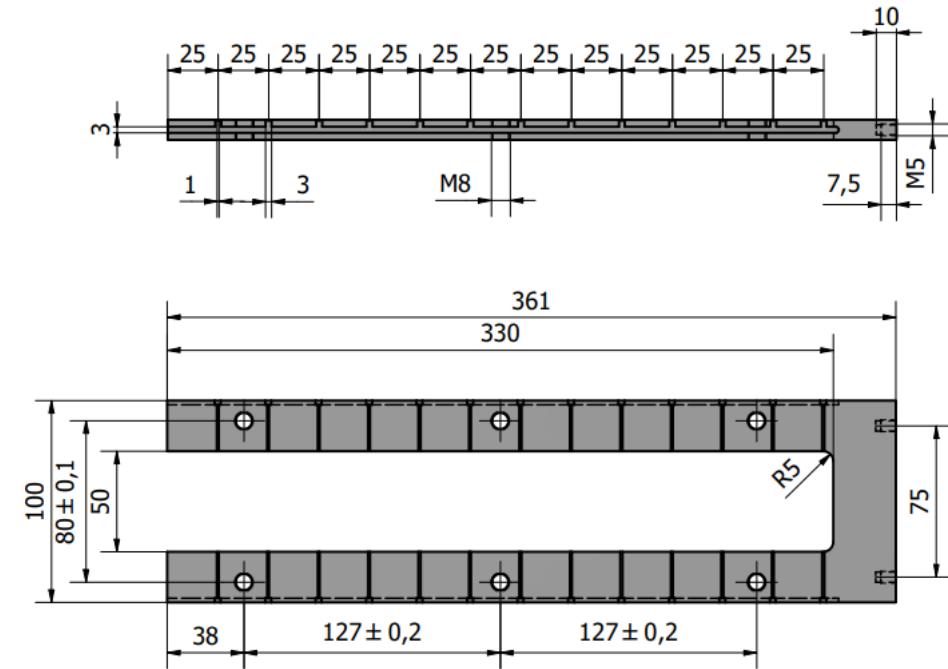
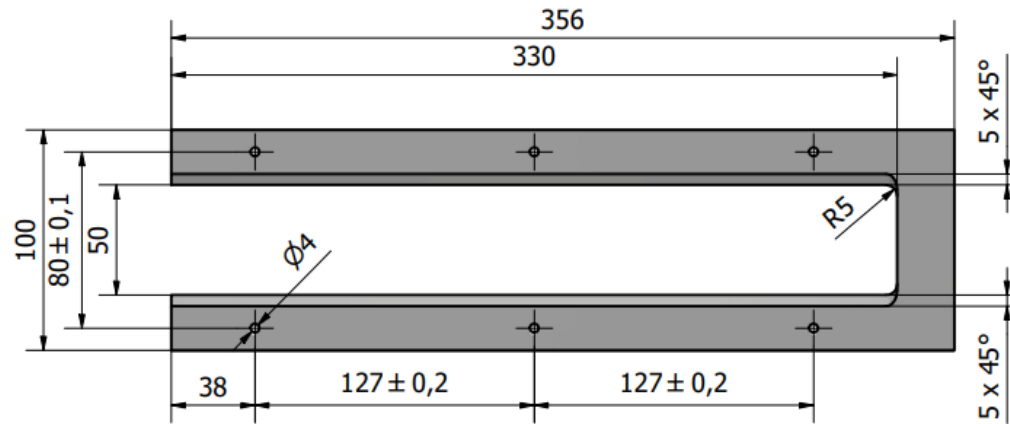
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Diseño del equipo, cámara de ensayos

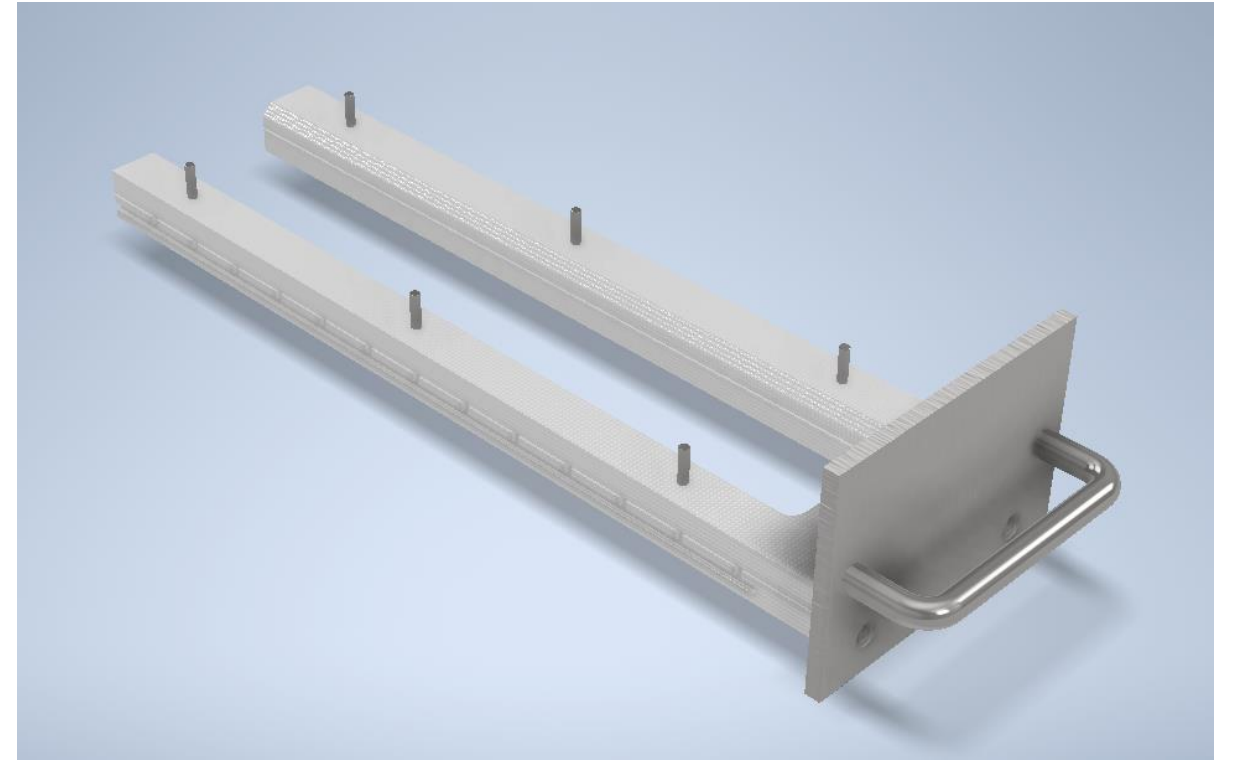


DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

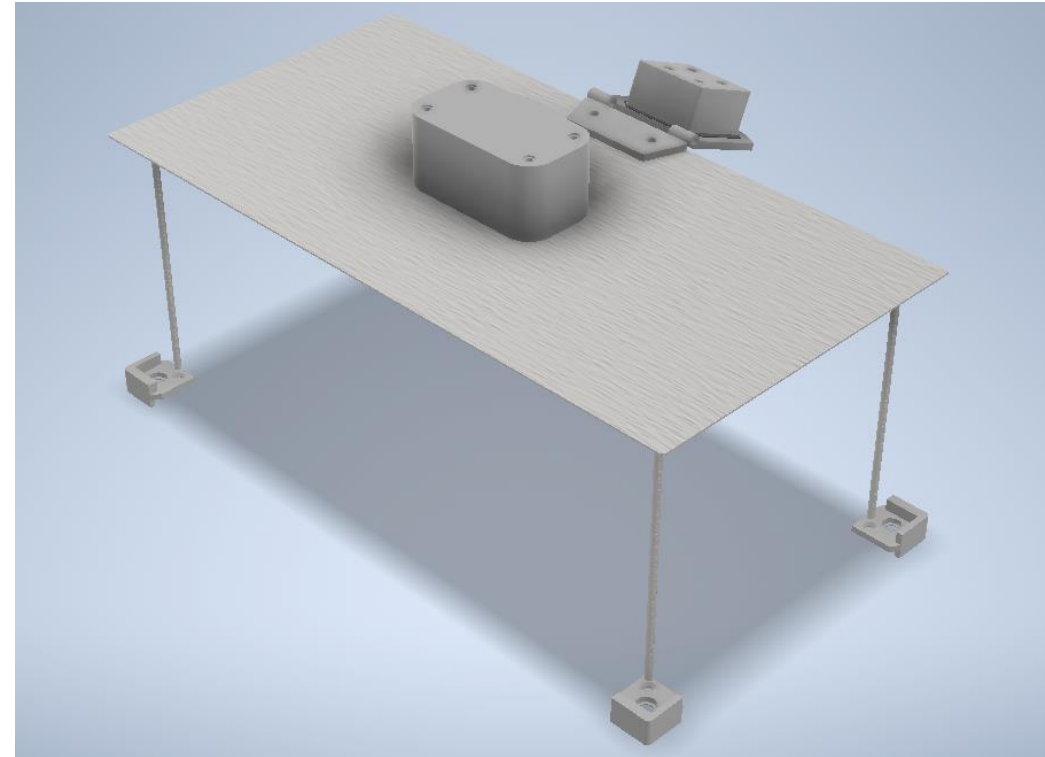
Diseño del equipo, porta-probetas



Diseño del equipo

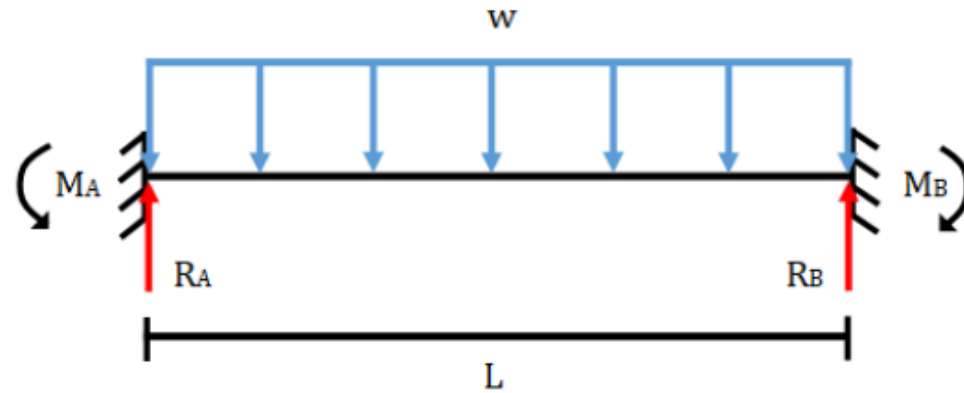


Diseño del equipo



Validación del equipo

Determinar esfuerzo y flexión máxima



$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M}{Z} = \frac{0.84 \text{ Nm}}{4.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3} = 1.87 \text{ MPa}$$

$$S_y = 175 \text{ MPa}$$

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{wL^4}{384 EI} = -\frac{70.17 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot (0.381 \text{ m})^4}{384 \cdot (190 \times 10^9 \text{ Pa}) \cdot (8 \times 10^{-9} \text{ m}^4)} = 2.53 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.00253 \text{ mm}$$

$$\frac{y_{m\acute{a}x}}{L} = 0.0005 \text{ a } 0.003 = 0.003 \cdot (381 \text{ mm}) = 1.143 \text{ mm}$$



Validación del equipo Software CAE

Teoría de Von Mises

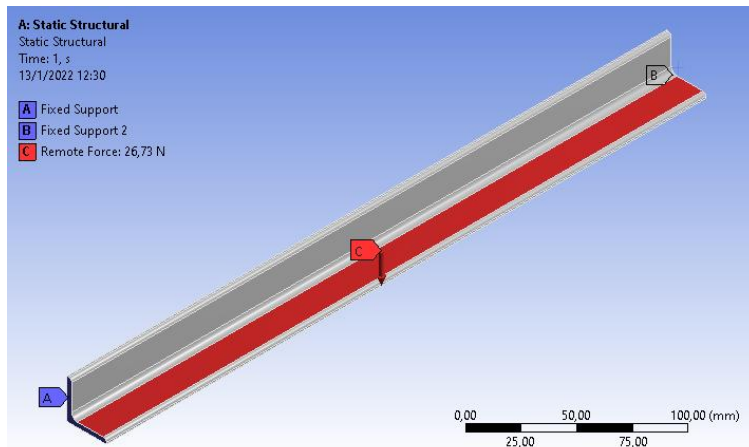
“La falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o compresión del mismo material”

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq S_y$$

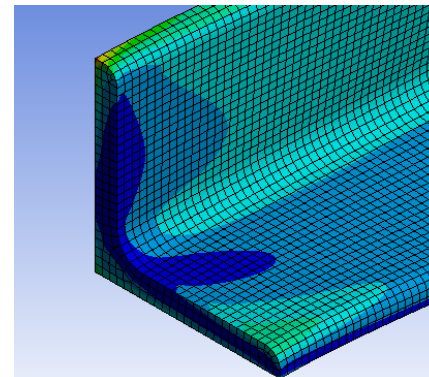
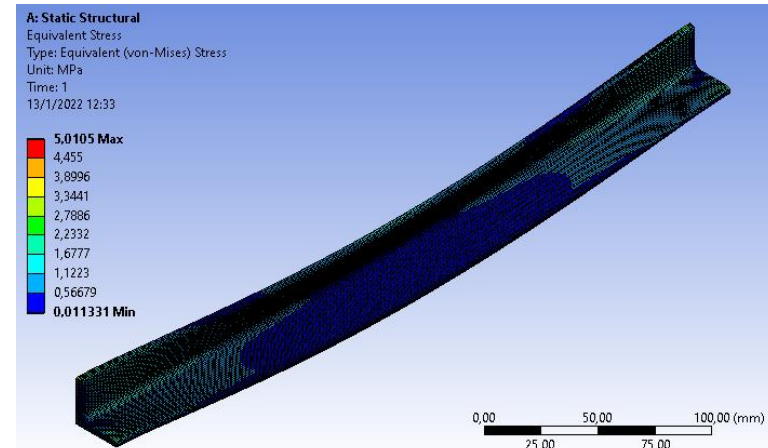


Validación del equipo Análisis estructural

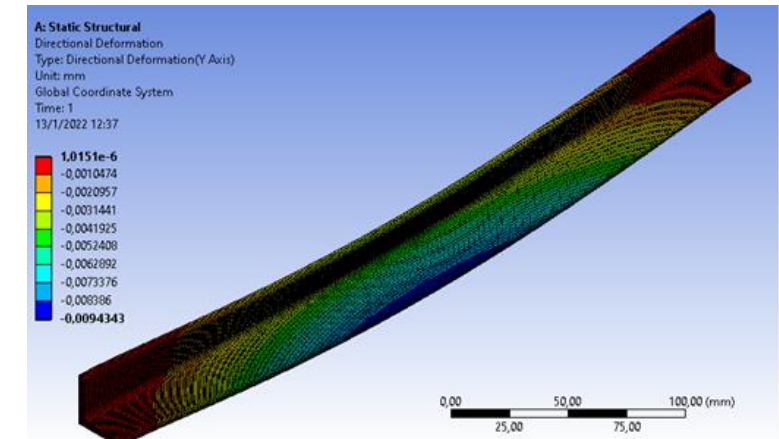
Condiciones de carga



Esfuerzo máximo

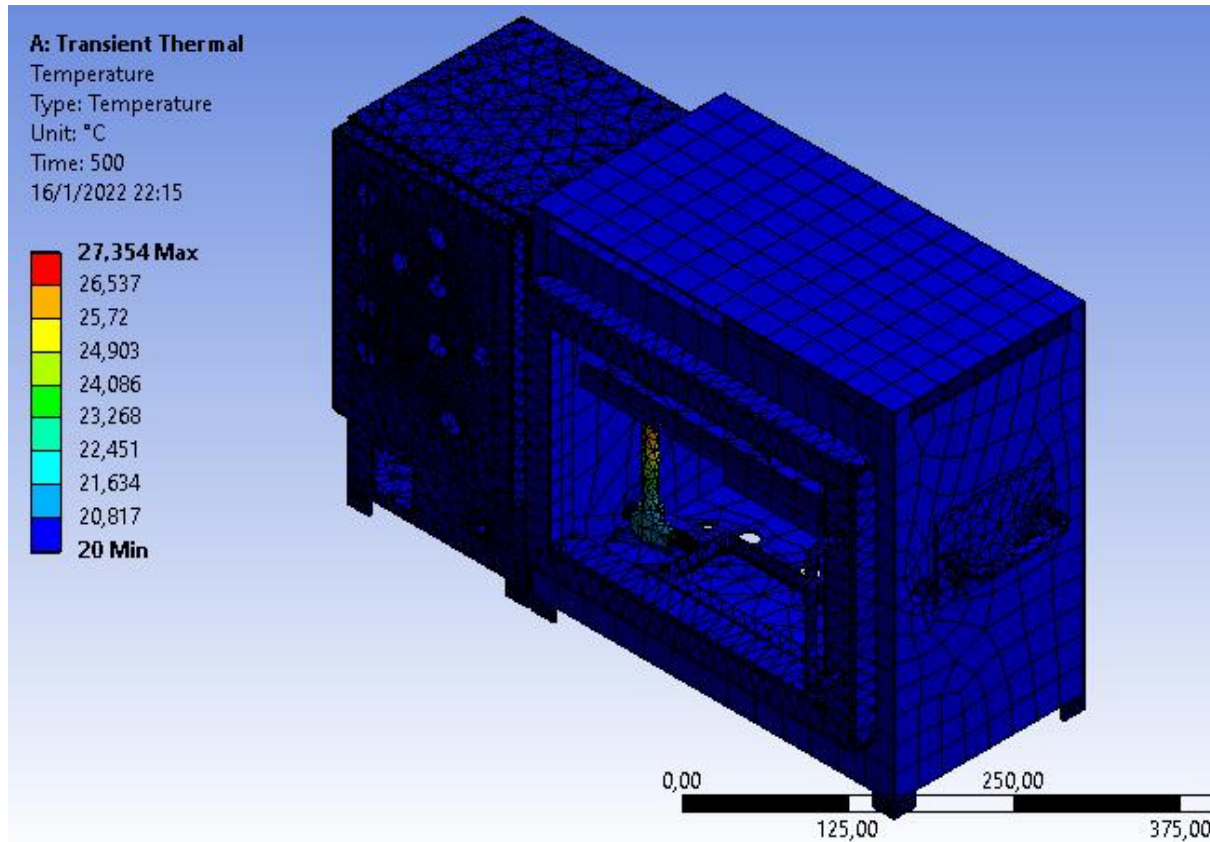


Flexión



Validación del equipo Análisis térmico

Variación de temperatura



Esfuerzo debido a cambios de temperatura

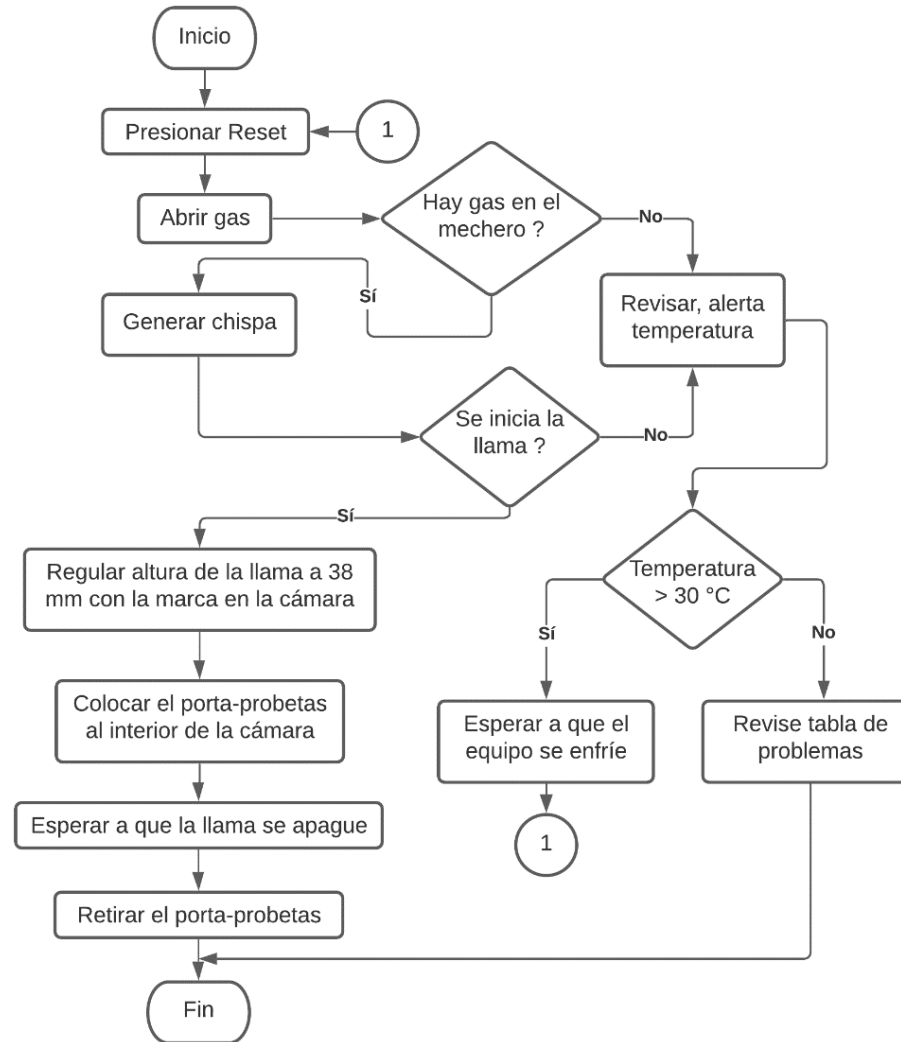
Tabular Data

	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [MPa]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [MPa]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [MPa]
1	1,	3,1449e-009	46,027	0,55214



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Sistema de control del equipo Algoritmo de control



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

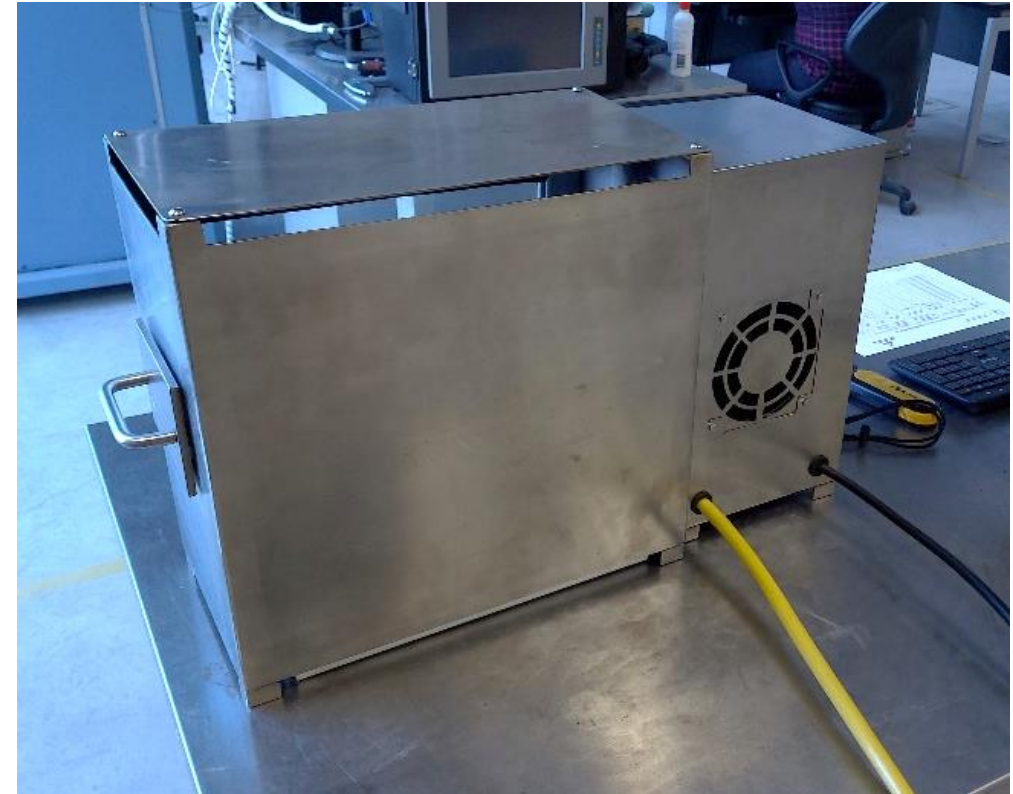
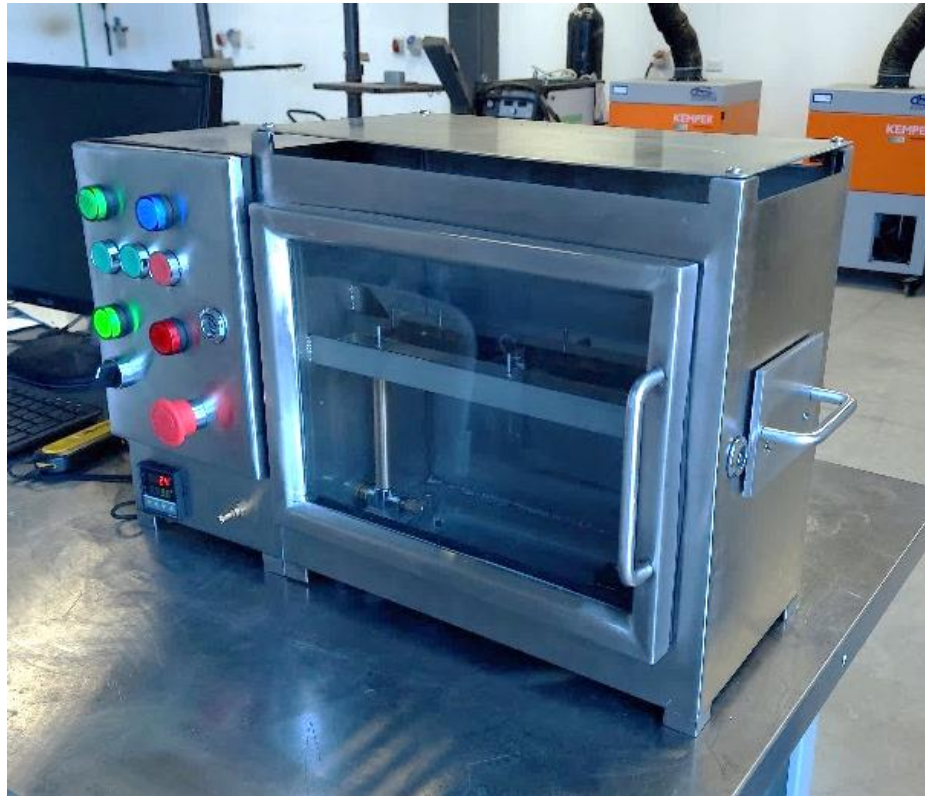
Construcción del equipo



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

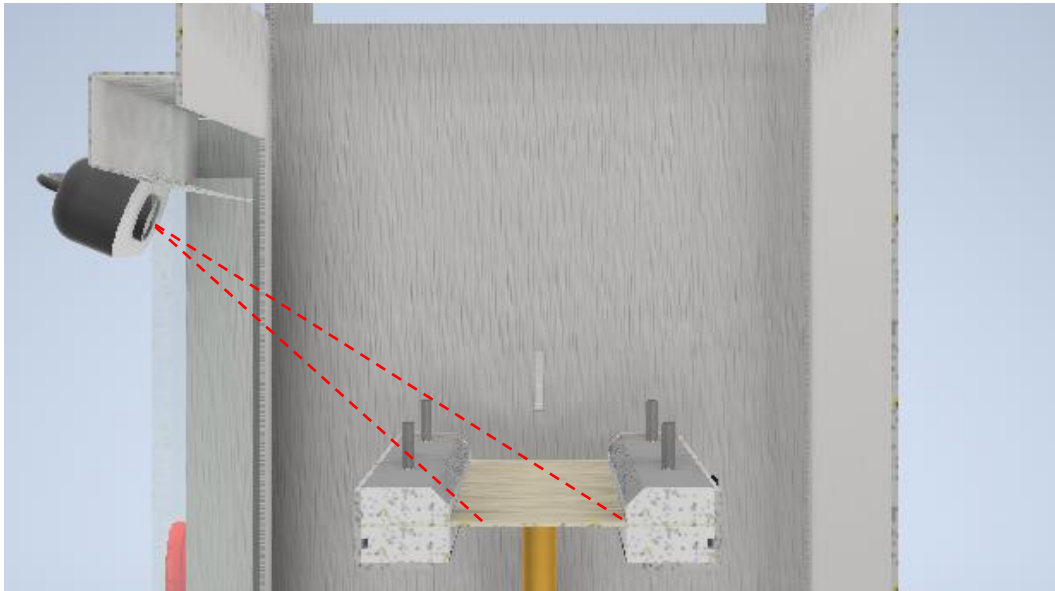
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Construcción del equipo



SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL

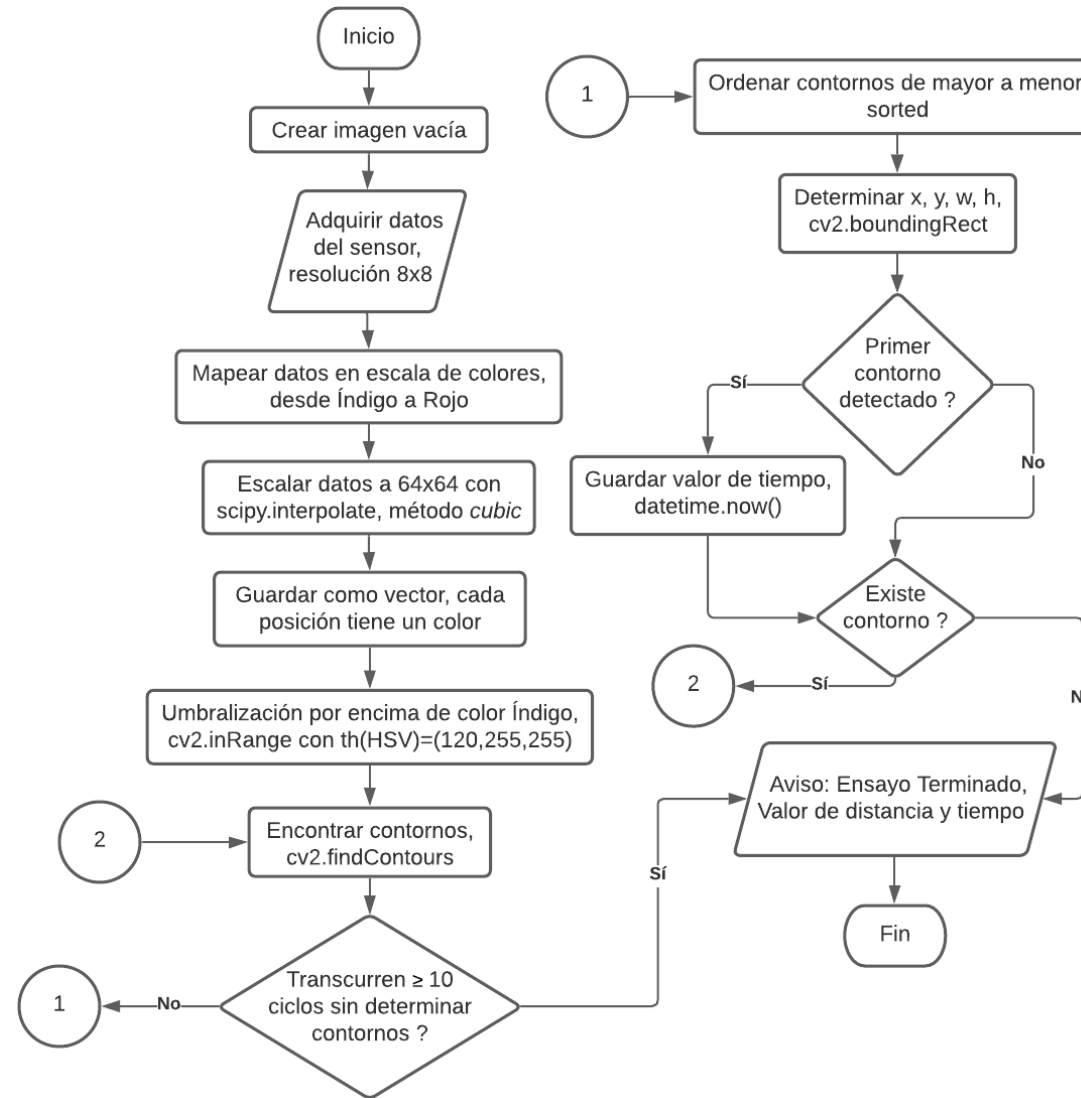
Ubicación y disposición



Iluminación



Algoritmo Cámara térmica



Algoritmo, cámara térmica

Adquisición de datos

```
import time
import busio
import board
import adafruit_amg88xx
i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)
amg = adafruit_amg88xx.AMG88XX(i2c)
```

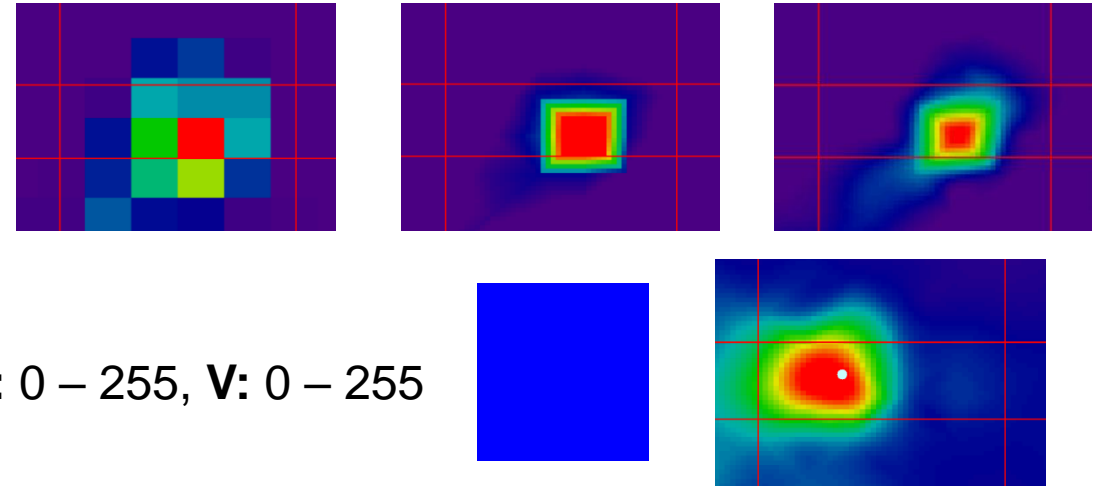
Escalado, 64 x 64

scipy.interpolate

Umbralización, inRange

H: 0 – 120, S: 0 – 255, V: 0 – 255

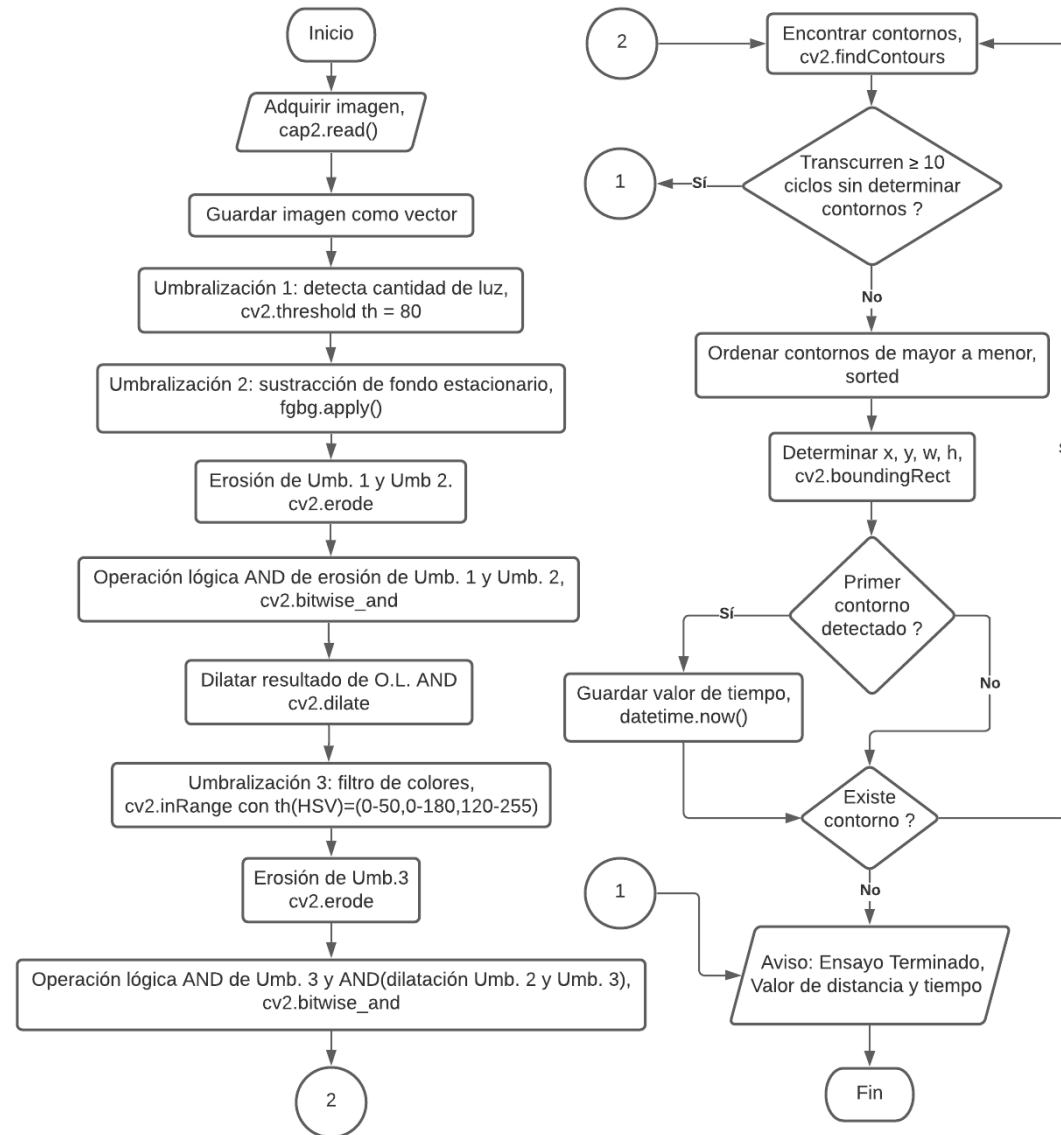
Tiempo



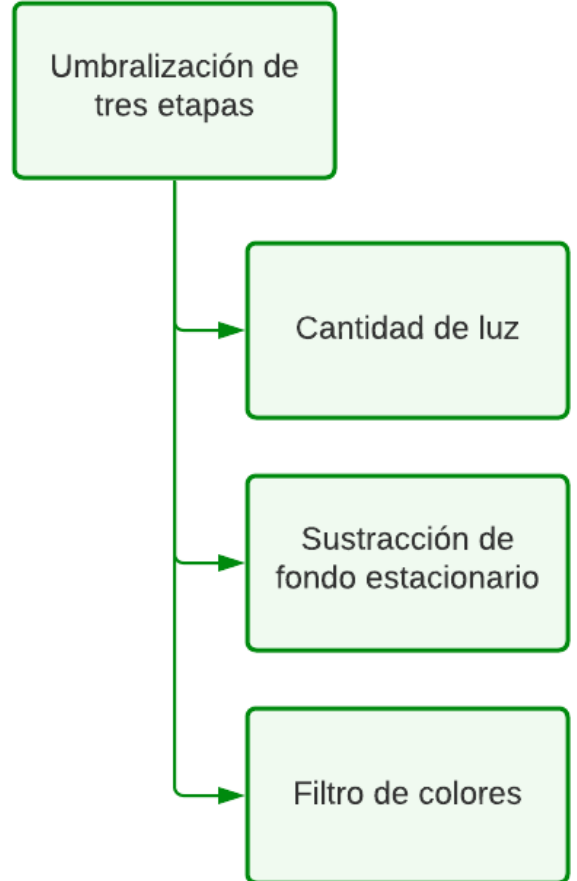
```
from datetime import datetime
# datetime object containing current date and time
now = datetime.now()
```



Algoritmo Cámara digital

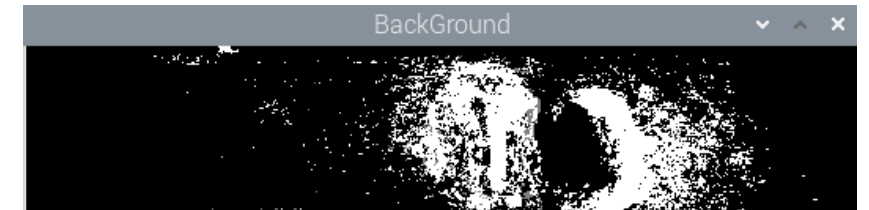
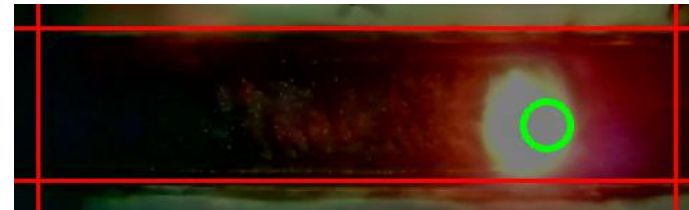


Algoritmo, cámara digital

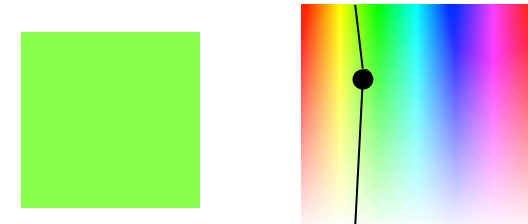


$$dst(x,y) = \begin{cases} 255, & src > th \\ 0, & src < th \end{cases}$$

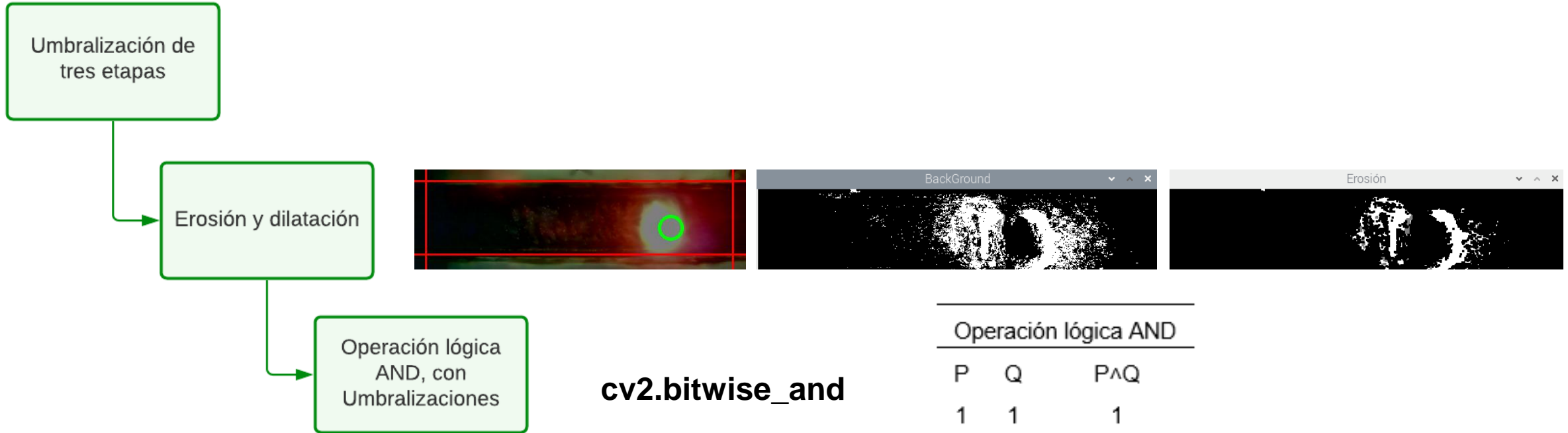
$$th = 80$$



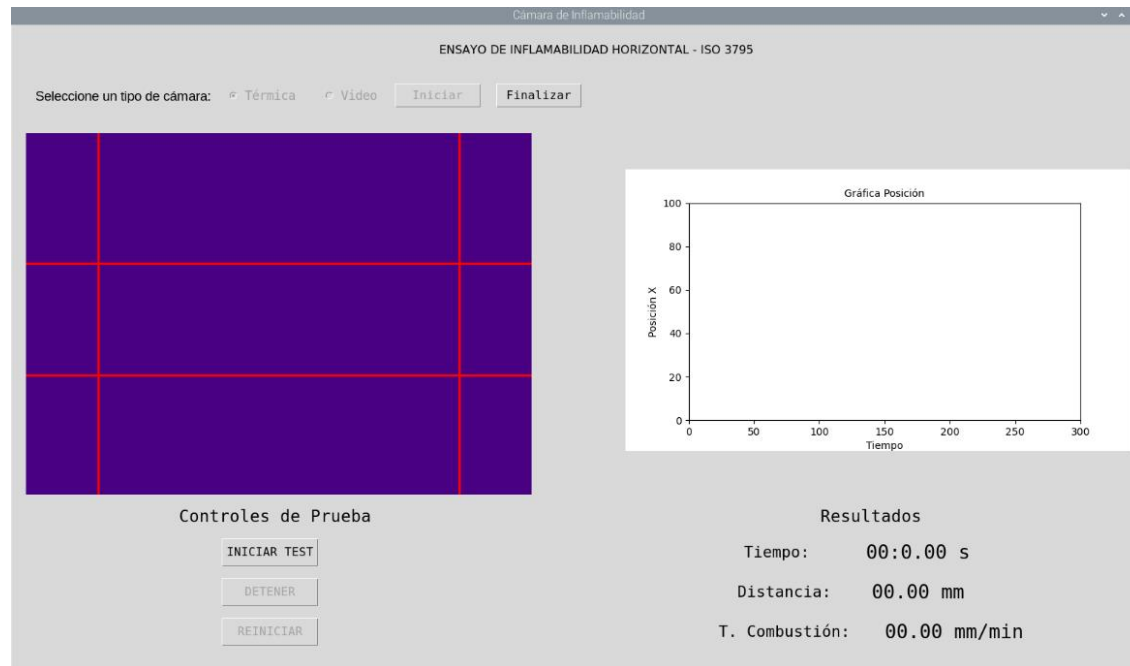
$$H: 0 - 50, S: 0 - 180, V: 120 - 255$$



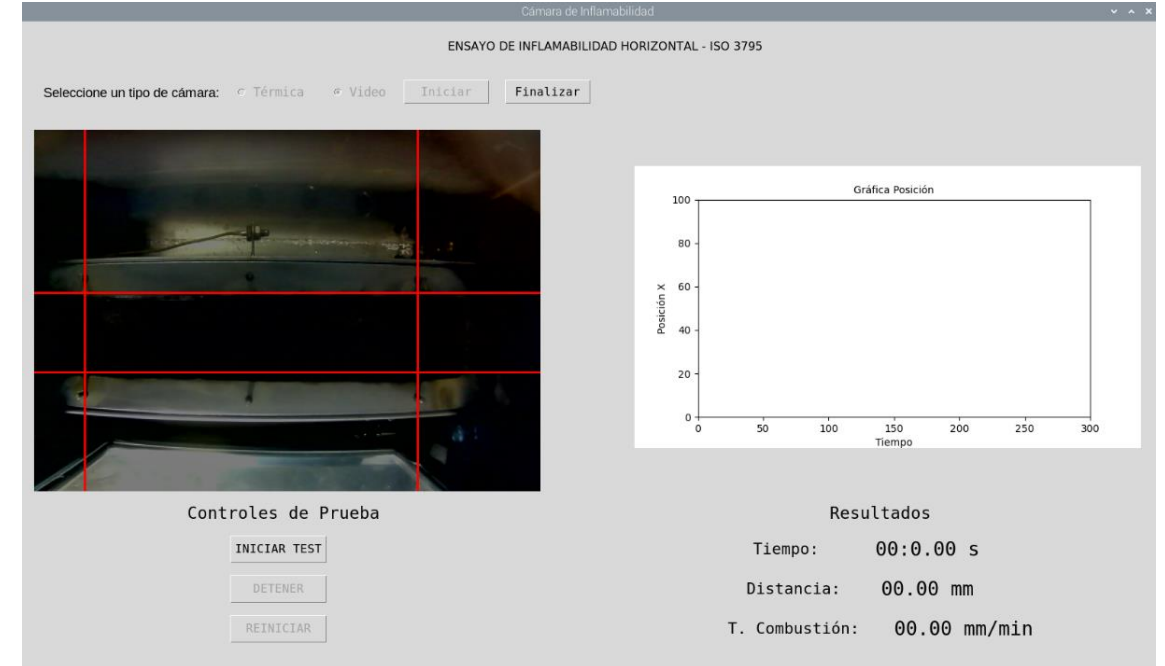
Algoritmo, cámara digital



Interfaz gráfica de usuario Cámara térmica



Cámara digital



Control dimensional

Control dimensional, cámara de ensayos

Identificador	Dimensión ISO 3795 (mm)	Dimensión real equipo (mm)	Tolerancia ISO 2768 (mm)	Variación (mm)



Repetibilidad del proceso




MANUAL DE USUARIO

Cámara de Inflamabilidad, según ISO 3795



⚠ PRECAUCIÓN

Antes de usar el equipo, lea cuidadosamente todas las advertencias e instrucciones de este manual. Guarde el manual para futuras referencias.

Equipo CFPMC – RS1



Temperatura



Ensayo de referencia

Resultados según ISO 3795, laboratorio designado

Probeta	Distancia corregida (mm)	Tiempo corregido (s)	Tasa de combustión corregida (mm/min)
1	18.76	23.471	47.96
2	17.84	24.401	43.87
3	15.91	21.591	44.21
4	11.98	17.361	41.40
5	20.53	30.061	40.98
		Promedio	43.68

Valores para comparación

Probeta	Tasa de combustión corregida (mm/min)	Variación con respecto al promedio (mm)	Porcentaje de variación con respecto al promedio (%)
1	47.96	4.27	9.78
2	43.87	0.18	0.42
3	44.21	0.53	1.21
4	41.40	2.28	5.22
5	40.98	2.71	6.20
		Promedio	4.57

Desv. Estándar: 2,79 mm

% de Exactitud: 4,57%

% de error máximo: 9,78%



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Ensayo con el equipo Acondicionamiento



Resultados

Resultados según ISO 3795, sentido de corte longitudinal

Probeta	Distancia (mm)	Tiempo (s)	Tasa de combustión (mm/min)
1	29,03	30,51	57,09
2	20,56	22,79	54,13
3	25,88	31,49	49,31
4	20,34	26,9	45,37
5	21,15	26,05	48,71
Promedio			55,03

Valores para comparación

Probeta	Tasa de combustión (mm/min)	Variación con respecto al promedio (mm)	Porcentaje de variación con respecto al promedio (%)
1	61,50	6,46	11,75
2	50,70	4,33	7,87
3	52,77	2,27	4,12
4	57,56	2,52	4,59
5	52,64	2,39	4,34
Promedio			6,53

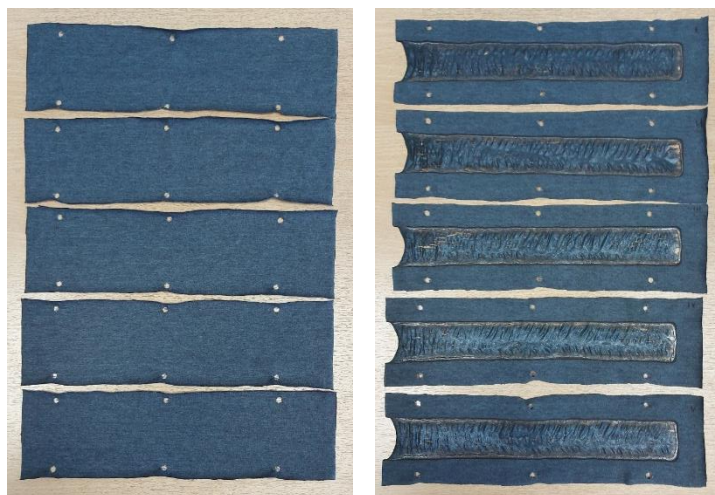
Desv. Estándar: 4,41 mm

% de Exactitud: 6,53% % de error máximo: 11,75%



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Ensayo con el equipo, modo manual



Resultados según ISO 3795, equipo en modo manual

Probeta	Distancia (mm)	Tiempo (s)	Tasa de combustión (mm/min)	Variación con respecto al promedio (mm)	Porcentaje de variación con respecto al promedio (%)
1	254	159,45	95,58	8,95	8,56
2	254	148,85	102,38	2,14	2,05
3	254	137,26	111,03	6,50	6,22
4	254	144,12	105,75	1,22	1,16
5	254	141,24	107,90	3,37	3,23
		Promedio	104,53	Promedio	4,24

Desv. Estándar: 5,91 mm

% de Exactitud: 4,24% % de error máximo: 8,56%



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Ensayo, cámara térmica

Resultados según ISO 3795, equipo en modo semiautomático con cámara térmica

Probeta	Distancia (mm)	Tiempo (s)	Tasa de combustión (mm/min)	Variación con respecto al promedio (mm)	Porcentaje de variación con respecto al promedio (%)
1	255	146,7	104,29	0,92	0,89
2	256,5	152,5	100,92	2,46	2,38
3	257,5	137,3	112,53	9,15	8,85
4	255	149,2	102,55	0,83	0,81
5	256,5	159,3	96,61	6,77	6,55
		Promedio	103,38	Promedio	3,89

Desv. Estándar: 5,85 mm

% de Exactitud: 3,89% % de error máximo: 8,85%

Ensayo, cámara digital

Resultados según ISO 3795, equipo en modo semiautomático con cámara digital

Probeta	Distancia (mm)	Tiempo (s)	Tasa de combustión (mm/min)	Variación con respecto al promedio (mm)	Porcentaje de variación con respecto al promedio (%)
1	255,2	159,5	96,00	10,76	10,08
2	254,1	151	100,97	5,79	5,43
3	254,6	137,1	111,42	4,66	4,37
4	255,7	131,4	116,76	10,00	9,37
5	254,6	140,6	108,65	1,89	1,77
		Promedio	106,76	Promedio	6,20

Desv. Estándar: 8,29 mm

% de Exactitud: 4,24% % de error máximo: 10,08%



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Validar Hipótesis

20 eventos de funcionamiento

Ensayo	Tiempo promedio
Ensayo manual	296,76
Cámara térmica	215,22
Cámara digital	221,93

Hipótesis planteada

Ho: el tiempo de ensayo con el sistema de visión artificial, es menor al tiempo en modo manual.

T Student

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Cámara térmica, cumple con Ho

$$t = \frac{215.22 - 296.76}{\frac{6,94}{\sqrt{20}}} = -52.54$$

$$t < t_\alpha$$

$$-52.54 < 1.3277$$

Cámara digital, cumple con Ho

$$t = \frac{221.93 - 296.76}{\frac{6,94}{\sqrt{20}}} = -48.22$$

$$t < t_\alpha$$

$$-48.22 < 1.3277$$



CONCLUSIONES

- Un sistema de visión artificial reduce el tiempo de ensayo en promedio alrededor de 81.54 segundos al tomar datos de 20 eventos realizados bajo las mismas condiciones, en comparación a desarrollar el ensayo de forma manual; se debe usar los equipos adecuados, como un sensor AMG8833 y una Raspberry Pi 4.
- La cámara de ensayos se diseñó en base a los requerimientos de la norma ISO 3795, considerando las características dimensionales del equipo, especificaciones del proceso, método de ensayo y datos para el informe de resultados; existen otras normas como la FMVSS 302 que también se toman de referencia para el desarrollo de la cámara de ensayos.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

- Se verifica a través de simulaciones en software, que la cámara de ensayos resiste los esfuerzos mecánicos y térmicos que se producen durante los ensayos, el factor de seguridad del equipo es mayor a 2 y los ciclos de vida útil se estiman en más de 1×10^6 ciclos.
- El equipo se fabricó usando materiales y técnicas de construcción disponibles localmente, los materiales son acero inoxidable y latón, entre las técnicas de construcción se incluye el uso de cortadora hidráulica de hoja, cortadora de plasma, amoladora, grupo de soldadura TIG, fresadora CNC, torno, equipo para satinar y decapar.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

- El costo del equipo se reduce considerablemente en comparación a adquirirlo de un proveedor en el extranjero, el costo final se sitúa en alrededor de \$1200; el tiempo de fabricación es relativamente extenso, superior a 200 horas de trabajo debido a las modificaciones y ajustes que se debían realizar conforme se desarrollaba el proyecto.
- El sistema de control del equipo utiliza tres relés para mando, un relé temporizador, una electroválvula, un módulo de chispa con su electrodo, un regulador de flujo, dos finales de carrera, pulsadores e interruptores; la sencillez del mismo permite que el sistema sea robusto a la vez que económico, no se evidencia la necesidad de colocar algún sistema más complejo para realizar los ensayos de forma manual.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

- Los algoritmos de visión artificial implementados sirven para determinar el tiempo y la distancia consumida por la llama, el que usa la cámara térmica da mejores resultados, en los ensayos desarrollados se observa que para probetas de tela de punto, los valores obtenidos en el ensayo manual tienen una desviación estándar de 5,91 mm en comparación a los 5,85 mm del ensayo con la cámara térmica, indicando la elevada repetibilidad del proceso; el algoritmo con la cámara digital entrega resultados menos precisos y exactos, la desviación estándar para este caso fue de 8,29 mm.
- Las pruebas desarrolladas permiten determinar que el equipo es confiable, robusto y seguro para operar, que permite ensayar probetas con una precisión y exactitud aceptables, y que se podría usar para caracterización de materiales siguiendo el mismo método de ensayo.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

- Se observó la importancia del acondicionamiento de las probetas, cuando se mantienen todas las condiciones de ensayo y se eleva la temperatura de acondicionado las probetas ensayadas aumentan su tasa de combustión, esto podría deberse a una menor humedad relativa en las mismas. Para definir un valor de este incremento, se deberían ensayar varios grupos de probetas de distintos materiales, pero con un grupo de probetas de tela de punto se observa que, variando la temperatura de 25 °C a 50 °C, el tiempo promedio de ensayo se reduce hasta en 1 minuto.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RECOMENDACIONES

- Para mejorar la exactitud de los resultados se podría usar una cámara térmica con mejor resolución o con un ángulo de visión mayor, de esa forma se coloca más cerca a la probeta y los resultados serían más aproximados.
- En caso de requerir acreditación de la máquina, se sugiere considerar otros métodos de fabricación para que las tolerancias dimensionales del equipo se encuentren en rangos más precisos según la norma ISO 2768, por ejemplo, el uso de una cortadora de plasma CNC, lo cual incrementaría el costo, pero también la exactitud de las medidas.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RECOMENDACIONES

- Seguir atentamente los intervalos de mantenimiento del equipo descritos en el manual de usuario, para asegurar el buen funcionamiento de elementos como el electrodo, mismo que debido a los ensayos se acumula de hollín; observar con el tiempo si existe una ubicación para el electrodo en la cuál se pueda alargar el intervalo de mantenimiento para el mismo.
- Al fabricar el porta-probetas considerar que, debido a la geometría con forma de U, el mismo tiende a cerrarse, provocando que las dimensiones que originalmente cumplía, sean defectuosas una vez retirado de la fresadora CNC, para ello se debe mecanizar en etapas; esta pieza se debe mecanizar para obtener las tolerancias requeridas, ya que otros procesos manuales no servirían.



RECOMENDACIONES

- El equipo cuenta con un sinnúmero de seguridades para evitar lesiones al operario, sin embargo, se podría añadir un sensor detector de gases al interior del tablero de control, y colocar una condición que, si se evidencia una concentración muy alta de GLP por un tiempo muy prolongado, dar un aviso en la pantalla de la GUI. Esto no se realizó debido a la necesidad de que el equipo pueda trabajar de forma modular, es decir independientemente del sistema de visión artificial.
- No cambiar la ubicación y disposición del equipo ya que la calibración para el sistema de visión artificial se encuentra desarrollada para las condiciones de luz actuales, colocarlo en otro lugar podría dar a lugar a tener que repetir la calibración.



RECOMENDACIONES

- Desarrollar una plantilla de calibración para el sistema de visión artificial, para facilitar el uso en caso de reubicar el equipo; esto no se desarrolla en el presente proyecto debido a que el requerimiento principal de la empresa era un equipo que permita desarrollar ensayos en forma manual.
- El lenguaje de programación Python ofrece las herramientas necesarias para desarrollar un algoritmo capaz de reconocer la llama, se podría desarrollar otra interfaz usando PyQt5 que dispone de más herramientas y presentarla como una HMI, no solamente como una GUI.
- Otra forma de validar el funcionamiento del equipo y por consiguiente de los resultados obtenidos en los ensayos, es conseguir un material de referencia que declare un valor certificado de inflamabilidad para este ensayo, se usó algunos materiales no certificados para probar el equipo y calibrar el sistema de visión artificial.

